

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Mecánica



**CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMECÁNICA DEL CRECIMIENTO Y
REMODELACIÓN DEL *PERUMYTILUS PURPURATUS* CULTIVADOS EN
CONDICIONES DE CRECIMIENTO NATURAL**

ESTEFANO MATÍAS MUÑOZ MOYA

Profesor guía:
Claudio Moisés García Herrera

Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el Título de Ingeniero Civil en Mecánica y Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería mecánica.

Santiago – Chile
2020

© Estefano Matías Muñoz Moya, 2020.

RESUMEN

Este trabajo se enmarca en el proyecto **PIA ANID ANILLOS ACT172037** y su realización es posible gracias al proyecto **FONDEQUIP EQM 150010**. El objetivo principal de esta Tesis es analizar mediante el método de elementos finitos (**MEF**) la evolución geométrica y respuesta biomecánica de la concha del chorito maico (*Perumytilus purpuratus*) en condiciones de crecimiento natural para que, en investigaciones posteriores, sea posible contrastar el modelo frente a solicitudes fuera del equilibrio biológico provocado por cambios climáticos del entorno, considerando al mejillón vulnerable a cambios físicos (calentamiento) y químicos (acidificación) del agua, con el fin de incorporar en la mecánica de materiales a organismos biológicos que se vean influenciados en el contexto de cambio climático.

En primer lugar, se establece el estado del arte del problema medio ambiental, y como en particular, el *Perumytilus purpuratus* se ve afectado. Se presenta una recopilación de la literatura en biomecánica de moluscos. Se señalan mecanismos y formulaciones matemáticas para el modelo constitutivo del comportamiento mecánico del material y las ecuaciones requeridas para su implementación, las cuales se basan en la *Ley de Hooke Generalizada*.

Para este trabajo se analizan dos grupos, el primero corresponde a organismos provenientes del río Huasco (75 individuos) en la región de Atacama, Chile. El segundo corresponde a muestras de las costas de Quintay (125 individuos) en la región de Valparaíso, Chile. El primer estudio analiza la hipótesis sobre la simetría mecánica de las valvas, es decir, comprobar que ambas valvas del bivalvo tienen un comportamiento mecánico similar realizando ensayos de compresión uniaxial (dejando a un lado los ensayos de tracción debido a la imposibilidad de elaborar probetas que cumplan con los requisitos de esta prueba). Para verificar esta hipótesis se obtienen probetas del material de la concha, estas son sometidas a un ensayo de compresión uniaxial orientada en tres ejes: dirección del espesor (d_e), la cual es ortogonal a la superficie de la concha, dirección radial (d_r), paralela a las estrías de la valva, y dirección tangencial (d_t), ortogonal a ellas. Además, la valva se divide en tres zonas a lo largo de la concha, con el fin de observar diferencias en la deposición del material. Por lo tanto, se realizan 270 ensayos de compresión uniaxial. El segundo estudio evalúa el comportamiento biomecánico material y estructural en el crecimiento del *P. purpuratus*. El estudio contempla 125 especímenes criados en su estado natural durante tres meses, con el fin de obtener la edad de cada uno según la longitud de los mismos, posterior a esto, cinco muestras son seleccionadas para realizar simulación numérica a partir de su estructura, considerándolas de menor a mayor tamaño.

A las valvas se les realiza el ensayo de compresión uniaxial (caracterización material) y flexo-compresión (caracterización estructural) para la caracterización sus propiedades mecánicas, con el fin de ayudar al entendimiento de su capacidad defensiva contra depredadores y, en un futuro, complementar las estimaciones actuales de las pérdidas en la industria acuícola de Chile, la cual tiene directa dependencia del estado ecosistémico de las especies comerciales.

De estos resultados se plantea la validación del modelo constitutivo empleando simulaciones numéricas por **MEF**. La geometría utilizada por la simulación se obtiene mediante tecnología Micro-CT, de gran ayuda para crear un método capaz de otorgar a la simulación los valores correspondientes al comportamiento mecánico ortotrópico del material en las respectivas simulaciones.

Palabras claves: biomecánica, biomateriales, materiales biológicos, elementos finitos, crecimiento, cambio climático, acidificación.

ABSTRACT

This work was realized under the project **PIA ANID ANILLOS ACT172037**, and its realization is enabled by the project **FONDEQUIP EQM 150010**. The main objective of this thesis is to analyze using the finite element method (**FEM**) the geometric evolution and biomechanical response of the *Perumytilus purpuratus* mussel shell under natural growth conditions so that, in later investigations, it will be possible to contrast the model against solicitations out of biological balance caused by climatic changes in the environment, considering the bivalve mussel *P. purpuratus* vulnerable to physical (warming) and chemical (acidification) changes in the water, in order to incorporate into the material mechanics science biological organisms that are influenced in the context of climate change.

Firstly, it establishes the state of the art of the environmental problem, and how in particular, the *Perumytilus purpuratus* is affected. A compilation of the literature on mollusk biomechanics is presented. Mechanisms and mathematical formulations for the constitutive model of the mechanical behavior of the material and the equations required for its implementation are pointed out, which are based on the Generalized Hooke's Law.

For this work, two groups are analyzed. The first corresponds to organisms from *Río Huasco* (75 individuals) in the Atacama region, Chile. The second corresponds to samples from the Quintay coast (125 individuals) in the region of Valparaíso, Chile. The first study analyzes the hypothesis about the mechanical symmetry of the shells, that is, to prove that both shells of the bivalve have a similar mechanical behavior by performing uniaxial compression tests (leaving aside the tensile tests due to the impossibility of producing test samples that meet the requirements of this test). To verify this hypothesis, test samples are obtained from the shell material, which are subjected to a uniaxial compression test-oriented on three axes: thickness direction (d_e), which is orthogonal to the surface of the shell, radial direction (d_r), parallel to the grooves of the shell, and tangential direction (d_t), orthogonal to them. In addition, the shell is divided into three zones along the length of the shell in order to observe differences in material deposition. Therefore, 270 uniaxial compression tests are performed. The second study evaluates the biomechanical material and structural behavior in the growth of the *P. purpuratus*. The study considers 125 specimens raised in their natural state during three months in order to obtain the age of each one according to their length. After this, five samples are selected to perform numerical simulation from their structure, considering them from smaller to bigger size.

The shells are tested in uniaxial compression (material characterization) and flexo-compression (structural characterization) to characterize their mechanical properties in order to help understand their defensive capacity against predators and, in the future, to complement current estimates of losses in the Chilean aquaculture industry, which is directly dependent on the ecosystem status of commercial species.

From these results, the validation of the constitutive model is proposed using numerical simulations by **FEM**. The geometry used in the simulation is obtained by Micro-CT technology, being a great help to create a method capable of giving the simulation the values corresponding to the orthotropic mechanical behavior of the material in the respective simulations.

Keywords: biomechanics, biomaterials, biological materials, finite elements, growth, climate change, acidification.

Dedicado a mi madre, amigos y mentores

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a mi madre Paola Moya por apoyarme desde que tengo memoria y antes de eso. Ha sido la única persona que siempre ha estado ahí para mi, en las buenas y en las malas, cuando faltaba dinero o necesitaba consejo y consuelo.

La segunda persona a la que quiero agradecer es a mi tío José Zenteno, el cual me brindó su apoyo cuando veía imposible ingresar a la universidad. Debido a la falta de dinero no tenía los recursos para un preuniversitario, por esto tuve que estudiar y buscar material por mi cuenta para rendir la prueba de selección. En ese momento fue cuando mi tío, en ese entonces profesor de física del Liceo Manuel Barros Borgoño, se ofreció a ayudarme con clases de física. Sin él, quizás las ganas de ingresar a la universidad se hubieran esfumado. Le agradezco de todo corazón haber dispuesto su tiempo en mí.

Quisiera agradecer a dos profesores en particular, al profesor Manuel Salinas, quien fue el primero en brindarme la posibilidad de ser ayudante en su ramo *Sistemas Térmicos*. Gracias él comencé a ver la carrera con otros ojos, comprendiendo la importancia de llevar mis estudios teóricos a un ámbito más práctico y tangible. También quisiera agradecer a mi profesor guía, Dr. Claudio García, una de las personas más importantes para mí este último tiempo. Siempre voy a recordar cuando en su oficina me dijo que existía la posibilidad de realizar mi Magíster, nunca olvidaré lo feliz que estuve esos días cuando sentí que de verdad creía en mí. Gracias a su confianza he hecho cosas que nunca imaginé, como dedicarme a tiempo completo a la ciencia o presentar en congresos internacionales. Le estaré siempre muy agradecido, muchas gracias por la confianza que ha depositado en mí.

Quisiera dar agradecimientos en general a todas las personas que me han apoyado, a todos los que conforman el Laboratorio de Biomecánica y Biomaterial, Andrés Utrera, Matías Pacheco y Aldo Abarca por ser unos grandes amigos, quienes siempre están para unas risas o conversaciones interesantes, les agradezco que nunca me haya faltado su apoyo. También agradecer a mis amigos de la vida, Marcos Marivil y Matias Valenzuela, sin el apoyo de ambos quizás no hubiera seguido adelante con lo que hago.

Finalmente, quisiera agradecer a mi novia Macarena Meichsner y su familia por el apoyo este año. Sin ti todo este trabajo no hubiera sido posible, gracias por ser un pilar fundamental en mi día a día.

A todas las personas que me han brindando su apoyo, a los que olvidé nombrar

¡Les agradezco infinitamente!

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes generales	1
1.2	Motivación	2
1.3	Alcances y limitaciones	2
1.4	Objetivos	3
1.4.1	Objetivo general	3
1.4.2	Objetivos específicos	3
1.5	Contenido de la Tesis	3
2	Estado del arte	4
2.1	Introducción	4
2.2	Modelo de estudio	4
2.3	Depredación	6
2.4	Efectos del Cambio climático	8
2.4.1	Producción industrial acuícola en Chile y como ha sido afectada por el cambio climático	10
2.5	Material y estructura de la valva	11
2.6	Comportamiento mecánico del material nacarado	13
2.6.1	Propiedades macro y micro-mecánicas	15
2.6.1.1	Probetas adaptadas al tamaño de conchas	17
2.6.2	Propiedades nano-mecánicas	18
2.7	Simulaciones numéricas	19
2.8	Caracterización mecánica de la concha del <i>P. purpuratus</i>	21
3	Metodología experimental	24
3.1	Introducción	24
3.2	Simetría mecánica de valvas	24
3.2.1	Metodología para la selección de muestras	25
3.3	Crecimiento	26
3.3.1	Metodología de selección de muestras	27
3.4	Ensayos mecánicos	30
3.4.1	Ensayo de compresión uniaxial	30
3.4.2	Ensayo de flexo-compresión	32
3.4.3	Análisis estadístico	34
3.4.4	Microscopía electrónica de barrido	35
4	Resultados de los ensayos mecánicos	36
4.1	Introducción	36
4.2	Ánalisis de resultados de ensayos mecánicos	36

4.2.1	Análisis de la superficie de fractura en el ensayo de compresión uniaxial	36
4.2.2	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	39
4.2.3	Análisis de la superficie de fractura en el ensayo de flexo-compresión	40
4.2.4	Conclusiones de resultados de los ensayos mecánicos en la superficie de fractura	42
4.3	Análisis de la simetría de valvas	42
4.3.1	Metodología de análisis comparativo para simetría de valvas	42
4.3.2	Resultados del módulo elástico (E) para la simetría de valvas	44
4.3.3	Resultados del esfuerzo máximo (σ_{max}) para la simetría de valvas	46
4.3.4	Resultados de la deformación máxima (ϵ_{max}) para la simetría de valvas	48
4.3.5	Conclusiones de resultados de simetría de valvas	50
4.4	Análisis del crecimiento de valvas	50
4.4.1	Curva de crecimiento	51
4.4.2	Metodología de análisis comparativo para crecimiento de valvas	52
4.4.3	Resultados del módulo elástico (E) para el crecimiento de valvas	53
4.4.4	Resultados del esfuerzo máximo (σ_{max}) para el crecimiento de valvas	54
4.4.5	Resultados de la deformación máxima (ϵ_{max}) en crecimiento de valvas	55
4.4.6	Resultados de la rigidez (K) para el crecimiento de valvas	56
4.4.7	Resultados de la fuerza máxima (F_{max}) para el crecimiento de valvas	57
4.4.8	Resultados del desplazamiento máximo (d_{max}) para el crecimiento de valvas	58
4.4.9	Conclusiones de resultados del crecimiento de valvas	59
4.5	Conclusiones generales de los experimentos	60
5	Simulaciones numéricas	61
5.1	Introducción	61
5.2	Selección de valvas	62
5.3	Geometría de valvas	63
5.3.1	Microtomografía computarizada	63
5.3.2	Mallado de las valvas	64
5.3.2.1	Calidad de malla	66
5.3.2.2	Calidad de los elementos del tamaño 1	67
5.3.2.3	Calidad de los elementos del tamaño 2	68
5.3.2.4	Calidad de los elementos del tamaño 3	69
5.3.2.5	Calidad de los elementos del tamaño 4	70
5.3.2.6	Calidad de los elementos del tamaño 5	71
5.3.2.7	Ánalisis del mallado	72
5.3.3	Direcciones de la ortotropía	73
5.3.3.1	Baricentros de los elementos tetraédricos	74
5.3.3.2	Superficie parametrizada	74
5.3.3.3	Proyección ortogonal a la superficie paramétrica	76
5.3.3.4	Dirección espesor	78
5.3.3.5	Dirección tangencial	79
5.3.3.6	Dirección radial	81
5.3.3.7	Ánalisis de direcciones ortótropas	82
5.4	Elementos de contacto	83
5.5	Procedimiento de la simulación	84
5.5.1	Fase 1: Acomodamiento	85

5.5.2	Fase 2: Confinamiento	86
5.5.3	Fase 3: Compresión	86
5.5.4	Consideraciones de la simulación y propiedades mecánicas	86
5.5.5	Algoritmo de simulación	87
5.6	Resultados de simulación	88
5.6.1	Resultados de simulación: Tamaño 1	90
5.6.1.1	Tamaño 1: simulación con roce. Campo de esfuerzos principales $\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$	91
5.6.1.2	Tamaño 1: simulación con roce. Dirección de esfuerzos principales	93
5.6.2	Resultados de simulación: Tamaño 2	97
5.6.2.1	Tamaño 2: simulación con roce. Campo de esfuerzos principales $\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$	98
5.6.2.2	Tamaño 2: simulación con roce. Dirección de esfuerzos principales	100
5.6.3	Resultados de simulación: Tamaño 3	103
5.6.3.1	Tamaño 3: simulación con roce. Campo de esfuerzos principales $\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$	104
5.6.3.2	Tamaño 3: simulación con roce. Dirección de esfuerzos principales	106
5.6.4	Resultados de simulación: Tamaño 4	110
5.6.4.1	Tamaño 4: simulación con roce. Campo de esfuerzos principales $\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$	111
5.6.4.2	Tamaño 4: simulación con roce. Dirección de esfuerzos principales	113
5.6.5	Resultados de simulación: Tamaño 5	117
5.6.5.1	Tamaño 5: simulación con roce. Campo de esfuerzos principales $\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$	118
5.6.5.2	Tamaño 5: simulación con roce. Dirección de esfuerzos principales	120
5.6.6	Análisis de las simulaciones	124
6	Conclusiones y perspectivas	129
6.1	Conclusiones generales	129
6.2	Principales aportes	131
6.3	Líneas futuras de investigación	132
BIBLIOGRAFÍA		134
APÉNDICES		
A Curvas de ensayos mecánicos		2
A.1	Compresión uniaxial	2
A.2	Flexo-compresión	4
B Complementos de simulaciones numéricas		6
B.1	Superficies parametrizadas	6
B.2	Valor del penalizador lineal para efectos de contacto	9
B.3	Variación de curva de simulación con y sin roce con distintos coeficientes	10

Índice de Tablas

Tabla 3.1	Categoría de muestras según condición geométrica	25
Tabla 3.2	Valor de la media y error estándar muestral (SEM) del largo y variación de largo en 3 meses, altura, ancho y espesor de la valva derecha	27
Tabla 3.3	Cantidad de muestras restantes en cada jaula al finalizar los 3 meses de crecimiento	29
Tabla 4.1	Resultado ANCOVA para Módulo elástico (<i>E</i>). El Grosor (<i>G</i>) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (<i>T</i>); en las valvas (<i>V</i>) izquierda y derecha; en 3 zonas de las valvas (<i>Z</i>) y en 3 dirección de compresión (<i>d</i>). <i>GL</i> = Grados de Libertad; <i>SC</i> = Suma de cuadrados; <i>F</i> = Razón <i>F</i> ; <i>p</i> = <i>p</i> -valor	44
Tabla 4.2	Resultado ANCOVA para Esfuerzo máximo (σ_{max}). El Grosor (<i>G</i>) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (<i>T</i>); en las valvas (<i>V</i>) izquierda y derecha; en 3 zonas de las valvas (<i>Z</i>) y en 3 dirección de compresión (<i>d</i>). <i>GL</i> = Grados de Libertad; <i>SC</i> = Suma de cuadrados; <i>F</i> = Razón <i>F</i> ; <i>p</i> = <i>p</i> -valor	46
Tabla 4.3	Resultado ANCOVA para Deformación máxima (ε_{max}). El Grosor (<i>G</i>) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (<i>T</i>); en las valvas (<i>V</i>) izquierda y derecha; en 3 zonas de las valvas (<i>Z</i>) y en 3 dirección de compresión (<i>d</i>). <i>GL</i> = Grados de Libertad; <i>SC</i> = Suma de cuadrados; <i>F</i> = Razón <i>F</i> ; <i>p</i> = <i>p</i> -valor	48
Tabla 4.4	Edad de los individuos de <i>P. purpuratus</i> a partir del largo de sus conchas	52
Tabla 4.5	Resultado ANCOVA para Módulo elástico (<i>E</i>). El Grosor (<i>G</i>) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (<i>T</i>) y 3 direcciones de compresión (<i>d</i>). <i>GL</i> = Grados de Libertad; <i>SC</i> = Suma de cuadrados; <i>F</i> = Razón <i>F</i> ; <i>p</i> = <i>p</i> -valor	53
Tabla 4.6	Resultado ANCOVA para Esfuerzo máximo (σ_{max}). El Grosor (<i>G</i>) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (<i>T</i>) y 3 direcciones de compresión (<i>d</i>). <i>GL</i> = Grados de Libertad; <i>SC</i> = Suma de cuadrados; <i>F</i> = Razón <i>F</i> ; <i>p</i> = <i>p</i> -valor	54
Tabla 4.7	Resultado ANCOVA para Deformación máxima (ε_{max}). El Grosor (<i>G</i>) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (<i>T</i>) y 3 direcciones de compresión (<i>d</i>). <i>GL</i> = Grados de Libertad; <i>SC</i> = Suma de cuadrados; <i>F</i> = Razón <i>F</i> ; <i>p</i> = <i>p</i> -valor	55
Tabla 4.8	Resultado ANCOVA para la Rígidez (<i>K</i>). El Grosor (<i>G</i>) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (<i>T</i>). <i>GL</i> = Grados de Libertad; <i>SC</i> = Suma de cuadrados; <i>F</i> = Razón <i>F</i> ; <i>p</i> = <i>p</i> -valor	56

Tabla 4.9	Resultado ANCOVA para la Fuerza máxima (F_{max}). El Grosor (G) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (T). GL = Grados de Libertad; SC = Suma de cuadrados; F = Razón F; p = <i>p</i> -valor	57
Tabla 4.10	Resultado ANCOVA para el Desplazamiento máximo (d_{max}). El Grosor (G) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (T). GL = Grados de Libertad; SC = Suma de cuadrados; F = Razón F; p = <i>p</i> -valor	58
Tabla 5.1	Individuos seleccionados: Grupo de tamaño perteneciente, largo inicial previo a los 3 meses del experimento, y largo, altura, ancho y espesor al finalizar el experimento	62
Tabla 5.2	Módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}) de las 5 valvas derechas a partir del ensayo de compresión uniaxial	88
Tabla 5.3	Fuerza de rotura (F_{max}), desplazamiento de rotura (d_{max}), bondad y error de ajuste de curva experimental y simulación con y sin roce. Tamaño 1	90
Tabla 5.4	M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}). Tamaño 1	92
Tabla 5.5	Fuerza de rotura (F_{max}), desplazamiento de rotura (d_{max}), bondad y error de ajuste de curva experimental y simulación con y sin roce. Tamaño 2	97
Tabla 5.6	M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}). Tamaño 2	99
Tabla 5.7	Fuerza de rotura (F_{max}), desplazamiento de rotura (d_{max}), bondad y error de ajuste de curva experimental y simulación con y sin roce. Tamaño 3	103
Tabla 5.8	M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}). Tamaño 3	105
Tabla 5.9	Fuerza de rotura (F_{max}), desplazamiento de rotura (d_{max}), bondad y error de ajuste de curva experimental y simulación con y sin roce. Tamaño 4	110
Tabla 5.10	M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}). Tamaño 4	112
Tabla 5.11	Fuerza de rotura (F_{max}), desplazamiento de rotura (d_{max}), bondad y error de ajuste de curva experimental y simulación con y sin roce. Tamaño 5	117
Tabla 5.12	M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}). Tamaño 5	119
Tabla 5.13	Dirección del esfuerzo principal σ_1 , σ_2 y σ_3 a partir del efecto de compresión (zona convexa) y tracción (zona cóncava) en la zona de contacto con el punzón	124

Índice de Figuras

Figura 2.1	Valva izquierda y derecha del individuo característico de la especie de estudio, <i>Perumytilus purpuratus</i> (<i>Lamarck 1819</i>)	5
Figura 2.2	Huellas de depredación en <i>Perumytilus purpuratus</i> producida por <i>Acanthina monodon</i> . Ambas barras de escala: 1 [cm]. Imagen extraída de [35].	6
Figura 2.3	Micrografías electrónicas de barrido de dos rádulas. (25) <i>Paziella pazi</i> . Barra de escala = 25 μm . (28) <i>Nucella lamellosa</i> . Barra de escala = 100 μm . Imágenes extraídas de [38]. Ambas barras de escala: 1 [cm]	6
Figura 2.4	Microfotografía del órgano accesorio (ABO) de <i>Thais haemastoma</i> (Linnaeus, 1758). (1) Visión general del órgano insertado en el tejido pedio, (2) epitelio glandular, (3) epitelio glandular vacuolizado, (4) pared del conducto excretor. (C: cavidad; Cl: cilios; ED: epitelio del conducto; ERC: epitelio de revestimiento de la cavidad; ERG: epitelio de revestimiento de la glándula; FMC: fibras musculares circulares; FMC: fibras musculares circulares; FMP: fibras musculares perpendiculares; L: linfocitos; M: mucocitos; N: núcleo de células epiteliales; TC: tejido conectivo subyacente). Escamas: fig. 1, 150 μm ; figs. 2-4, 30 μm . Imagen de [39].	7
Figura 2.5	Cangrejo triturador de conchas <i>Acanthocyclus hassleri</i> en el acto de atacar con su garra trituradora derecha a un pequeño individuo del mejillón <i>Perumytilus purpuratus</i> en la zona intermareal rocosa media de Antofagasta, en el norte de Chile. Imagen extraída de [40].	8
Figura 2.6	Esquema explicativo del afloramiento costero. Imagen extraída de [62] y traducida.	10
Figura 2.7	Dimensiones de un individuo de <i>P. purpuratus</i> en su etapa madura.	11
Figura 2.8	Ilustraciones de microestructuras en conchas de bivalvos en vista normal a la superficie de la misma, observadas por Taylor et al.. Imagen extraída de [11]	13
Figura 2.9	Esquema de la anatomía de la concha del molusco bivalvo. Está compuesta por el periostraco, una capa prismática y nácar. El espacio interlaminar lleno de líquido se encuentra entre la zona mineralizada y la parte blanda del organismo. El esquema también ilustra las sucesivas amplificaciones de la estructura de nácar. La superficie de crecimiento, en la que se observan los patrones, se encuentra entre el manto y el exterior de la concha. Imagen extraída de [75]	14
Figura 2.10	Esfuerzo de compresión y tracción últimos del nácar bajo diferentes direcciones de carga. Imagen extraída de [83]	15

Figura 2.11	(a) Esfuerzo a tracción y (b) esfuerzo cortante contra deformación para el nácar del abulón rojo y un esquema de las estructuras de las baldosas laminares que muestra los modos de deformación asociados. La ondulación de la tablilla genera resistencia al deslizamiento, acompañada de una expansión lateral (flechas verticales). Imagen extraída de [16, 17]	16
Figura 2.12	Direcciones principales y orientaciones de las probetas para el ensayo de tracción uniaxial. Imagen extraída de [99]	17
Figura 2.13	Probetas a 90°, 45°, y 0°, respectivamente, cortadas en cortadora láser a bajas potencias. Imagen extraída de [99]	17
Figura 2.14	Nanoindentación del abulón rojo. (a) Nácar seco, presencia de apilamientos desiguales en los bordes, (b) Nácar húmedo, bordes obtusos relacionados a la plastificación del nácar húmedo debido a su módulo relativamente bajo, (c) Nácar tratado térmicamente, el material parece compactado y similar a lo que sucede con la arena cuando se calienta y los granos comienzan a fusionarse, (d) Aragonita monolítica, el apilamiento desigual indica anisotropía. Imagen extraída de [18].	18
Figura 2.15	Geometrías utilizadas para ensayo de tracción uniaxial. Imagen extraída de [99]	19
Figura 2.16	Resultados obtenidos para análisis numérico. Imagen extraída de [103] . .	20
Figura 3.1	Zonas en que fue dividida la valva derecha, zona 1 (Z_1), zona 2 (Z_2) y zona 3 (Z_3). <i>An</i> : Ancho, <i>L</i> : Largo, <i>Al</i> : Alto, <i>E</i> : Espesor. Se presenta porcentaje del largo de cada zona	26
Figura 3.2	25 muestras por cada uno de los 5 tamaños	27
Figura 3.3	Montaje de jaula en terreno. a) Individuo de <i>Perumytilus purpuratus</i> etiquetado con una marca de abeja, b) Jaula utilizada en el experimento de Ramajo et al. en 2016. Imagen extraída de [19]	28
Figura 3.4	5 Muestras por tamaño agrupadas para cada una de las 5 jaulas	28
Figura 3.5	Montaje de jaula en terreno, en la zona costera del centro de investigación marina de Quintay, región de Valparaíso	29
Figura 3.6	Geometría nacarada de la probeta y las direcciones de la ortotropía del material: Dirección Espesor (d_e), dirección radial (d_r) y dirección tangencial.	31
Figura 3.7	Concha digitalizada por Micro-CT del <i>Perumytilus purpuratus</i> . A: Dirección Espesor (d_e), B: Dirección Radial (d_r), C: Dirección Tangencial (d_t), D: Estrías radiales.	31
Figura 3.8	Montaje del ensayo de compresión uniaxial. a) Instron 3342 con montaje de compresión, b) Probeta orientada según direcciones ortótropas. A: Celda de carga, B: Placa superior móvil, C: Placa inferior fija, D: Probeta montada	32
Figura 3.9	Ensayo de flexo-compresión. a) Montaje en Instron 3342, b) Montaje de valva. A: Celda de carga, B: Punzón, C: Base de ensayo, D: Valva montada, E: Punzón, F: Punto más alto de la valva en contacto con punzón, G: Pared de confinamiento	33
Figura 3.10	Base utilizada en el ensayo de flexo-compresión.	33
Figura 3.11	Procedimiento de obtención de imágenes MEB. (a) Microscopio electrónico de barrido (MEB), modelo ZEISS EVO 10 SEM, (b) Disposición de las muestras para la superficie de la capa de nácar (SN), (c) Disposición de las muestras para la sección transversal de la capa de nácar (CN).	35

Figura 4.1	Característica de fallo de la muestra al final del ensayo de compresión uniaxial en las direcciones de espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (a) Muestra fracturada por fallo con fractura aparentemente tortuosa al final del ensayo en la dirección del espesor (d_e), (b) Muestra fracturada por delaminación al final del ensayo de compresión en la dirección radial (d_r), (c) Muestra fracturada por delaminación al final de la prueba de compresión en la dirección tangencial (d_t), (d) Fotografía de la muestra fracturada y diagrama de su microestructura después de aplicar la compresión en la dirección radial (d_r) y tangencial (d_t)	37
Figura 4.2	Modos de fallo para ensayos de compresión uniaxial en probetas de mampostería. (a) Partición en columnas, (b) partición en capas de una o varias filas de mampostería. Figura adaptada de la investigación de Lishak et al. [127].	38
Figura 4.3	Imágenes MEB de la muestra al final del ensayo de compresión en las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t). (a) Imagen en la superficie de la capa nacarada (SN), (b) imagen en la sección transversal de la capa (CN), (c) muestra con delaminación incompleta, cuyo origen de fractura tiene una separación de "ladrillos" de aragonito de δ , (d) trayectoria de fractura tortuosa (TFT). F: dirección de la fuerza aplicada.	39
Figura 4.4	Valvas menores al tamaño 5 después de ser sometidas al ensayo de flexo-compresión	40
Figura 4.5	Valvas del tamaño 5 después de ser sometidas al ensayo de flexo-compresión	41
Figura 4.6	Desprendimiento del material de la valva después de ser sometido al ensayo de flexo-compresión	41
Figura 4.7	Desviación estándar (SD) de la curva esfuerzo-deformación de los cinco grupos (con una representación de la valva derecha de cada grupo) para las valvas izquierda y derecha en sus respectivas direcciones ortótropas del material; espesor (d_{th}), radial (d_l) y tangencial (d_{tr}). (a) grupo 1, (b) grupo 2, (c) grupo 3, (d) grupo 4, (e) grupo 5.	43
Figura 4.8	Modulo elástico (E) evaluado sobre la valva derecha de <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t)	45
Figura 4.9	Modulo elástico (E) evaluado sobre la valva izquierda de <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (*): valores extremos de la distribución	45
Figura 4.10	Esfuerzo máximo (σ_{max}) evaluado sobre la valva derecha de <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (*): valores extremos de la distribución	47
Figura 4.11	Esfuerzo máximo (σ_{max}) evaluado sobre la valva izquierda de <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (*): valores extremos de la distribución	47
Figura 4.12	Deformación máxima (ϵ_{max}) evaluada sobre la valva derecha de <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (*): valores extremos de la distribución	49

Figura 4.13	Deformación máxima (ε_{max}) evaluada sobre la valva izquierda de <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (*): valores extremos de la distribución	49
Figura 4.14	M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}) del <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t)	50
Figura 4.15	Tasa de crecimientos inversa en un tiempo de 3 meses para un determinado largo de valva	51
Figura 4.16	Curva representativa del tiempo de vida del <i>Perumytilus purpuratus</i> a partir del largo de su concha	52
Figura 4.17	Módulo elástico (E) evaluado sobre la valva derecha de <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (*): valores extremos de la distribución	53
Figura 4.18	Esfuerzo máximo (σ_{max}) evaluado sobre la valva derecha de <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t)	54
Figura 4.19	Deformación máxima (ε_{max}) evaluada sobre la valva derecha de <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t)	55
Figura 4.20	Rigidez (K) evaluada sobre la valva izquierda de <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5). (*): valores extremos de la distribución	56
Figura 4.21	Fuerza máxima (F_{max}) evaluada sobre la valva izquierda de <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5). (*): valores extremos de la distribución	57
Figura 4.22	Desplazamiento máximo (d_{max}) evaluado sobre la valva izquierda de <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5). (*): valores extremos de la distribución	58
Figura 4.23	M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}) del <i>P. purpuratus</i> para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t)	59
Figura 4.24	Pérdida de material debido a aparente falla por delaminación. Software <i>ParaView</i>	60
 Figura 5.1	Valvas seleccionadas	62
Figura 5.2	Micro-CT utilizado en la digitalización de las valvas	63
Figura 5.3	Reconstrucción de la concha mediante el software <i>InVesalius</i> [135]	63
Figura 5.4	Malla procesada en <i>GiD</i>	65
Figura 5.5	Malla procesada en <i>GiD</i> de la vista superior e inferior	65
Figura 5.6	Ángulo diédrico θ perteneciente al tetraedro que conforma la malla	66
Figura 5.7	Comparativa de malla y modelo real del tamaño 1	67
Figura 5.8	Histograma acumulativo para criterios de calidad del tamaño 1: Ángulo diédrico mínimo y criterio de forma	67
Figura 5.9	Comparativa de malla y modelo real del tamaño 2	68
Figura 5.10	Histograma acumulativo para criterios de calidad del tamaño 2: Ángulo diédrico mínimo y criterio de forma	68

Figura 5.11	Comparativa de malla y modelo real del tamaño 3	69
Figura 5.12	Histograma acumulativo para criterios de calidad del tamaño 3: Ángulo diédrico mínimo y criterio de forma	69
Figura 5.13	Comparativa de malla y modelo real del tamaño 4	70
Figura 5.14	Histograma acumulativo para criterios de calidad del tamaño 4: Ángulo diédrico mínimo y criterio de forma	70
Figura 5.15	Comparativa de malla y modelo real del tamaño 5	71
Figura 5.16	Histograma acumulativo para criterios de calidad del tamaño 5: Ángulo diédrico mínimo y criterio de forma	71
Figura 5.17	Valva de tamaño 4 con elementos de ángulo diédrico menor a 30° resaltados en color rojo	72
Figura 5.18	Valvas seleccionadas y sus respectivas mallas para simulación numérica	73
Figura 5.19	Baricentro p del tetraedro que conforma la malla de las valvas	74
Figura 5.20	Ajuste de la superficie paramétrica a los baricentros de la valva de tamaño 4	76
Figura 5.21	Demostración gráfica del método GSA. Imagen inspirada de [145]	77
Figura 5.22	Dirección espesor \hat{d}_e calculado mediante GSA, con sólo 50.000 versores representados para no saturar la imagen	78
Figura 5.23	Zona de origen de las estrías dentro de la zona circular	79
Figura 5.24	Zona de origen de las estrías o	79
Figura 5.25	Cálculo de la dirección tangencial de los elementos de la malla	80
Figura 5.26	Dirección tangencial \hat{d}_t calculado mediante GSA.	80
Figura 5.27	Dirección radial \hat{d}_r calculado mediante GSA.	81
Figura 5.28	Dirección radial y tangencial con origen y rotación respecto al origen o	81
Figura 5.29	Contraste entre la dirección del espesor (\hat{d}_e), dirección radial (\hat{d}_r) y dirección tangencial (\hat{d}_t)	82
Figura 5.30	Disposición de elementos creados para la simulación. A: Valva sometida a simulación de flexo-compresión, B: Elemento de contacto de la valva en la zona de la frontera, la cual contacta con base y paredes, C: Elemento de contacto de la valva en su zona más alta, la cual contacta con el punzón, D: Punzón, malla que realiza contacto con la zona más alta de la valva, E: Base y paredes, malla que realiza contacto con la zona de la frontera de la valva	83
Figura 5.31	Simulación de flexo-compresión con sus respectivas restricciones de movimiento	84
Figura 5.32	Proceso de acomodamiento de la valva	85
Figura 5.33	Algoritmo de simulación de flexo-compresión	87
Figura 5.34	Simulación flexo-compresión para el tamaño 1	90
Figura 5.35	Campo del esfuerzo principal 1 (σ_1). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 1	91
Figura 5.36	Campo del esfuerzo principal 2 (σ_2). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 1	91
Figura 5.37	Campo del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 1	92
Figura 5.38	Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona B. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 1	93
Figura 5.39	Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona A a tracción. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 1	93

Figura 5.40	Concentración de esfuerzos: σ_1 , σ_2 y σ_3 para zona A a compresión. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 1	94
Figura 5.41	Concentración de esfuerzos: dirección espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) para zona A a compresión. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 1	95
Figura 5.42	Dirección del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software <i>ParaView</i> . Tamaño 1	96
Figura 5.43	Simulación flexo-compresión para el tamaño 2	97
Figura 5.44	Campo del esfuerzo principal 1 (σ_1). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 2	98
Figura 5.45	Campo del esfuerzo principal 2 (σ_2). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 2	98
Figura 5.46	Campo del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 2	99
Figura 5.47	Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona A a tracción. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 2	100
Figura 5.48	Concentración de esfuerzos: σ_1 , σ_2 y σ_3 para zona A a compresión. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 2	100
Figura 5.49	Concentración de esfuerzos: dirección espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) para zona A a compresión. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 2	101
Figura 5.50	Dirección del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software <i>ParaView</i> . Tamaño 2	102
Figura 5.51	Simulación flexo-compresión para el tamaño 3	103
Figura 5.52	Campo del esfuerzo principal 1 (σ_1). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 3	104
Figura 5.53	Campo del esfuerzo principal 2 (σ_2). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 3	104
Figura 5.54	Campo del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 3	105
Figura 5.55	Concentración de esfuerzos: σ_1 para zona B. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 3	106
Figura 5.56	Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona C. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 3	106
Figura 5.57	Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona A a tracción. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 3	107
Figura 5.58	Concentración de esfuerzos: σ_1 , σ_2 y σ_3 para zona A a compresión. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 3	107
Figura 5.59	Concentración de esfuerzos: dirección espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) para zona A a compresión. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 3	108
Figura 5.60	Dirección del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software <i>ParaView</i> . Tamaño 3	109
Figura 5.61	Simulación flexo-compresión para el tamaño 4	110
Figura 5.62	Campo del esfuerzo principal 1 (σ_1). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 4	111
Figura 5.63	Campo del esfuerzo principal 2 (σ_2). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 4	111
Figura 5.64	Campo del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 4	112
Figura 5.65	Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_3 para zona C. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 4	113
Figura 5.66	Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona A a tracción. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 4	113

Figura 5.67	Concentración de esfuerzos: σ_1 , σ_2 y σ_3 para zona A a compresión. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 4	114
Figura 5.68	Concentración de esfuerzos: dirección espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) para zona A a compresión. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 4	115
Figura 5.69	Dirección del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software <i>ParaView</i> . Tamaño 4	116
Figura 5.70	Simulación flexo-compresión para el tamaño 5	117
Figura 5.71	Campo del esfuerzo principal 1 (σ_1). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 5	118
Figura 5.72	Campo del esfuerzo principal 2 (σ_2). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 5	118
Figura 5.73	Campo del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software <i>ParaView</i> . Valva real en el centro. Tamaño 5	119
Figura 5.74	Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_3 para zona B. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 5	120
Figura 5.75	Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona A a tracción. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 5	120
Figura 5.76	Concentración de esfuerzos: σ_1 , σ_2 y σ_3 para zona A a compresión. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 5	121
Figura 5.77	Concentración de esfuerzos: dirección espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) para zona A a compresión. Software <i>ParaView</i> . Tamaño 5	122
Figura 5.78	Dirección del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software <i>ParaView</i> . Tamaño 5	123
Figura 5.79	Curvatura del largo y ancho de la valva. Software <i>ParaView</i>	125
Figura 5.80	Simplificación de la curvatura del ancho de la valva mediante una viga curva	125
Figura 5.81	Simplificación de la curvatura del largo de la valva mediante una viga curva	126
Figura 5.82	Esfuerzos de compresión y tracción en el espesor	126
Figura 5.83	Efecto de compresión y tracción en el espesor	127
Figura 5.84	Pérdida de material debido a la concentración de esfuerzo en la zona A en las direcciones radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t). Software <i>ParaView</i>	128
 Figura A.1	 Curva de compresión uniaxial sin modificar (otorgada por la máquina de ensayos universales Instron 334) y con modificaciones. Esta última con el fin de obtener las propiedades mecánicas del material desechando datos innecesarios	 2
Figura A.2	Curva de esfuerzo contra deformación ingenieríl del ensayo de compresión uniaxial junto a su ajuste lineal	3
Figura A.3	Curva de flexo-compresión sin modificar (otorgada por la máquina de ensayos universales Instron 334) y con modificaciones. Esta última con el fin de obtener las propiedades estructurales del material desechando datos innecesarios	4
Figura A.4	Curva de fuerza contra desplazamiento del ensayo de flexo-compresión junto a su ajuste lineal	5
 Figura B.1	 Ajuste de la superficie paramétrica a los baricentros de la valva de tamaño 1	 6
Figura B.2	Ajuste de la superficie paramétrica a los baricentros de la valva de tamaño 2	7
Figura B.3	Ajuste de la superficie paramétrica a los baricentros de la valva de tamaño 3	7
Figura B.4	Ajuste de la superficie paramétrica a los baricentros de la valva de tamaño 4	8
Figura B.5	Ajuste de la superficie paramétrica a los baricentros de la valva de tamaño 5	8
Figura B.6	Curvas con distintos valores de penalizador lineal para el tamaño 1	9

Figura B.7	Curvas con y sin roce en el punzón para el tamaño 2	10
Figura B.8	Curvas con y sin roce en el punzón para el tamaño 1	11

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes generales

El estudio se realiza con el fin de incorporar al análisis de la ciencia de materiales al mejillón bivalvo *Perumytilus purpuratus*, un ingeniero ecosistémico de tipo autogénico [1, 2, 3, 4], aunque en este trabajo se utilizará el nombre de agente ecosistémico, dado que en la práctica un molusco no tiene facultades para ser denominado ingeniero. Se distribuye desde el Ecuador hasta el estrecho de Magallanes en la costa del Pacífico; y también se extiende a lo largo de la costa del Atlántico hasta Argentina. Los agentes ecosistémicos modulan la disponibilidad de recursos para otras especies y pueden cambiar la estructura física, la complejidad y la heterogeneidad del medio ambiente [3]. El *P. purpuratus* produce efectos significativos en la biodiversidad costera, siendo ecológicamente relevante por formar densas poblaciones en matrices tridimensionales que constituyen un micro hábitat para una amplia variedad de organismos, reduciendo la desecación durante las mareas bajas y aumenta la protección contra los efectos mecánicos de las olas [5], cuya estratificación de la matriz a partir de la sedimentación en las capas del micro hábitat presenta una influencia relevante en la comunidad macrofaunística¹ asociada [1, 4]. Este molusco permite observar perturbaciones en el ecosistema generados por el cambio climático, siendo un candidato ideal para estimar las tendencias de la producción acuícola industrial de Chile, la que depende directamente del estado ecosistémico [6]. Estas variaciones se producen debido a que el incremento en las emisiones de dióxido de carbono, derivadas por la quema de combustibles fósiles [7], aceleran el cambio climático [8] (cerca de un tercio de las emisiones generadas por la actividad humana depositadas en la superficie oceánica [9]), alterando el pH y la concentración de carbono del agua.

La concha de los bivalvos, al igual que los huesos de mamíferos [10], se forma a partir de una microestructura compuesta de un 5 % de materia orgánica (principalmente proteínas), la cual es recubierta por un 95 % de materia inorgánica. Estas microestructuras pueden ser de 8 tipos. El *P. purpuratus* se compone de aragonita [11, 12].

¹Comunidad de todas las especies de animales macroscópicos marinos que habitan e interactúan entre ellas en un lugar y tiempo determinado

1.2. Motivación

El presente trabajo se realiza con el fin de aportar y comprender sobre la estructura y función de los exoesqueletos de carbonato de calcio de moluscos Chilenos mediante el estudio de sus propiedades biomecánicas, los cuales se estima estarán bajo los efectos del cambio climático en el futuro, entorpeciendo la acuicultura del país [6, 13]. Se seleccionó como modelo de estudio el molusco bivalvo que habita el intermareal rocoso de la costa de Chile *Perumytilus purpuratus*. Se evaluaron sus propiedades mecánicas a partir de una caracterización experimental y numérica, por medio de **MEF**, de ejemplares de distintos tamaños o edades colectadas del medio natural, y así observar el comportamiento del material de su concha y la resistencia mecánica estructural, utilizando dicha información para comprobar que el modelo constitutivo teórico utilizado sea el adecuado para este material mediante simulación numérica. En el laboratorio se realizaron dos ensayos para la caracterización biomecánica del material y su estructura: el primero es un ensayo de compresión uniaxial, del cual se obtuvieron las propiedades elásticas del material en tres orientaciones perpendiculares entre sí. El segundo experimento consistió en someter a la concha a un estado de flexo-compresión, simulando la rotura de la valva debido a la depredación por durófagos². El estudio de las valvas de estos moluscos es crítica, de ello depende su protección y sobrevivencia ante desafíos del ambiente y los depredadores. Se proyecta que el cambio climático en el océano (e.g. acidificación) debilitará estas estructuras de carbonato de calcio [15], por lo que los resultados de esta investigación podrían representar una línea base sobre la cual profundizar el estudio del impacto de la acidificación del océano sobre la disolución del carbonato de calcio de las valvas y, en consecuencia, la pérdida de sus propiedades estructurales y funcionalidad.

1.3. Alcances y limitaciones

Existe una variedad de fenómenos asociados a la respuesta mecánica de los bivalvos, por ejemplo, viscoelasticidad en su microestructura con un comportamiento anisótropo bajo solicitudes fuera del rango quasi estático [16, 17, 18]. Las limitaciones experimentales son:

- Se cultivan los mejillones para el proceso de crecimiento durante 3 meses en la bahía de Quintay. Se utilizan protocolos probados anteriormente [19, 20, 21].
- Los ensayos experimentales se realizan en estado seco, sin composición orgánica.
- Se asume que el material es homogéneo con un modelo constitutivo elástico lineal anisótropo, del tipo ortotropo. Las simulaciones realizan bajo este supuesto.
- Los efectos biomecánicos asociados a este estudio en particular no son necesariamente aplicables a otros bivalvos.

²Durofagia es el comportamiento alimenticio de los animales que consumen organismos con caparazón duro o exoesqueleto, como corales, moluscos con caparazón o cangrejos [14].

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Realizar la modelación y caracterización biomecánica de la concha del *Perumytilus purpuratus* en estado seco bajo condiciones naturales de crecimiento mediante ensayos experimentales y simulaciones numéricas.

1.4.2. Objetivos específicos

- Conocer y comprender la morfología y comportamiento biológico básico de bivalvos marinos, en particular la especie de estudio *P. purpuratus*.
- Conocer y comprender elementos básicos de la mecánica de medios continuos y modelos constitutivos de materiales elásticos anisótropos, en particular el modelo ortotrópico.
- Estudiar experimentalmente y caracterizar mecánicamente, a través de un modelo lineal elástico anisótropo del tipo ortotrópico, el comportamiento mecánico del material de la concha del *P. purpuratus* en su crecimiento mediante ensayos de compresión uniaxial y flexo-compresión.
- Validar numéricamente el modelo constitutivo adoptado mediante simulaciones realizadas por **MEF**.

1.5. Contenido de la Tesis

En los siguientes capítulos se desarrollan los objetivos de este trabajo. El contenido de la presente tesis se estructura describiendo el marco teórico, el estado del arte del problema biológico, estudios experimentales, implementación numérica y conclusiones generales.

El **capítulo 2**, titulado *Estado del Arte*, se realizan observaciones sobre la importancia del *Perumytilus purpuratus* en Chile, contextualizando su morfología, cómo ha sido afectado por el cambio climático y las consideraciones que se tomarán respecto a los ensayos por realizar. Por último, se expone un pequeño resumen de simulaciones numéricas a través de **MEF** en valvas de diferentes moluscos. El **capítulo 3**, titulado *Metodología experimental*, se establece el procedimiento de los ensayos experimentales. El **capítulo 4**, titulado *Resultado de los ensayos mecánicos*, exhibe el desarrollo, resultados y análisis estadístico de los ensayos experimentales. En el **capítulo 5**, titulado *Simulaciones numéricas*, se presenta la metodología aplicada para el análisis numérico a partir de **MEF** del ensayo de flexo-compresión, además del ajuste de las direcciones ortotropas del material. Finalmente, el **capítulo 6**, titulado *Conclusiones y perspectivas*, se resumen las principales conclusiones, aportes del trabajo y líneas futuras de investigación.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Introducción

En el presente capítulo se realiza una revisión del estado del arte sobre estudios morfológicos de la especie bivalva *Perumytilus purpuratus*, definiendo aspectos biológicos, efectos de depredación, tipo de material y estructura de su valva, interacción con el ambiente y los efectos que el cambio climático (calentamiento global y acidificación) produce sobre el mejillón. De este último tema se presentan estudios de cambio climático en bivalvos y cómo la biodiversidad circundante se ve afectada por el deterioro calcáreo del *P. purpuratus*, siendo así considerado un agente ecosistémico y bioindicador [1, 2, 3, 4].

La sección siguiente corresponde al estado de la industria acuícola chilena y cómo ha sido afectada por el cambio climático. Acá se hace énfasis a la capacidad de bioindicador y modulador de ecosistemas del individuo de estudio *P. purpuratus*.

Posteriormente, se presentan trabajos relacionados al comportamiento mecánico de la concha de los bivalvos, en específico, las conformadas por una microestructura nacarada, la misma que se presenta en el *P. purpuratus*. Luego, se detalla una pequeña revisión a las simulaciones numéricas basadas en el método de elementos finitos (**MEF**) para estructuras de diversas conchas de moluscos.

Finalmente, considerando aspectos morfológicos y mecánicos, se define el modelo constitutivo representativo del comportamiento mecánico de la concha del *P. purpuratus*.

2.2. Modelo de estudio

Perumytilus purpuratus (**Lamarck 1819**), conocido como chorito maico (Chile) o choro (Perú) [22], es una especie común que habita en la franja intermareal rocosa de las costas expuestas al oleaje [23]. Esta especie se distribuye desde el Ecuador hasta el Estrecho de Magallanes en el Océano Pacífico, continuando por la costa atlántica argentina [24]. *P. purpuratus* es una especie, con evidencia de hermafroditismo [25], capaz de formar densas poblaciones

en matrices tridimensionales en la franja media del intermareal, siendo competidor dominante del sustrato primario en la zona central rocosa de Chile [5, 26]. Además, esta matriz tridimensional lo convierte en un importante agente de sistemas ecológicos (bioagente) [1, 2, 3, 4] dado el incremento en la riqueza de especies que se han registrado en sus matrices, las que comprenden hasta 92 taxones¹ de invertebrados distintos [1], por lo que la pérdida de esta especie podría resultar en una disminución de la biodiversidad local [27]. Esta especie es de tamaño generalmente pequeño y de talla máxima controlada de 41 [mm] [28], alcanzando su madurez sexual al primer año de vida, cuando miden entre 8 y 10 [mm] [29]. La composición del *P. purpuratus* es de un 5 % de materia orgánica y un 95 % de materia inorgánica en forma de aragonita (forma cristalina del carbonato de calcio) [11, 12]. La morfología externa de la concha (fig. 2.1) es representada por el periostraco (capa más externa de la concha compuesta exclusivamente de materia orgánica), umbo (parte de la concha formada en las etapas juveniles del molusco), estrías radiales (líneas que se originan en el umbo y se dirigen a los bordes de la concha), líneas de crecimiento (líneas perpendiculares a las estrías) y el margen de crecimiento (borde de la concha).

Las conchas de los moluscos crecen a través de un proceso de acreción (crecimiento acreativo) que se produce en el margen de la concha (fig. 2.1) mediante un órgano llamado manto, que es una fina membrana elástica que recubre la superficie interior de la concha. En cada incremento, el manto se extiende ligeramente más allá del borde calcificado de la concha, mientras se adhiere a la concha rígida. El manto segregá proteínas de la matriz que, mediante la biominerización y la calcificación, se endurecen en una nueva capa de caparazón [30]. De esta forma se añade nuevo material en el margen.

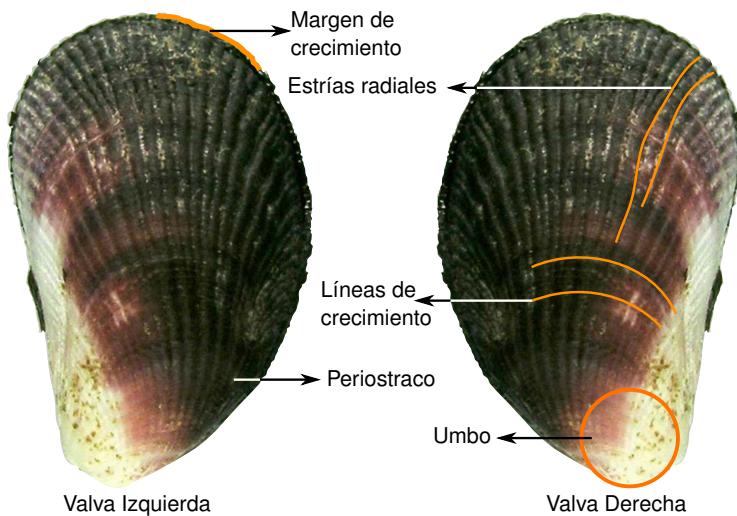


Figura 2.1. Valva izquierda y derecha del individuo característico de la especie de estudio, *Perumytilus purpuratus* (**Lamarck 1819**)

¹En Biología, un taxón es un grupo de organismos emparentados, que en una clasificación dada han sido agrupados, asignándole al grupo un nombre en latín, una descripción, y un "tipo", de forma que el taxón de una especie es un espécimen o ejemplar concreto.

2.3. Depredación

Existe una amplia variedad de especies depredadoras del *P. purpuratus*, como las clases de gasterópodos² (*Acanthina monodon* y *Concholepas concholepas*) y equinodermos³ (*Heliaster helianthus*) [34, 35, 36, 37]. En 2001 Gordillo observó las marcas de depredación del gasterópodo *Acanthina monodon* [35], detallando dos estrategias: Una es utilizar su espina para abrir las valvas, produciendo roturas irregulares en el margen de crecimiento de la concha (fig. 2.2a). Otro método practicado por el gasterópodo es no utilizar su espina, en lugar de ella se valdría de la rádula (fig. 2.3) y de un órgano accesorio llamado ABO (fig. 2.4) para producir perforaciones cilíndricas bien definidas y de posición variable (fig. 2.2b).



(a) Marcas irregulares en el margen de crecimiento. Imagen amplificada.
(b) Perforaciones en la superficie de la concha provocadas por depredación.

Figura 2.2. Huellas de depredación en *Perumytilus purpuratus* producida por *Acanthina monodon*. Ambas barras de escala: 1 [cm]. Imagen extraída de [35].

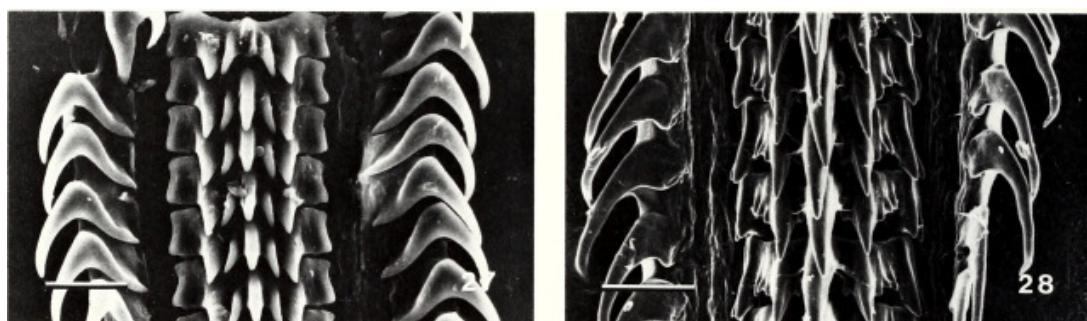


Figura 2.3. Micrografías electrónicas de barrido de dos rádulas. (25) *Paziella pazi*. Barra de escala = 25 μm . (28) *Nucella lamellosa*. Barra de escala = 100 μm . Imágenes extraídas de [38]. Ambas barras de escala: 1 [cm]

²Son una gran clase taxonómica incluida en el filo de los moluscos, siendo uno de los más diversos. Presentan áreacefálica (cabeza), un piemusculoso ventral y una concha dorsal (que puede reducirse o hasta perderse en los gasterópodos más evolucionados); además, cuando son larvas, sufren el fenómeno de torsión, que es el giro de la masa visceral sobre el pie y la cabeza [31].

³Filo que contiene unas 7000 especies actuales, que incluyen lirios de mar, estrellas plumosas, estrellas de mar, ofiuras, erizos de mar, dólares de arena y pepinos de mar. Se conocen otras 13000 especies, aproximadamente, en un registro fósil que se remonta al menos a los principios del Cámbrico [32, 33].

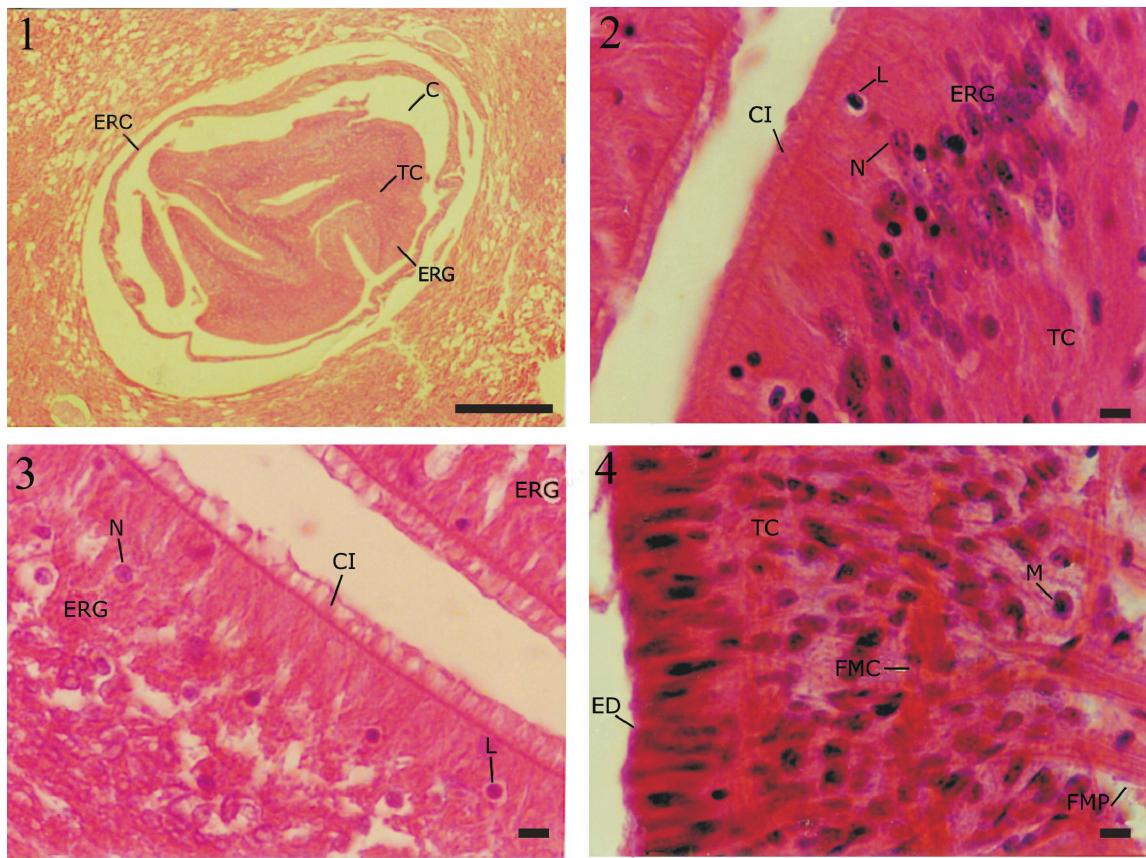


Figura 2.4. Microfotografía del órgano accesorio (ABO) de *Thais haemastoma* (Linnaeus, 1758). (1) Visión general del órgano insertado en el tejido pedio, (2) epitelio glandular, (3) epitelio glandular vacuolizado, (4) pared del conducto excretor. (C, cavidad; CI, cilios; ED, epitelio del conducto; ERC, epitelio de revestimiento de la cavidad; ERG, epitelio de revestimiento de la glándula; FMC, fibras musculares circulares FMC: fibras musculares circulares; FMP: fibras musculares perpendiculares; L: linfocitos; M: mucocitos; N: núcleo de células epiteliales; TC: tejido conectivo subyacente). Escamas: fig. 1, 150 μ m; figs. 2-4, 30 μ m. Imagen de [39].

En 2020 por parte de [Manríquez et al.](#) se publicó un estudio de cómo la depredación por parte del cangrejo triturador de conchas *Acanthocyclus hassleri* se ve afectada en condiciones de cambio climático [\[40\]](#). Observando que en condiciones de acidificación oceánica y calentamiento (pCO_2 de 500 y 1400 [μ atm] con temperaturas de 15 y 20 °C) aumentó significativamente su alimentación de estos moluscos y su consumo de oxígeno, pero perdiendo fuerza en el acto de triturar (fig. [2.5](#)). Por lo tanto, al reducir el rendimiento de la alimentación del cangrejo, estos factores estresantes podrían limitar su papel en la generación de micro hábitat para otras especies rocosas intermareales que habitan en los mejillones.

Esto indica que, como veremos a continuación (sección [2.4](#)), el *P. purpuratus* sufre consecuencias negativas por los efectos del cambio climático, incluyendo sus depredadores, los cuales pueden reducir drásticamente la población del mejillón y su micro hábitat.

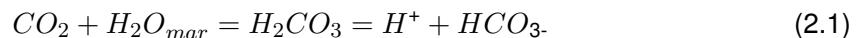


Figura 2.5. Cangrejo triturador de conchas *Acanthocyclus hassleri* en el acto de atacar con su garra trituradora derecha a un pequeño individuo del mejillón *Perumytilus purpurarus* en la zona intermareal rocosa media de Antofagasta, en el norte de Chile. Imagen extraída de [40].

2.4. Efectos del Cambio climático

Existen estudios recientes que han demostrado que el aumento del CO_2 atmosférico presenta consecuencias profundas y diversas en el medio oceánico, entre ellas el aumento de las temperaturas, el incremento de la estratificación oceánica, la desoxigenación y la alteración de la circulación oceánica y las descargas de agua dulce [41, 42, 43, 44]. Cuando el CO_2 se disuelve en el agua de mar se produce una disminución del pH del océano y de la concentración de iones de carbonato CO_3^{2-} , un proceso conocido colectivamente como acidificación oceánica; esto se ha convertido en un tema de gran preocupación pública y científica [44, 45]

El CO_2 atmosférico al disolverse en el agua de mar produce una reacción que forma Ácido carbónico (H_2CO_3), el cual libera iones de Hidrógeno (H^+) (disminuyendo el pH) e iones bicarbonato (HCO_3^-).



Además, el dióxido de carbono (CO_2), el agua de mar y los iones de carbonato (CO_3^{2-}) disponibles en el medio ambiente producen iones de bicarbonato, la forma más abundante de carbono en el océano, pero la menos utilizada por los organismos debido a su alto requerimiento energético [46].



A estas reacciones químicas se le conoce como acidificación de los océanos, que induce

una disminución en el pH oceánico [47]. Se proyecta que el pH de la superficie global del agua de mar disminuya de 0,2 a 0,4 unidades para finales de este siglo según el IPCC [48].

La investigación de Saavedra et al. [15] evidencia la influencia del efecto *up-welling* y el agua dulce en el molusco *P. purpuratus*. En este estudio se midieron respuestas alimenticias y metabólicas, las cuales están en directa relación a la presión parcial del dióxido de carbono (pCO_2), efectos potenciados por la acidificación de los oceanos, preponderante en las alteraciones observadas en los procesos bioquímicos y fisiológicos de los organismos marinos [49, 50], como el crecimiento, la ingestión, la calcificación, la reproducción, el comportamiento, la expresión de genes y las interacciones biológicas [51]. También se indica cómo la exposición prolongada a un alto pCO_2 en mejillones puede reducir significativamente el crecimiento en bivalvos, afectando negativamente la deposición de calcio y peso total [52, 53, 54].

Otro estudio realizado por Ramajo et al. [55, 19] determinó que en las zonas influenciadas por ríos (menor pH, mayor pCO_2 y una baja saturación de aragonita Ω_{arag}), el *P. purpuratus* exhibe una tasa metabólica más alta, lo que le permite mantener o potenciar sus tasas de calcificación y crecimiento, aumentando las tasas de ingestión significativamente en condiciones de bajo pH, independientemente de la cantidad de alimento disponible [56], es decir, por sí solo la presión parcial de CO_2 afecta negativamente a la tasa de crecimiento, pero este en un ambiente natural y diverso se ve afectado por variables de campo (pH, saturación de aragonita Ω_{arag} , temperatura, salinidad, alcalinidad) que pueden disminuir el efecto negativo de pCO_2 o potenciarlo, dependiendo además de la homogeneidad fisiológica y plasticidad fenotípica para su potencial de adaptación local, las cuales pueden ser un mecanismo importante que permite a los mejillones hacer frente a los desafíos de los escenarios de acidificación oceánica proyectados [15].

Se considera además al *P. purpuratus* un bioindicador natural, debido a su sensibilidad ante los efectos ya mencionados, además de ser un posible indicador de metales pesados en su ambiente [57], los cuales afectan la biodiversidad asentada en sus matrices tridimensionales debido a la toxicidad provocada en ellos.

Otro efecto importante observado por Oyarzún et al. en 2018 fue el de las fluctuaciones de temperatura soportadas por el mejillón, presentando asincronías en su ciclo reproductivo.

También se han estudiado los efectos de depredación cuando la presión parcial del dióxido de carbono (pCO_2) se asemeja a los valores esperados en los escenarios del cambio climático, en particular de la acidificación del océano, con valores de 1000 [μatm] de CO_2 [59], en la cual el *P. purpuratus* no era capaz de identificar al depredador *Concholepas concholepas*, observando un comportamiento sinuoso en un laberinto *Y-maze* y siendo devorado por este.

Por lo tanto, es importante recalcar que el *P. purpuratus* es un agente ecosistémico autógeno [1, 2, 3, 4], capaz de modificar el ambiente a través de su propia biomasa, viva o muerta [60]. También es considerado un bioindicador, es decir, se ve afectado directamente por el entorno. Tomando estas consideraciones se recalca la importancia de este mejillón en los océanos, en particular las costas chilenas.

2.4.1. Producción industrial acuícola en Chile y como ha sido afectada por el cambio climático

La industria acuícola, tanto en la pesca artesanal como industrial, tiene directa dependencia del estado del ecosistema donde las especies a comercializar habiten, siendo mayoritariamente el océano. En la actualidad, la mayor producción de larvas de moluscos se produce en criaderos artificiales u *onshore* (en tierra), teniendo más control sobre las variables atmosféricas en su crecimiento, tal como el alimento y temperatura del agua. Una vez las larvas alcanzan su tamaño de juveniles son transferidas al océano, donde crecen hasta los períodos de cosecha [61]. Sin embargo, las concentraciones de carbono en el agua de mar son dependientes de variables naturales, especialmente cuando se trata de zonas de surgencia costera, teniendo un impacto negativo en la acuicultura [6].

De forma resumida, el fenómeno oceanográfico de la surgencia, o afloramiento costero, consiste en el movimiento vertical de masas de agua, de niveles profundos hacia la superficie. Las aguas profundas del océano son ricas en nutrientes, incluyendo nitrato y fosfato, producto de la descomposición de materia orgánica hundida desde las aguas superficiales. Estos nutrientes, a niveles superficiales, son utilizados por el fitoplancton, junto a dióxido de carbono disuelto y energía solar para producir compuestos orgánicos a través de la fotosíntesis. Así, las zonas de afloramiento costero se transforman en lugares de altos niveles de producción en comparación a otras áreas del océano [62]. En la figura 2.6 se muestra un esquema explicativo sobre el fenómeno del afloramiento costero.

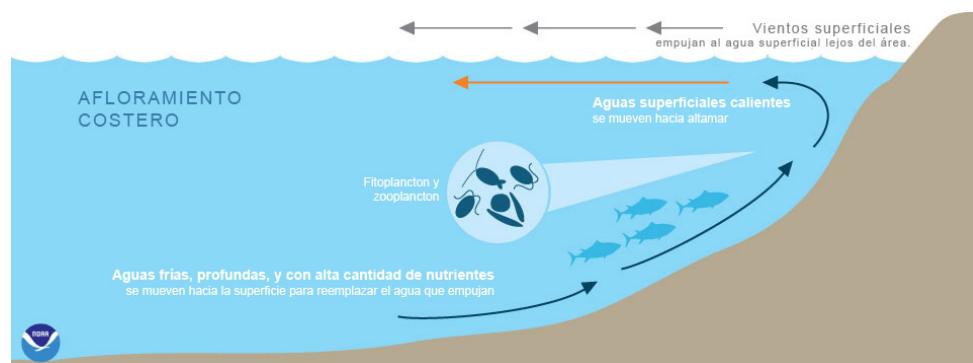


Figura 2.6. Esquema explicativo del afloramiento costero. Imagen extraída de [62] y traducida.

Durante la última década, la pesca de moluscos en Chile está en el rango de los 300000 a 550000 toneladas, periodo en el cual la producción de moluscos nativos presenta una tendencia negativa, teniendo que en el año 2014 sólo se cosechó el 20 % de los últimos 10 años [63, 61]. Esta fuerte reducción de la producción de moluscos nativos afecta directamente la sustentabilidad socioeconómica del norte de Chile, encareciendo la necesidad de entender las causas del problema para así encontrar formas de adaptarse a éste.

Se sabe que cerca de un tercio de las emisiones de CO₂ producido por actividades humanas son depositados en la superficie oceánica [9], alterando el pH del agua y su concentración

de carbono. Se prevé que para finales del presente siglo, el agua de mar se volverá más ácida, cambiando su pH del presente 8,0 a 7,8, hasta alcanzar los 7,3 en el año 2200 [64, 65]. Estos cambios inducen impactos considerables a la biota marina, donde el proceso de calcificación resulta particularmente afectado [66, 67, 55]. Así es como las distintas especies marinas han producido mecanismos de defensa contra la acidificación de los océanos, donde en el caso de los bivalvos van desde cambios en su mineralogía de la concha por falta de alimento [55], hasta reducciones de tamaño, espesor de concha, y peso [61].

Estudios recientes indican que las zonas de afloramiento costero chilenas (30° S) presentan pH bajos (ácido) y bajas concentraciones de carbono disuelto [68], condiciones similares a la progresiva acificación de otras costas en la zona Este Americana, como lo son Oregon y California en Estados Unidos [69, 70]. Debido a los patrones ambientales observados, se sugiere un posible impacto que afecte la sustentabilidad de la industria acuicola del norte chileno [61]. Por lo tanto, contar con un bioindicador, como lo es el *P. purpuratus*, resulta fundamental para detectar cambios en las propiedades oceánicas (observando las variables biológicas y ahora mecánicas de la concha del molusco) y así actuar con rapidez ante las adversidades que se produzcan en la costa chilena.

2.5. Material y estructura de la valva

Se denomina valva al exoesqueleto calcáreo que presentan la mayoría de los moluscos, a excepción de ciertas clases como la *Cephalopoda* en la cual se constituye su endoesqueleto. Corresponde a una secreción del manto, el cual es un tejido epitelial que confina la cavidad visceral de los moluscos, de la cual intervienen componentes orgánicos e inorgánicos [71].

P. purpuratus presenta un estado larval presuntamente planctotrófica⁴ de 14 días, y alcanza la madurez sexual durante el primer año de vida, cuando su concha alcanza aproximadamente los 8 a 10 [mm] de largo, aunque es común encontrarlos con un largo de 30 [mm], incluso se ha reportado individuos de hasta 40 [mm] [22].



Figura 2.7. Dimensiones de un individuo de *P. purpuratus* en su etapa madura.

⁴Estrategia de alimentación utilizada por las larvas de muchos organismos en la cual no buscan su alimento en el medio externo sino que utilizan las reservas de vitelos (de su saco vitelino) que llevan consigo desde su nacimiento. En la mayoría de estos casos, el estadio larval es de corta duración y la transformación a la etapa juvenil es rápida para poder empezar a alimentarse.

La concha de los bivalvos, al igual que los huesos de mamíferos [10], está constituida por un material compuesto de dos partes, siendo una orgánica proteica que recubre a la otra formada por cristales de carbonato de calcio (C_aCO_3) en estado de calcita o aragonita. Para los huesos humanos y las conchas de moluscos, estas partes son denominadas periostraco y ostraco respectivamente [72]. La composición del *P. purpuratus* es de un 5 % de materia orgánica (la cual se degrada después del secado del material) y un 95 % de materia inorgánica en forma de aragonita (forma cristalina del carbonato de calcio) mediante una microestructura nacarada (fig. 2.8c). Existen otro tipo de configuraciones o combinaciones de microestructuras para los bivalvos y, según lo descrito por Taylor et al. [11], pueden ser ocho tipos (fig. 2.8):

- **Estructura prismática simple:** Consiste en columnas de cristales, de sección poligonal, de hasta los 200 [μm] de largo y 9-80 [μm] de ancho, de espesor variable. Los cristales están alineados normal al exterior de la valva y se encuentran usualmente en el exterior de la misma. Ver la figura 2.8a.
- **Estructura prismática compuesta:** Consiste en una estructura compuesta de cristales muy pequeños de 2 [μm] de largo y hasta los 10 [μm] de ancho alineados de forma radial desde un eje central. Esta estructura sólo se encuentra en las capas externas de la valva. Ver la figura 2.8b.
- **Estructura en celdas nacarada:** Consiste en una estructura formada por cristales en forma de tableta de 2-10 [μm] de largo y 0,4-3 [μm] de espesor, alineados en celdas formando una sección tipo pared de ladrillos. Esta configuración es usualmente encontrada en la zona media e internas de la concha. Referencia en la figura 2.8c.
- **Estructura lenticular nacarada:** Comparte las mismas características que la estructura en celdas nacarada, sólo que esta se alinea en columnas en vez de celdas. Ver la figura 2.8d.
- **Estructura foliada:** En esta estructura, los cristales son en forma de listón, de 2-4 [μm] de ancho, 0,2-0,5 [μm] de espesor, y de hasta 20 [μm] de largo. Están ordenadas en contacto de lado a lado en celdas irregulares, alineadas todas con la misma orientación hacia los margenes de la valva. Esta configuración se forma paralela a la superficie interna de la concha. Ver la figura 2.8e.
- **Estructura laminar cruzada:** Consiste en una estructura con cristales tipo listón, de 5 [μm] de ancho y hasta de 20 [μm] de largo, en arreglos laminares de tamaño variable. Los cristales en contacto de una lámina a otra son dispuestos en dirección opuesta entre sí. Ver la figura 2.8f.
- **Estructura laminar cruzada compleja:** Estructura similar a la lamelar cruzada, pero con crecimiento interno de bloques de cristales arreglados en cuatro direcciones principales. Ver la figura 2.8g.

- **Estructura homogénea:** Consiste en una estructura formada por cristales pequeños tipo granular de hasta 5 [μm] de diámetro con una forma no definida. Referencia en la figura 2.8h.

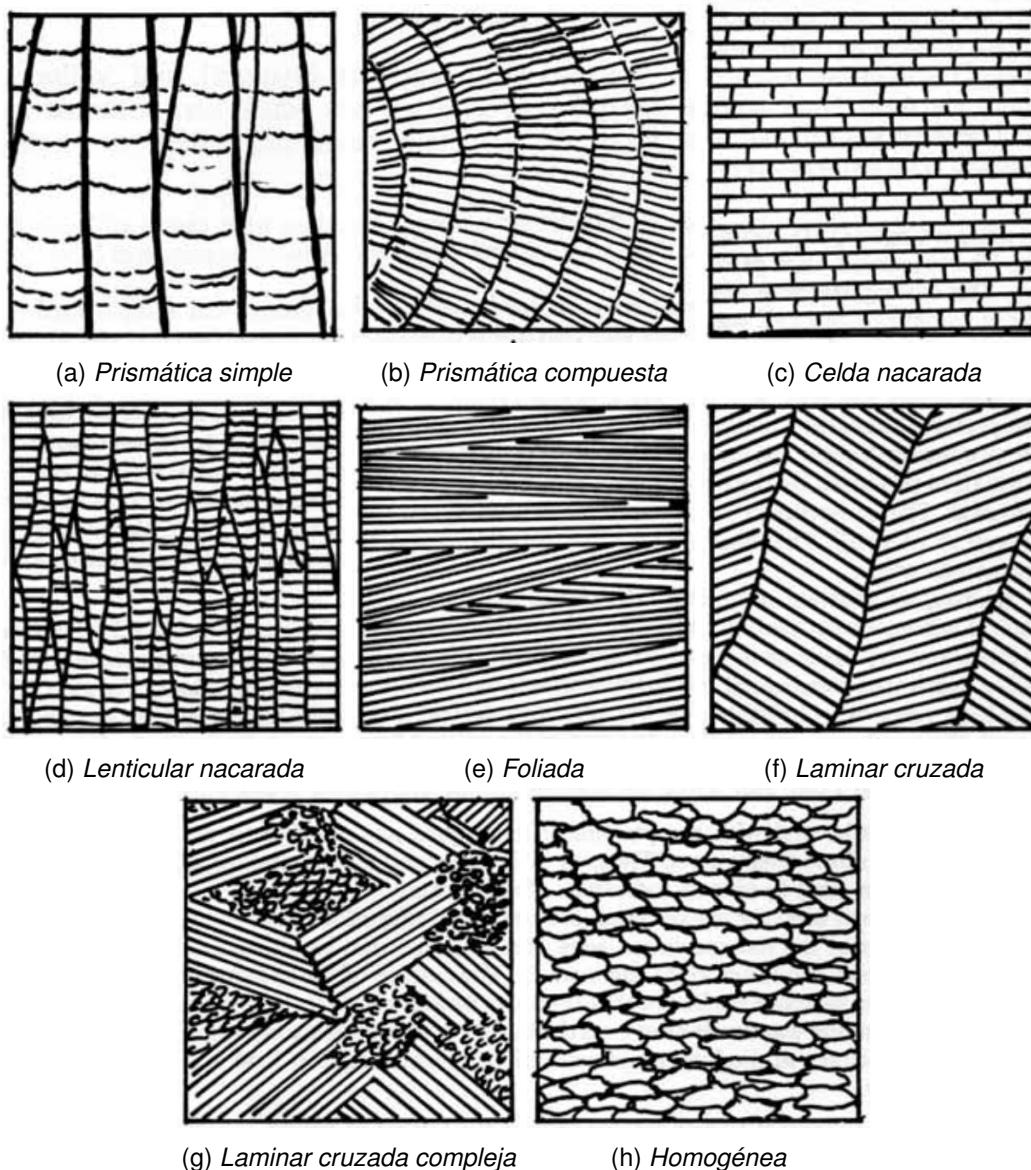


Figura 2.8. Ilustraciones de microestructuras en conchas de bivalvos en vista normal a la superficie de la misma, observadas por Taylor et al.. Imagen extraída de [11]

2.6. Comportamiento mecánico del material nacarado

Las conchas duras de los moluscos se han adaptado a sus condiciones de vida para proteger sus cuerpos blandos de la agresión externa de los depredadores, las rocas o los desechos

desplazados por las corrientes u olas [73]. La anatomía general de los moluscos bivalvos se puede apreciar en la figura 2.9. Generalmente consiste en una estructura de tres capas [74, 75, 76]: la capa más externa es el periostraco (compuesto de proteína endurecida), la capa media es prismática (compuesta de calcita columnar), y la capa interna es de nácar (también conocida como madreperla, compuesta de aragonita, que es una forma cristalográfica de C_aCO_3 y materiales orgánicos). Las capas exteriores de la concha son típicamente quebradizas y duras, lo que puede proporcionar resistencia a la penetración por impacto externo, mientras que el nácar proporciona un endurecimiento por disipación de la energía mecánica, debido a su capacidad de sufrir grandes deformaciones plásticas [77, 78, 79, 80].

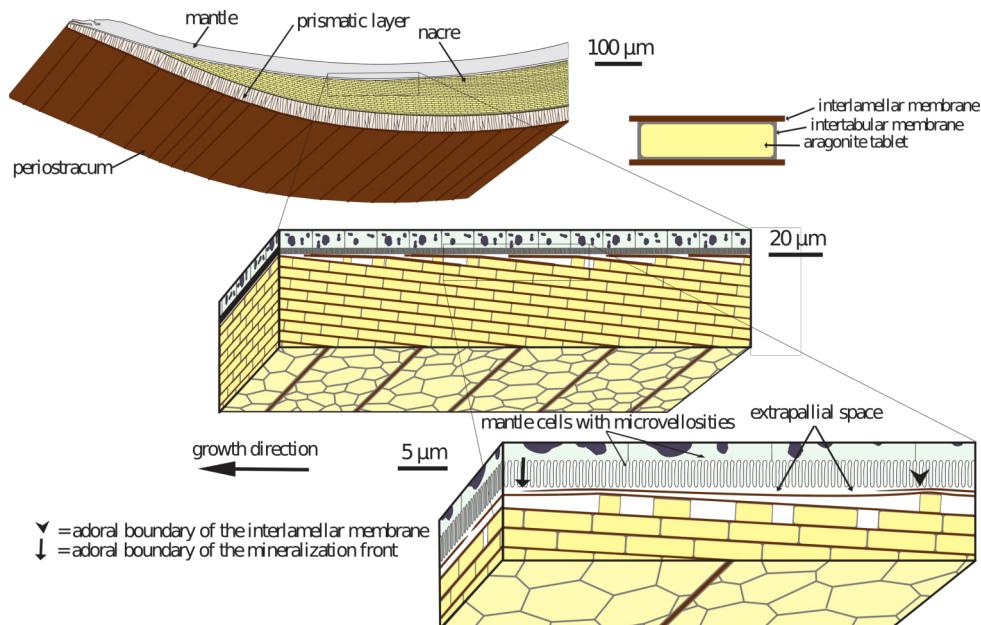


Figura 2.9. Esquema de la anatomía de la concha del molusco bivalvo. Está compuesta por el periostraco, una capa prismática y nácar. El espacio interlaminar lleno de líquido se encuentra entre la zona mineralizada y la parte blanda del organismo. El esquema también ilustra las sucesivas amplificaciones de la estructura de nácar. La superficie de crecimiento, en la que se observan los patrones, se encuentra entre el manto y el exterior de la concha. Imagen extraída de [75]

El nácar consiste en una estructura similar a la de los ladrillos y el mortero, en la que se pegan tabletas duras de aragonita con materiales orgánicos blandos para formar baldosas [81, 82, 83] presentes en gasterópodos y bivalvos (como el individuo de estudio *P. purpuratus*). El nácar posee una compleja arquitectura jerárquica que abarca múltiples escalas de longitud desde la nanoscala hasta la macroescala [73, 80, 84, 85, 81, 86], característica importante de estos materiales cuyas estructuras internas se encuentran de manera similar en los huesos, dientes y otros tejidos [87].

Se han propuesto varios modelos que intentan explicar por qué el nácar alcanza su alta resistencia a partir de su microestructura de "tabletas minerales incrustadas en una fina matriz

orgánica" [77, 88, 89]. Aunque la matriz orgánica del nácar es sólo el 5 % de la composición de la concha, juega un papel importante en el control espacial y químico de la nucleación y el crecimiento de los cristales, la microestructura y la tenacidad [90, 84]. Por ejemplo, la tenacidad a la fractura del nácar es de $3,3\text{-}9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, que es entre tres y nueve veces la del aragonito monolítico⁵ (alrededor de $1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) [91, 92, 93, 94, 95]. El nácar ha sido investigado durante varios decenios debido a sus excepcionales propiedades mecánicas, su capacidad de autoensamblado y su compleja estructura jerárquica⁶, que abarca escalas de longitudes desde el nanómetro hasta el milímetro [78, 80, 97, 84, 98].

Se han realizado diversos estudios de las propiedades mecánicas del material nacarado en dos escalas principales, por ejemplo, en la macro y microescala: tracción, compresión, cizallamiento y su comportamiento tribológico. En nanoescala: nanoindentación y el mapeo de módulos mediante el uso del microscopio de fuerza atómica (por sus siglas en inglés **AFM**). Ahora se considerarán los de mayor alcance e información útil para este estudio en particular.

2.6.1. Propiedades macro y micro-mecánicas

En la figura 2.10 se resumen los esfuerzos a compresión y tracción últimos del nácar con respecto a 2 direcciones de carga observados por Meyers et al. del material nacarado del gasterópodo abulón [83]. La figura 2.10 muestra el estado de tensiones máximo a compresión (flechas rojas) y tracción (flechas azules) soportado por la probeta según la dirección de la carga aplicada, perpendicular y paralela a la superficie de la concha.

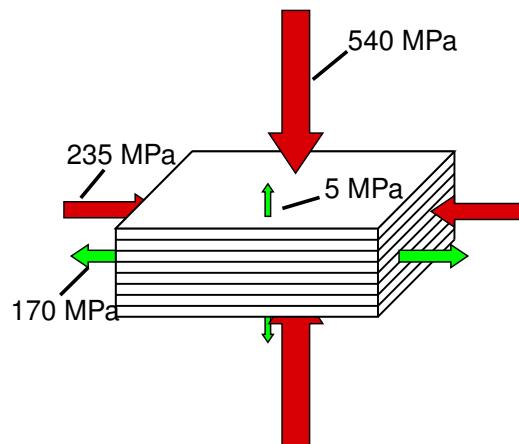


Figura 2.10. Esfuerzo de compresión y tracción últimos del nácar bajo diferentes direcciones de carga. Imagen extraída de [83]

⁵Material de aragonito sin microestructura definida, sólo compuesta por un único bloque. Se diferencia de la estructura nacarada (también compuesta de aragonito), la cual se compone de diversas tablillas o "ladrillos" de escala microscópica.

⁶Microestructura que abarca múltiples escalas de longitud, desde la nanoescala hasta la macroescala. Incluye arquitecturas columnares y láminas, puentes minerales, nanogranos poligonales, nanoasperezas, microdilatación plástica, desviación de grietas y ladrillos entrelazados, que presentan una notable combinación de rigidez, bajo peso y resistencia [96].

Se han realizado estudios que muestran el comportamiento a tracción y corte del nácar tanto en condiciones secas (condiciones ambientales) como hidratadas (empapado en agua) del material, mostrando cierta ductilidad en la macroescala [16, 17]. Las curvas de esfuerzo-deformación se muestran en la figura 2.11; el comportamiento del nácar seco es similar al de la aragonita pura y falla de forma frágil. La humedad en las muestras demostraron que la materia orgánica ($\approx 5\%$) es esencial para el nácar. Después de una respuesta lineal elástica inicial, similar a la del nácar seco, el nácar hidratado continúa su deformación en la zona plástica al alcanzar un esfuerzo de 70 [MPa]. Francis et al. concluyeron que el agua afecta las propiedades mecánicas, concretamente al esfuerzo a tracción y cizalle, reduciendo ambos módulos. Por lo tanto, la resistencia se ve aumentada por el agua, debido a que la matriz orgánica plastifica antes de la falla presentada en el nácar seco [91], el cual representa un material frágil y sin capacidad de deformación plástica. Se observa entonces que el material seco presenta un comportamiento lineal y frágil, es decir, capaz de fracturarse con poca deformación sin conseguir llegar a la plastificación.

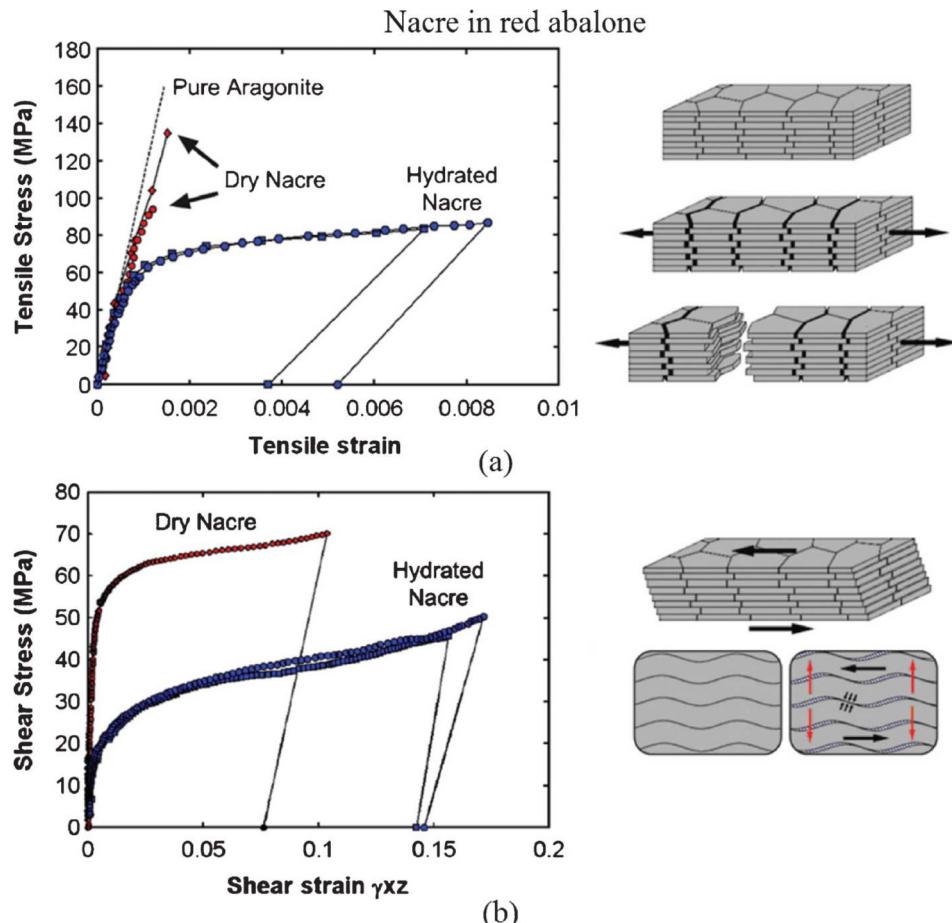


Figura 2.11. (a) Esfuerzo a tracción y (b) esfuerzo cortante contra deformación para el nácar del abulón rojo y un esquema de las estructuras de las baldosas laminares que muestra los modos de deformación asociados. La ondulación de la tablilla genera resistencia al deslizamiento, acompañada de una expansión lateral (flechas verticales). Imagen extraída de [16, 17]

2.6.1.1. Probetas adaptadas al tamaño de conchas

En 2018 Abarca realizó la caracterización de la concha del *Argopecten purpuratus*⁷ bajo condiciones de cambio climático [99] mediante ensayos de compresión y tracción uniaxial, considerando a la geometría como factor fundamental del análisis. Bajo solicitudes de tracción del material, se dispuso de tres direcciones principales (0° , 45° y 90°) para estudiar la anisotropía material (fig. 2.12), extrayendo probetas representativas de tales direcciones (fig. 2.13). Se observaron diferencias en el comportamiento mecánico para diferentes niveles de pH y pCO_2 , también se concluyó que el material no presentaba un comportamiento bimodular⁸.

Aunque la microestructura no sea nacarada como el del *P. purpuratus*, este estudio sugiere modelos constitutivos que pueden ser aplicados al individuo de estudio.

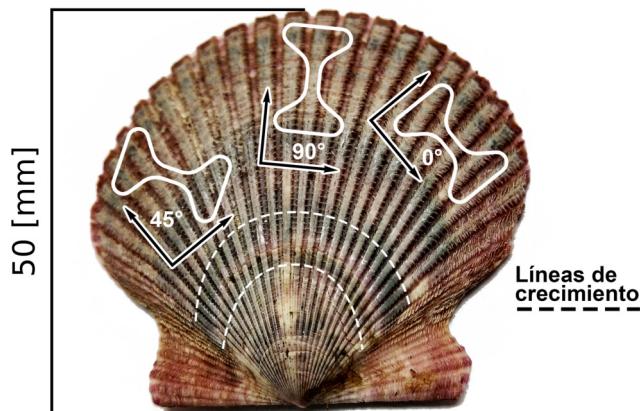


Figura 2.12. Direcciones principales y orientaciones de las probetas para el ensayo de tracción uniaxial. Imagen extraída de [99]



Figura 2.13. Probetas a 90° , 45° , y 0° , respectivamente, cortadas en cortadora láser a bajas potencias. Imagen extraída de [99]

⁷Molusco bivalvo que cuenta con una microestructura laminar cruzada en su concha (fig. 2.8f)

⁸Diferencias en las propiedades mecánicas del material bajo solicitud de tracción y compresión

2.6.2. Propiedades nano-mecánicas

Las propiedades mecánicas del nácar se han estudiado mediante experimentos de nanoindentación [100, 101, 102]. Mohanty et al. informaron sobre el comportamiento nanomecánico del nácar y demostraron que las plaquetas de aragonita son de naturaleza viscoelástica cuando presenta material orgánico debido a su estado húmedo [102].

En la figura 2.14 se observan distintos tipos de marcas producidas por la nanoindentación en el material de nácar del abulón. Los resultados de la investigación de Bezares et al. indicaron que bajo la presencia de humedad, la dureza era mucho menor que en estado seco, produciendo una deformación plástica en los bordes. Estos resultaron ser mucho más obtusos que los bordes agudos del nácar seco, indicando además un comportamiento anisótropo [18].

Cabe destacar que las descripciones detalladas en la figura 2.14 corresponden a las dicha por los propios autores Bezares et al., el cual describe el comportamiento mecánico del material con mayor detalle en su investigación [18]. Esta información resulta útil para comprender el comportamiento bajo distintas condiciones, las que serán consideradas en estudios futuros del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Santiago de Chile para indentaciones en el sujeto de estudio *P. purpuratus*.

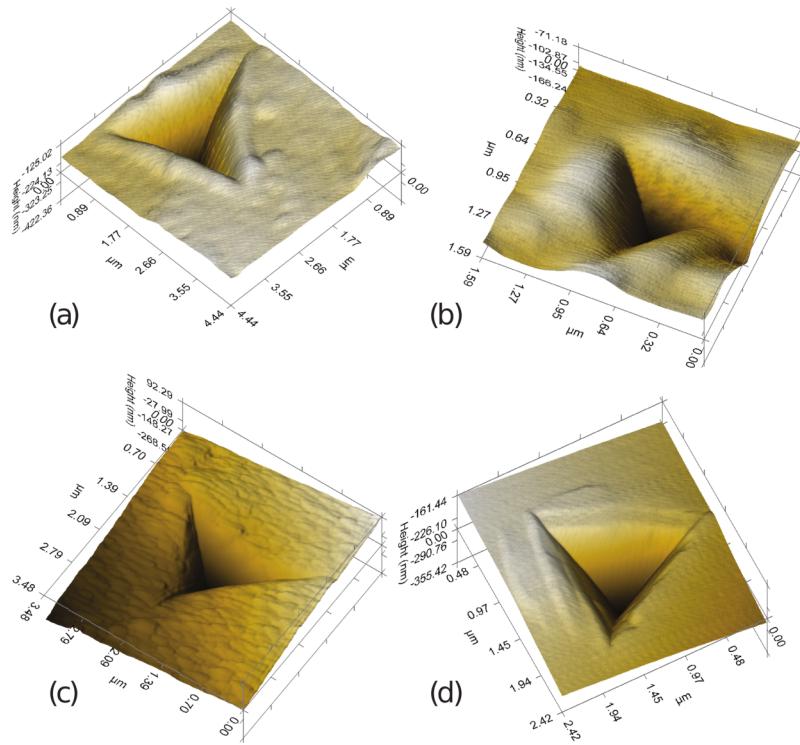


Figura 2.14. Nanoindentación del abulón rojo. (a) Nácar seco, presencia de apilamientos desiguales en los bordes, (b) Nácar húmedo, bordes obtusos relacionados a la plastificación del nácar húmedo debido a su módulo relativamente bajo, (c) Nácar tratado térmicamente, el material parece compactado y similar a lo que sucede con la arena cuando se calienta y los granos comienzan a fusionarse, (d) Aragonita monolítica, el apilamiento desigual indica anisotropía. Imagen extraída de [18].

2.7. Simulaciones numéricas

Se han realizado simulaciones numéricas para el estudio del comportamiento mecánico a partir de los efectos de cambio climático por [Abarca](#) para el molusco *Argopecten purpuratus*, aunque sin poder caracterizar la estructura de la concha de forma adecuada debido a la complejidad geométrica de esta [99]. En la figura 2.15 se observan los modelos de sus probetas de tracción extraídas de la concha del *Argopecten purpuratus* utilizadas para simulación numérica, específicamente en dos direcciones principales (90 y 0°) definidas por el autor (fig. 2.13). El mayor problema presentado fue la aproximación de la geometría, las cuales fueron modeladas en programas *CAD*.

Mediante las simulaciones por [MEF](#), [Abarca](#) realizó un análisis inverso vía ajuste numérico de las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de compresión y tracción uniaxial. De esta forma corroboró anisotropía del tipo ortótropo en el material de la concha, además de descartar la hipótesis de un efecto bimodular en las propiedades mecánicas. Se esperan estudios similares de este mismo autor pero utilizando tecnología micro-CT, como las presentadas en este estudio, para mejorar la respuesta mecánica en las simulaciones, captando la real geometría de las probetas y de la concha en su digitalización. Esto se realiza debido a que el autor hipotetiza efectos significativos en el estado de tensiones provocados por las estrías de la valva, las mismas que se presentan en las probetas elaboradas mediante software *CAD*, pero sin ser adecuadas para una real representación.

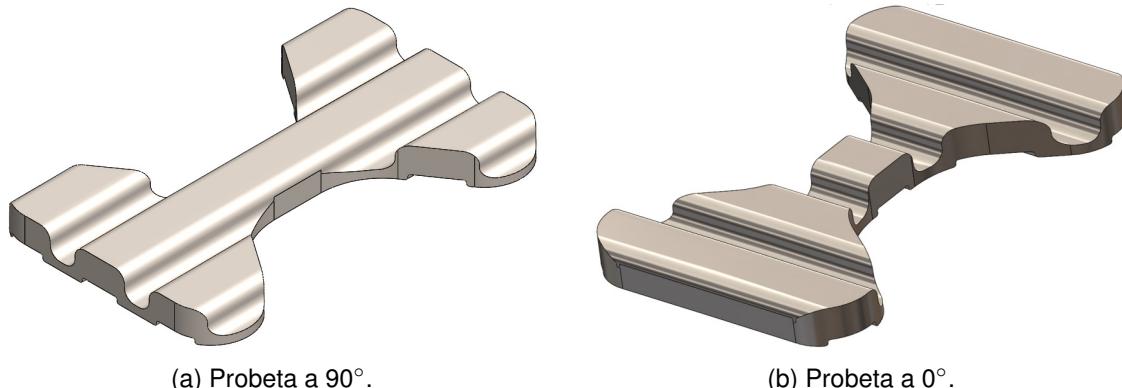


Figura 2.15. Geometrías utilizadas para ensayo de tracción uniaxial. Imagen extraída de [99]

También se han realizado análisis de la estructura de conchas con el fin de analizar los concentradores de esfuerzo que se producen en las estrías a lo largo de la concha. Así es como en el año 2015, por parte de [Tiwary et al.](#) se realizaron estudios numéricos y experimentales sobre la estructura de conchas de diferentes moluscos, dejando de lado el material y concentrándose en la posibilidad de obtener resultados que sirvan para diseños inspirados en la naturaleza [103]. En la figura 2.16 se muestran los resultados obtenidos para análisis numérico de la forma de dos valvas, describiendo la distribución de esfuerzos en relación al aumento de detalles que esta tiene. Se muestra la distribución de esfuerzos, desde la forma

más básica hasta la inclusión de surcos (estrías de las conchas) a través de **MEF** en un ensayo de compresión simple. Cabe recalcar que, al igual que el estudio de [Abarca](#), la geometría sigue siendo elaborada mediante software *CAD*, el cual no logra una representación fiel de las estrías y curvaturas propias de las conchas de moluscos estudiados.

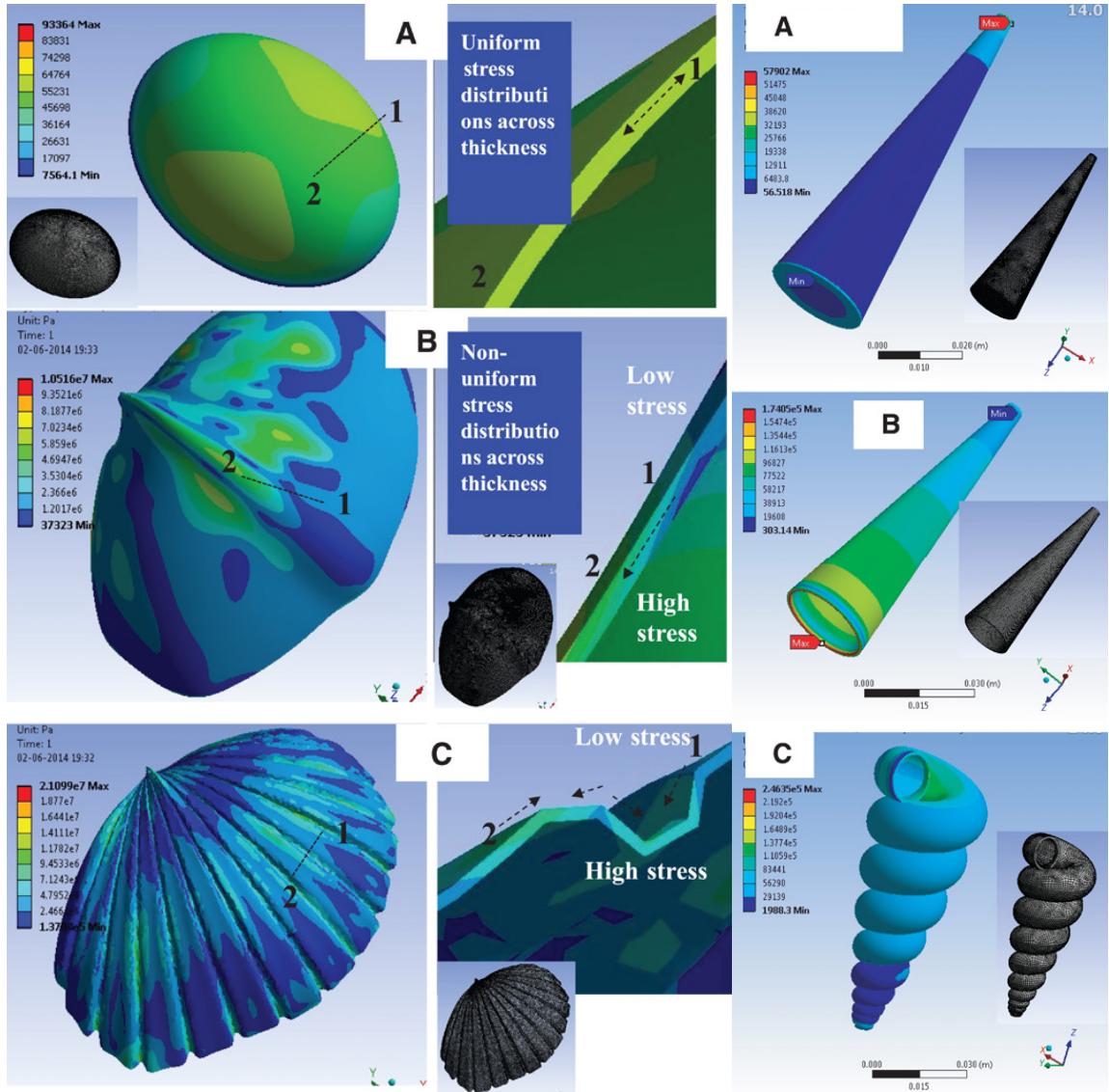


Figura 2.16. Resultados obtenidos para análisis numérico. Imagen extraída de [103]

Considerando estos estudios, se decide entonces realizar un procesamiento por microtomografía computacional (Micro-CT) de las valvas, con el fin de obtener una geometría que represente con precisión la estructura de la concha del *P. purpuratus* en simulaciones numéricas por **MEF**.

En este estudio se decide utilizar elementos tetraédricos dada su capacidad de adaptación a superficies complejas, considerando que se utilizará la geometría real de la concha gracias a la tecnología de la microtomografía computarizada (Micro-CT).

2.8. Caracterización mecánica de la concha del *P. purpuratus*

Durante el siglo XX se iniciaron estudios complejos sobre las propiedades mecánicas de los tejidos duros, principalmente en huesos, estableciendo distintos modelos constitutivos y caracterizaciones mecánicas [10, 104]. El hueso se trata de un material compuesto en capas, siendo constituido principalmente por tejidos calcificados. Durante su crecimiento, este se forma de acuerdo a las solicitudes que ha sido sometido, siendo esto explicado mediante la Ley de Wolff:

“La forma y estructura de los huesos en crecimiento y de los adultos, depende de los esfuerzos a los que están sometidos. Alterando las direcciones de los esfuerzos, la forma de los huesos puede ser cambiada.” [105]

En otras palabras, los huesos son materiales adaptativos según su condición de crecimiento. En la sección 2.4 se ha presentado evidencia del comportamiento adaptativo del *P. purpuratus* a diferentes escenarios (cambio climático), por lo que es factible comparar el comportamiento mecánico de los huesos con el del molusco en estudio, dado que este es capaz de adaptar su geometría en el crecimiento a partir del estado de tensiones [30, 10, 72].

El hueso presenta un comportamiento viscoelástico y no lineal, sin embargo, es considerado por un gran número de autores como un material elástico lineal anisótropo. Esta simplificación en su comportamiento depende de la solicitación a la cual es sometido, donde si el proceso es cuasiestático y no de impacto la simplificación es válida [106]. El material nacarado, presentado en la sección 2.6, se comporta como un material elástico lineal cuando se encuentra en estado seco y sin presencia de material orgánico, por lo tanto, es posible simplificar el comportamiento mecánico de la concha del *P. purpuratus* al igual que los huesos. Además, en los materiales nacarados secos existe evidencia que su comportamiento es anisótropo (sección 2.6.2) y, debido a que el material presenta una microestructura diferente en las plaquetas y a lo largo del espesor, es factible utilizar un modelo anisótropo del tipo ortotrópico para su comportamiento mecánico lineal. Así entonces, el comportamiento de este material se regirá por la *Ley de Hooke Generalizada*, siendo:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon \rightarrow \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \end{Bmatrix} = C \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

donde σ es el vector tensión, C la matriz de rigidez y ε el vector de deformación. La relación mostrada en la ecuación 2.3 es invertible, denotando:

$$\varepsilon = C^{-1} \cdot \sigma \quad (2.4)$$

La matriz de rigidez está constituida de forma cuadrada simétrica por 36 elementos, siendo estos dependientes del grado de anisotropía que presente el material. Si existe una anisotropía total, es que los elementos distintos entre sí y no nulos serán de 21. Si en la respuesta del material se observan planos de simetría, los componentes de la matriz de rigidez se convierten en combinación lineal unos de otros o en elementos nulos. Si un material presenta dos o tres ejes ortogonales simétricos entre sí, se trata de uno ortótropo, donde sus propiedades elásticas dependen del eje en que se están midiendo. Siguiendo las consideraciones de simetría, la matriz inversa de rigidez para un material ortótropo es:

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Como la matriz de rigidez es simétrica, entonces se tienen 12 constantes elásticas:

- Módulos de elasticidad: E_1 , E_2 y E_3 .
- Coeficientes de Poisson: ν_{12} , ν_{13} , ν_{21} , ν_{23} , ν_{31} y ν_{32} .
- Módulos de corte: G_{12} , G_{13} y G_{23}

De estas constantes, sólo 9 son independientes: E_1 , E_2 , E_3 , ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , G_{12} , G_{13} y G_{23} . Estos valores se pueden obtener mediante ensayos mecánicos en distintas direcciones:

1. Ensayo donde sólo σ_1 es distinto de cero:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} \rightarrow E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \quad (2.6)$$

2. Ensayo donde sólo σ_2 es distinto de cero:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} \rightarrow E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_1 = -\frac{\nu_{12}}{E_2} \sigma_2 \rightarrow \nu_{12} = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (2.8)$$

3. Ensayo donde sólo σ_3 es distinto de cero:

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E_3} \rightarrow E_3 = \frac{\sigma_3}{\varepsilon_3} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_1 = -\frac{\nu_{13}}{E_3} \sigma_3 \rightarrow \nu_{13} = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_2 = -\frac{\nu_{23}}{E_3} \sigma_3 \rightarrow \nu_{23} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} \quad (2.11)$$

Cabe destacar que para una determinación precisa de ν se debe medir muy bien (y en paralelo) la deformación en el eje y transversalmente a la solicitud, haciendo uso de extensómetros o transformadores diferenciales.

Las consideraciones para el modelo constitutivo empleado en los ensayos mecánicos y simulación numérica mediante **MEF** son:

- Debido a las complicaciones geométricas presentadas por [Abarca](#), se opta por procesar las valvas del *P. purpuratus* mediante una reconstrucción de imágenes, empleando una microtomografía computarizada (Micro-CT) para su reproducción digital.
- Considerando que la respuesta mecánica de la valva bajo solicitudes del rango cuasiestáticas presenta un comportamiento elástico lineal (fuera de este rango la respuesta mecánica se aproxima a un problema viscoelástico), se utilizan las muestras en estado seco, las cuales presentan la misma respuesta lineal (sección [2.6.1](#)). Además, considerando este estudio como el primero en representar la respuesta mecánica del *P. purpuratus*, existen dos principales dificultades para utilizar el material en estado húmedo: la primera es el procesamiento por Micro-CT, en el cual la materia orgánica no permite representar la estructura de la concha sin perjudicar la densidad de la valva, la cual está directamente relacionada a la calidad de su geometría. La segunda razón es la dificultad de realizar este primer acercamiento a las simulaciones por **MEF** empleando un comportamiento viscoelástico, el cual abarcaría un estudio de mayor extensión. Por lo tanto, se opta por simplificar el problema a un comportamiento elástico lineal bajo solicitudes cuasiestáticas, realizando los ensayos mecánicos bajo esta premisa.
- Se emplea la hipótesis de un comportamiento unimodular debido a dos consideraciones: la primera consiste en la imposibilidad de conseguir las propiedades mecánicas bajo la solicitud de tracción (sección [3.4.1](#)). La segunda consideración surge a partir de los resultados de [Abarca](#), quien desestimo mediante análisis inverso el efecto bimodular en las propiedades mecánicas del bivalvo *Argopecten purpuratus* (sección [2.6.1.1](#)).
- A partir de estas consideraciones se opta por un modelo elástico lineal frágil anisótropo de carácter ortotropo unimodular para los ensayos mecánicos y simulación numérica mediante **MEF**.

Capítulo 3

Metodología experimental

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para los dos estudios abarcados en este trabajo, la verificación de la simetría del comportamiento mecánico de ambas valvas del molusco (muestras provenientes de Huasco), y el proceso de crecimiento y remodelación de las conchas de los individuos de Quintay. Además, se plantea la metodología experimental de los ensayos mecánicos y su procesamiento de datos. Se emplean las consideraciones planteadas en el capítulo 2, es decir, material en estado seco y modelo constitutivo elástico linear frágil anisótropo de carácter ortotropo unimodular. Finalmente, se presenta el procedimiento realizado para las imágenes por microscopía electrónica de barrido (MEB) de las probetas utilizadas.

3.2. Simetría mecánica de valvas

Este estudio consiste en corroborar que ambas valvas del *Perumytilus purpuratus* (izquierda y derecha) presentan el mismo comportamiento mecánico del material de su concha. Fueron seleccionados 15 moluscos asignados a 5 grupos de tamaños, provenientes de la zona costera de Huasco, región de Atacama, de estos se extraen probetas provenientes de ambas valvas del individuo para ser sometidas a un ensayo de compresión uniaxial. Como se menciona en el capítulo 2, la concha del molusco presenta un comportamiento ortotropo (ecuación 2.5), por lo tanto, las probetas son comprimidas en las tres direcciones, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t), obteniendo así para cada dirección, el módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}) a la rotura del material frágil. Finalmente, mediante un análisis estadístico de covarianza por el método de ANCOVA, se verifica si existen o no diferencias significativas entre la valva izquierda y derecha.

3.2.1. Metodología para la selección de muestras

Los 15 mejillones seleccionados se dividen en 5 grupos, los cuales corresponden a la categoría de tamaños a partir del largo de la concha, por lo que cada tamaño cuenta con 3 muestras del *Perumytilus purpuratus*, identificados como individuos A, B y C. Además, cada molusco presenta dos valvas, izquierda y derecha, de las cuales se extraen de cada una las probetas para ser comprimidas en las tres direcciones del comportamiento mecánico del material. Los individuos seleccionados se presentan en la tabla 3.1. Otras variables a medir fueron la altura, ancho y espesor promedio de la valva izquierda (para el espesor se registran 5 mediciones en el margen de crecimiento, por lo que el promedio simple es el valor considerado). Estas magnitudes se representan en la figura 3.1.

Tabla 3.1. Categoría de muestras según condición geométrica

Tamaño	Muestra	Largo [mm]	Alto [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]
1	A	14,46	6,62	7,84	0,34
	B	13,89	6,27	8,25	0,44
	C	14,92	6,75	6,91	0,43
2	A	20,45	11,04	10,15	0,40
	B	19,05	9,26	11,57	0,57
	C	20,26	11,36	10,39	0,43
3	A	25,51	10,77	12,62	0,53
	B	25,56	11,68	14,55	0,52
	C	27,46	12,85	15,29	0,70
4	A	30,25	14,13	14,61	0,74
	B	34,75	15,81	14,88	0,84
	C	32,33	15,44	15,40	0,79
5	A	40,42	17,41	17,33	0,71
	B	37,35	19,48	16,73	0,68
	C	34,87	18,48	16,23	0,78

Para la extracción de las probetas, además de diferenciar las tres direcciones, se divide a la concha en 3 zonas a lo largo de la valva (fig. 3.1). La zona 3 corresponde a la zona de crecimiento, es decir, la que se encuentra en el margen de crecimiento, la zona 1 corresponde al sector más cercano al umbo, y la zona 2 es el sector que se encuentra en la zona 1 y 3, y que perdura más en tiempo, debido a que abarca la mayor cantidad de espacio en la valva, para posteriormente ser categorizada como zona 1 cuando la concha crezca. La división de la valva en zonas se realiza con el fin de observar diferencias entre sectores que varían a medida que la concha crece, es decir, la zona 3 de los mejillones más pequeños luego sería la zona 2 de los moluscos de mayor tamaño, esto se debe a que el nuevo material de la concha es añadido en el margen crecimiento (fig. 2.1) mientras el mejillón envejece. Por lo tanto, de cada zona se obtienen 3 probetas, las cuales son utilizadas para el ensayo de compresión uniaxial

en seco (ensayo de caracterización del material sin humedad) en las 3 direcciones descritas. En la Figura 3.1 se observa la división a la que fueron sometidas las muestras. Finalmente, se realiza el análisis estadístico de **ANCOVA** y posterior post-hoc de **Tuckey** para verificar diferencias a partir de los 270 ensayos realizados.

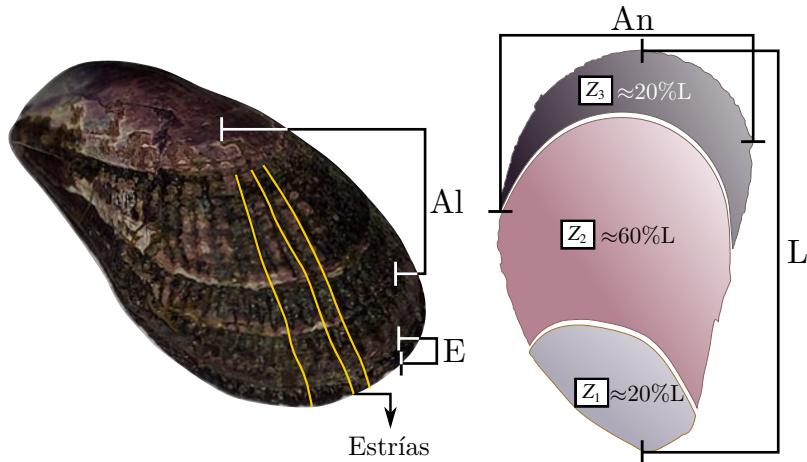


Figura 3.1. Zonas en que fue dividida la valva derecha, zona 1 (Z_1), zona 2 (Z_2) y zona 3 (Z_3). An : Ancho, L : Largo, Al : Alto, E : Espesor. Se presenta porcentaje del largo de cada zona

3.3. Crecimiento

Para el crecimiento fueron utilizados 125 individuos de *Perumytilus purpuratus* extraídos de la localidad costera de Quintay, región de Valparaíso, específicamente de Playa Chica. Posterior a la categorización y medición del largo de las conchas, estas fueron instaladas en la zona costera del centro de investigación marina de Quintay por el periodo de 3 meses en su ambiente natural (del 19 de Agosto al 21 de Noviembre de 2019), tiempo en que se realizan este tipo de investigaciones, siguiendo el procedimiento de [Ramajo et al.](#), [Osores et al.](#) y [Cancino et al.](#) en sus respectivos trabajos [19, 20, 21]. Al acabar tal periodo de tiempo, se realizó nuevamente la medición de sus largos con el fin de determinar la tasa de crecimiento a partir de distintos tamaños. Posteriormente, utilizando tal cálculo, se procede a estimar mediante regresión exponencial la edad de los moluscos a partir del largo de sus conchas (otras variables a medir fueron el peso de ambas valvas, altura de la concha, ancho y espesor). Después de realizar las mediciones antes mencionadas, se seleccionan de manera aleatoria una concha de cada tamaño para la digitalización de su geometría mediante una micro-tomografía computacional (Micro-CT), con el fin de utilizar dicha geometría para la posterior simulación del ensayo de flexo-compresión [99] mediante **MEF**. Finalmente, se asigna la valva derecha para realizar el ensayo de compresión uniaxial en seco (ensayo de caracterización del material sin humedad a través de sus poros) en las tres direcciones de la ortotropía del material (3 probetas por valva), mientras que la valva izquierda es utilizada para realizar el ensayo de flexo-compresión (caracterización estructural de la valva izquierda detallado en la sección

3.4.2).

3.3.1. Metodología de selección de muestras

Los individuos fueron seleccionados a partir de un determinado rango de tamaños (largo de la concha), divididos en 5 grupos, cada uno con 25 mejillones, como se puede observar en figura 3.2. El rango equivalente de cada tamaño y mediciones geométricas, se puede apreciar en la tabla 3.2, en la que se muestra el largo inicial (al comienzo del experimento) y los valores obtenidos después de 3 meses de crecimiento. La variación del largo de la concha se utiliza posteriormente para el cálculo de la edad a partir del largo de la valva.

Tabla 3.2. Valor de la media y error estándar muestral (**SEM**) del largo y variación de largo en 3 meses, altura, ancho y espesor de la valva derecha

Tamaño	Largo _i [mm]	Δ Largo [mm]	Alto [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]
1	8,42 ± 0,22	1,66 ± 0,32	2,70 ± 0,15	6,59 ± 0,31	0,31 ± 0,02
2	11,99 ± 0,30	2,20 ± 0,13	3,64 ± 0,09	8,77 ± 0,20	0,33 ± 0,01
3	17,87 ± 0,35	1,54 ± 0,13	5,04 ± 0,11	10,97 ± 0,14	0,39 ± 0,01
4	21,15 ± 0,24	1,01 ± 0,15	5,69 ± 0,17	12,14 ± 0,31	0,40 ± 0,01
5	28,09 ± 0,34	0,37 ± 0,06	7,17 ± 0,19	14,47 ± 0,16	0,54 ± 0,02

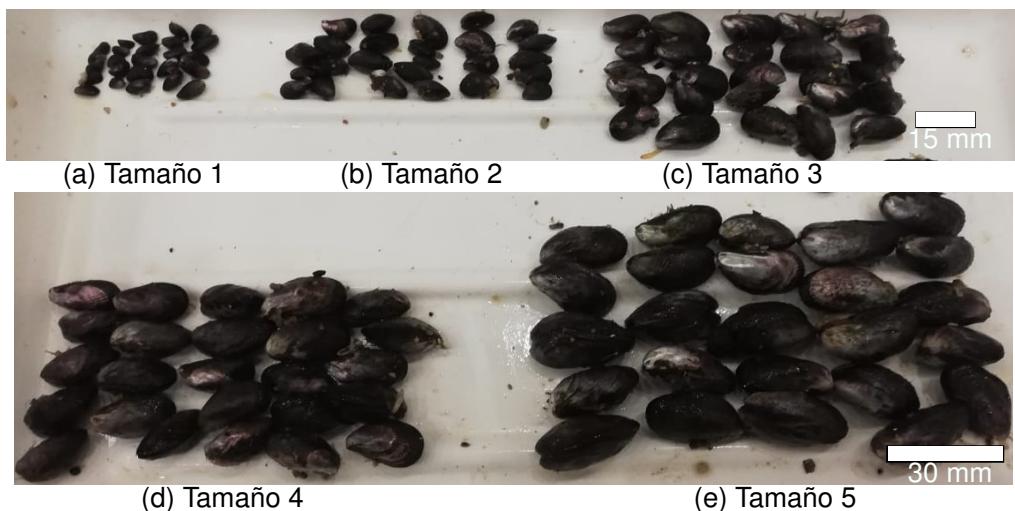


Figura 3.2. 25 muestras por cada uno de los 5 tamaños

Posterior a su categorización, se procede a distribuir a los individuos de distintos tamaños (5 individuos de cada tamaño) dentro de 5 jaulas construidas con cajas de malla de plástico Vexar ($10 \times 10 \times 5$ [cm] [ancho × largo × alto], con una apertura de 5 [mm]), protegidas con una caja de acero inoxidable de dimensiones similares, ancladas a las rocas con pernos de acero inoxidable, y utilizando marcas de abeja para identificar a cada molusco (fig. 3.3).

Además, se añadieron 10 mejillones adicionales a cada jaula (sin etiquetas y de tamaño variable), empleando el protocolo utilizado por [Ramajo et al.](#), [Osores et al.](#) y [Cancino et al.](#) en sus respectivos trabajos [19, 20, 21]. Cabe destacar que mientras la jaula se encuentre bien apernada, esta no tiene mayor impacto en el ambiente.

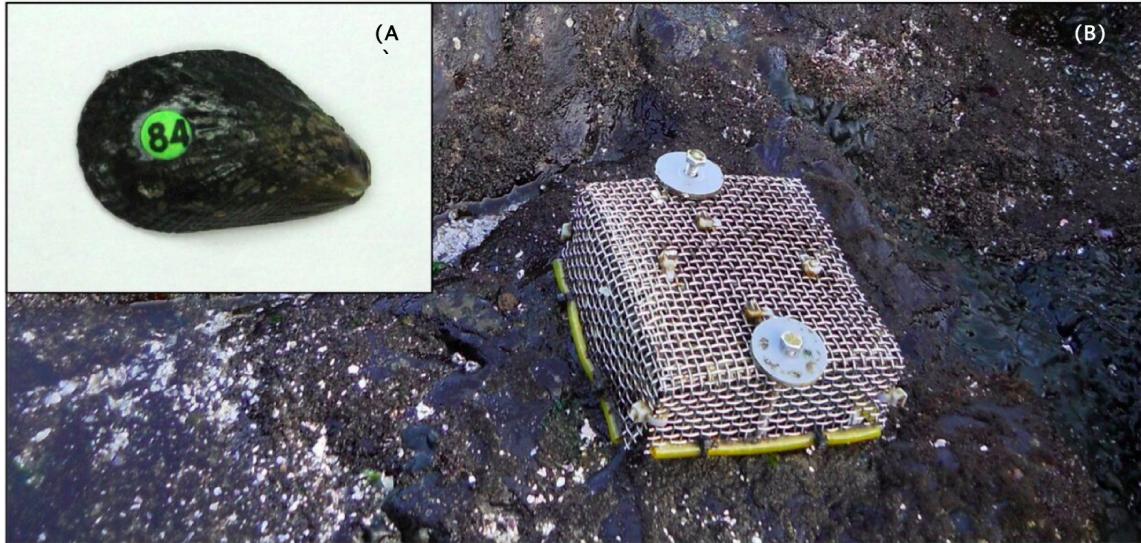


Figura 3.3. Montaje de jaula en terreno. a) Individuo de *Perumytilus purpuratus* etiquetado con una marca de abeja, b) Jaula utilizada en el experimento de [Ramajo et al.](#) en 2016. Imagen extraída de [19]

Resumiendo, el experimento consiste en 5 jaulas que encierran a 35 individuos cada una, siendo 25 identificados con marcas de abeja, los cuales corresponden a 5 moluscos de cada uno de los 5 tamaños, y otros 10 mejillones de la misma especie pero sin etiquetas y tamaño variable, con el fin de que la gran cantidad de individuos pueda asegurar la producción de biso entre ellos y que estos queden unidos entre sí y, de esta forma, evitar pérdidas de los moluscos más pequeños que puedan traspasar la apertura de la malla. La distribución por tamaños del *Perumytilus purpuratus* ya identificados y categorizados por tamaños para cada jaula se observa en la figura 3.4.



Figura 3.4. 5 Muestras por tamaño agrupadas para cada una de las 5 jaulas

Como se menciona anteriormente, se procede a montar las 5 jaulas utilizando un taladro

inalámbrico Bosch GBH 24V para taladrar la roca en que se disponen las jaulas mediante tarugos de 10 milímetros (fig.3.5).



Figura 3.5. Montaje de jaula en terreno, en la zona costera del centro de investigación marina de Quintay, región de Valparaíso

Finalizado los tres meses, y con dos visitas al sitio para verificar el estado de las jaulas, se procede al retiro de los moluscos para la medición del largo final, obteniendo de esa forma la tasa de crecimiento de los distintos tamaños a 3 meses (tabla 3.2), y con ello la curva representativa de la edad a partir del largo de la concha (sección 4.4.1). Cabe destacar que, aunque se utilizó el protocolo de [Ramajo et al.](#), hubo una disminución en la cantidad de individuos debido a muertes naturales de los moluscos de mayor tamaño, y pérdidas y muertes de mejillones de menor tamaño que lograron traspasar la apertura de la malla debido al fuerte oleaje producido o por falta de alimento. La distribución de individuos por jaula que aún se encontraban en su respectivo sitio concluidos los tres meses se puede apreciar en la tabla 3.3, lo cual indica que de 125 muestras, sólo 86 lograron superar el periodo de tiempo establecido del experimento (mortalidad del 68 %). Las muestras serán sometidas a ensayos mecánicos de compresión uniaxial para las tres direcciones de ortotropía del material (3 probetas de la valva derecha para cada muestra) y ensayo de flexo-compresión (valva izquierda), ambos ensayos en esto seco, tal como se describe en la sección 2.8.

Tabla 3.3. Cantidad de muestras restantes en cada jaula al finalizar los 3 meses de crecimiento

Tamaño \ Jaula	1	2	3	4	5	Total por tamaño
1	0	1	0	5	2	8
2	5	5	5	4	5	24
3	5	5	5	3	4	22
4	5	2	1	2	2	12
5	5	3	3	5	4	20
Total de muestras						86

3.4. Ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos se realizan con el fin de establecer propiedades mecánicas que representen el comportamiento mecánico, en este caso, de la concha del *Perumytilus purpuratus*, para lo cual se establece el ensayo de compresión uniaxial, dejando de lado el ensayo de tracción uniaxial debido a que la geometría de la valva imposibilita obtener una probeta adecuada para tal estudio (por ejemplo, comprobar modelo bimodular elástico). Los parámetros obtenidos corresponden al módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}) para el punto de falla del material, propiedades correspondientes al tipo de material previamente descrito en el capítulo 2. El segundo ensayo, denominado ensayo de flexo-compresión por Abarca en el estudio realizado el 2019 [99], en el cual se observa la respuesta estructural de la valva izquierda, obteniendo de esta forma la rigidez (K) de la misma, la fuerza máxima (F_{max}) aplicada por el punzón que comprime la concha, y el desplazamiento máximo (d_{max}) del punzón hasta el punto de rotura del material. Dichos ensayos son utilizados posteriormente para realizar la simulación mediante **MEF** del ensayo de flexo-compresión de la valva izquierda. Todos los ensayos mecánicos se realizan en estado seco del material.

3.4.1. Ensayo de compresión uniaxial

Consiste en comprimir una muestra de un determinado material, de geometría cilíndrica o prismática, para conocer sus propiedades mecánicas mediante la cual sea posible obtener, para este tipo de muestras a partir de curvas de esfuerzo y deformación ingenieril, el módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}). Debido al comportamiento frágil del material este no plastifica, por lo que la curva sólo representa la zona elástica. Para este caso en particular, debido a la geometría de la valva, la probeta a utilizar corresponde a un prisma (fig. 3.6), es decir, las secciones transversales son iguales en toda la longitud, la cual es obtenido al cortar la valva con una Dremel 3000 2/30 ACC, herramienta de corte multipropósito. Se realiza el ensayo con el material en estado seco (como se detalla en la sección 2.8) aplicando una carga utilizando una máquina de ensayos universales en la dirección del espesor (d_e), radial (d_r) o paralela a las estrías y tangencial (d_t) a estas (fig. 3.6).

El ensayo se detiene cuando se produce la falla del material, en este caso, en la zona elástica sin que la probeta sea capaz de plastificar debido a la falta de agua y material orgánico a través de su microestructura nacarada.

De este ensayo se obtienen datos de fuerza y desplazamiento, los cuales son transformados a esfuerzo-deformación (Mayor detalle en el apéndice A.1) a partir de la geometría y tamaño de la probeta (fig. 3.6), para luego procesar la información por medio de una regresión lineal, con el fin de obtener las propiedades mecánicas del material anteriormente mencionadas, módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}).

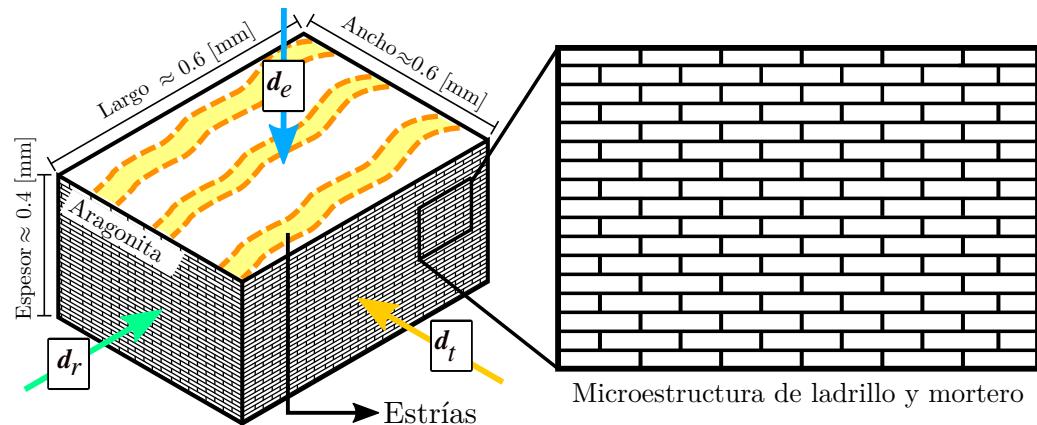


Figura 3.6. Geometría nacarada de la probeta y las direcciones de la ortotropía del material: Dirección Espesor (d_e), dirección radial (d_r) y dirección tangencial.

Las probetas se obtienen cortando la sección mostrada anteriormente con una cortadora rotatoria modelo DREMEL 4000, luego son lijadas para obtener caras paralelas de la superficie exterior e interior de la concha (con el fin de que el esfuerzo sea uniforme en toda la probeta). Considerando la figura 3.6 como la probeta obtenida, el figura 3.7 representa el lugar en que se extrae el material prismático de la valva, indicando además las 3 direcciones que rigen el comportamiento del material.

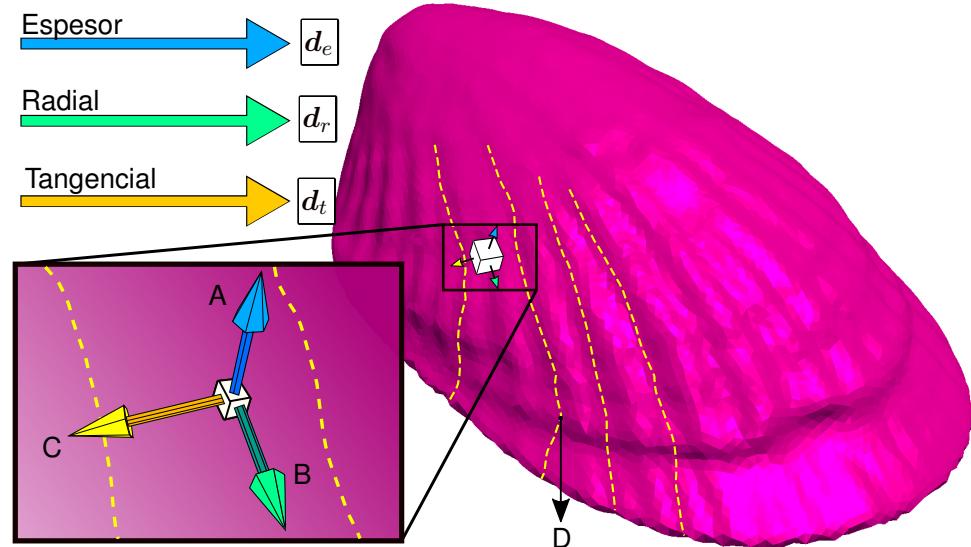


Figura 3.7. Concha digitalizada por Micro-CT del *Perumytilus purpuratus*. A: Dirección Espesor (d_e), B: Dirección Radial (d_r), C: Dirección Tangencial (d_t), D: Estrías radiales.

Finalmente, se utiliza una máquina de ensayos universal Instron 3342, la que cuenta con una placa inferior fija y una placa superior móvil. La fuerza de reacción a partir del desplazamiento impuesto de la placa móvil son registrados por la celda de carga de 500 [N] que se

encuentra junto a la placa móvil (fig. 3.8). Después de registrar la fuerza y desplazamiento impuestos en las 3 probeta por valva (una por cada dirección), se procesan los datos, el cual consiste en obtener el esfuerzo y deformación ingenieril utilizando el área transversal y largo de la probeta respectivamente y, aplicando una regresión lineal simple, se calcula el módulo elástico. Mayor detalle del ajuste de la curva representativa del ensayo en el apéndice A.1.

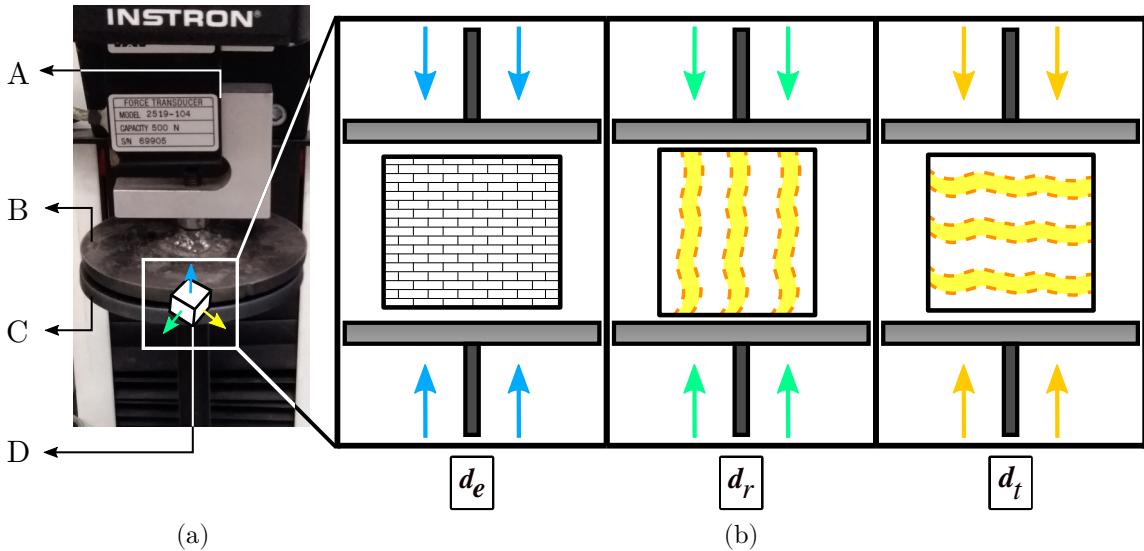


Figura 3.8. Montaje del ensayo de compresión uniaxial. a) Instron 3342 con montaje de compresión, b) Probeta orientada según direcciones ortótropas. A: Celda de carga, B: Placa superior móvil, C: Placa inferior fija, D: Probeta montada

3.4.2. Ensayo de flexo-compresión

Un ensayo clásico para obtener propiedades mecánicas del material es el ensayo de flexión en tres puntos, pero debido a la geometría de la concha del *Perumytilus purpuratus* es necesario adaptar el ensayo a estas consideraciones para apreciar el comportamiento estructural de la valva. Para este caso en particular se realiza mediante las consideraciones de [Abarca](#) en su tesis de pregrado [99], en que se somete a la valva del *Argopecten purpuratus* a una compresión mediante la carga de un punzón en la zona más alta de la valva (cercana al umbo), de esta forma es posible analizar la rigidez de la concha para esta solicitud de cargas en particular (fig. 3.9), simulando ataques por depredadores (sección 2.3).

Se utiliza una base especial diseñada por [Abarca](#) en que la valva se confina entre cuatro paredes, evitando su deslizamiento en la superficie (con el fin de minimizar los efectos de fricción), movimiento provocado por el punzón al momento de comprimir la concha. En la figura 3.10 se muestra el diseño de la base, fabricada en Ertacetal (policarbonato de alta resistencia) y mecanizada con una fresadora CNC (Fanuc modelo Saeil TNV-40). El instrumento de compresión utilizado es el punzón, el cual posee un diámetro de 17,1 [mm].

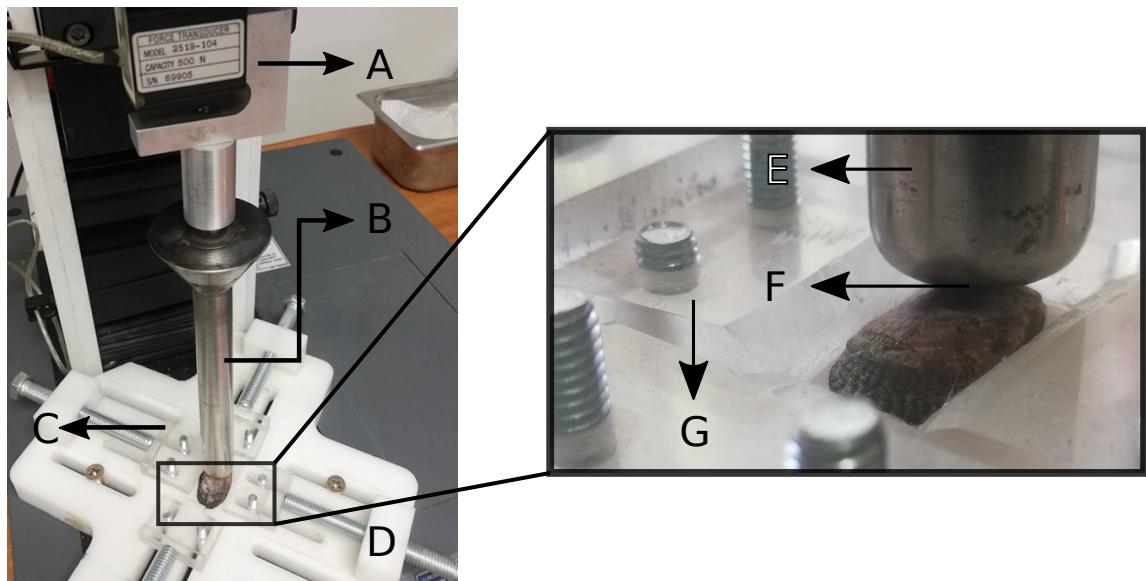


Figura 3.9. Ensayo de flexo-compresión. a) Montaje en Instron 3342, b) Montaje de valva. A: Celda de carga, B: Punzón, C: Base de ensayo, D: Valva montada, E: Punzón, F: Punto más alto de la valva en contacto con punzón, G: Pared de confinamiento

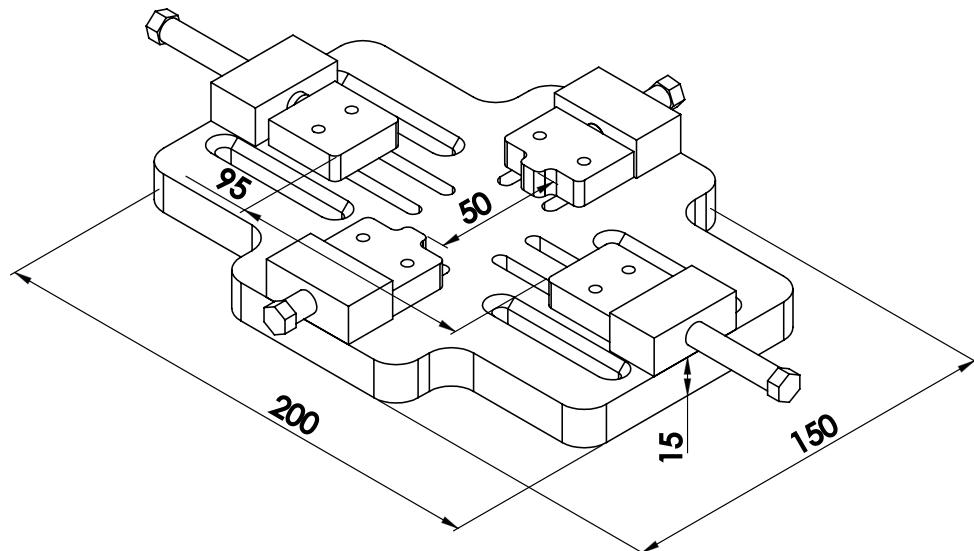


Figura 3.10. Base utilizada en el ensayo de flexo-compresión.

El ensayo se realiza con la máquina de ensayos universales Intron 3342 acoplada a la base diseñada para el ensayo (fig. 3.10). La valva se ubica justo debajo del punzón y se ajustan las paredes alrededor de la concha, de tal forma que no exista movimiento en el mismo plano de la base, y el desplazamiento sólo se efectúe en la zona más alta de la valva en el eje vertical hasta el punto de rotura de esta, es decir, la base se considera rígida bajo la carga que soporta la valva, la cual utiliza las paredes para evitar el desplazamiento en la base. La velocidad de compresión es de 0.05 [mm/min] y la celda de carga de 500 [N] registra la fuerza de reacción

a partir del desplazamiento impuesto. Mayor detalle del ajuste de la curva representativa del ensayo en el apéndice A.2.

3.4.3. Análisis estadístico

A menos que se indique lo contrario, los resultados en este trabajo siempre se expresan como media \pm error estándar (**SEM**). Las variables se procesan mediante el test de normalidad de **Kolmogórov-Smirnov** y el análisis de homogeneidad de varianzas (test de **Levene**), las cuales estarán sujetas a un análisis gráfico para concluir si se cumplen las condiciones necesarias para realizar un Análisis de Covarianza Factorial (**ANCOVA**) [107, 108], el cual permite eliminar la heterogeneidad de varianza causada por la variable de interés (tamaño de la valva) mediante la influencia de una o más variables cuantitativas (en este caso, la covariante es el grosor de la valva). Debido a que este método sólo indica si existen diferencias entre medias de las poblaciones a analizar, se realiza el test post hoc de **Tukey** [109], permitiendo identificar cuáles poblaciones difieren entre sí.

Para contrastar las curvas experimentales de las obtenidas mediante simulación numérica, se calcula la bondad de ajuste mediante el coeficiente de determinación r^2 corregido por el número de datos y variables independientes. El coeficiente de determinación se define como:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.1)$$

donde y_i corresponde a los datos experimentales, \hat{y}_i datos otorgados por la simulación y \bar{y} a la media de los datos experimentales.

El ajuste del coeficiente de determinación con respecto al número de datos y variables independientes del modelo es de la forma:

$$r_{adj}^2 = 1 - \frac{(1 - r^2)(n - 1)}{n - k - 1} \quad (3.2)$$

donde n es el número de datos, y k la cantidad de variables independientes del modelo.

El error que contrasta el ajuste del modelo de la simulación de flexo-compresión con el ensayo experimental, se cuantifica mediante la raíz de la desviación cuadrática media (*NRMSD*), Este parámetro se define por la siguiente ecuación:

$$NRMSD = \frac{1}{\Delta} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.3)$$

donde $\Delta = |y_{max} - y_{min}|$ de los datos experimentales.

Mediante r^2 es posible observar la bondad del ajuste de la curva experimental y de la simulación numérica mediante valores que oscilan entre 0 y 1, en cambio, el valor del *NRMSD* contempla la normalización de los errores respecto al número de datos y magnitud de la medida experimental [107].

3.4.4. Microscopía electrónica de barrido

Además del análisis cuantitativo de las propiedades mecánicas de las conchas de los moluscos, también se han presentado muchos estudios en los que se realiza un análisis cualitativo de la microestructura de las conchas mediante imágenes microscópicas. Existen tres métodos principales para observar la microestructura, concretamente de las conchas de moluscos, como son las imágenes TEM [110, 111], y la microscopía de fuerza atómica (MFA) [102, 101, 82, 112, 113, 81]. Sin embargo, la más utilizada debido a la calidad de la imagen, la facilidad de uso y la velocidad de procesamiento son las imágenes MEB [81, 18, 114, 115, 111, 116, 117]. Este análisis y el estudio de las propiedades mecánicas no se presentan en ninguna investigación anterior para el caso del mejillón *P. purpuratus*.

Se obtuvieron imágenes de microscopía electrónica de barrido (MEB) en las muestras requeridas utilizadas en el ensayo de compresión uniaxial, concretamente en las comprimidas en las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t), las cuales sufren un tipo especial de fallo al final del ensayo, como se explíca en la sección 4.2.1. Los especímenes se analizan en la superficie en la que se dividieron las muestras (fig. 3.11b), la superficie de la capa nacarada (SN), y en su espesor (fig. 3.11c), la sección transversal de la capa nacarada (CN).

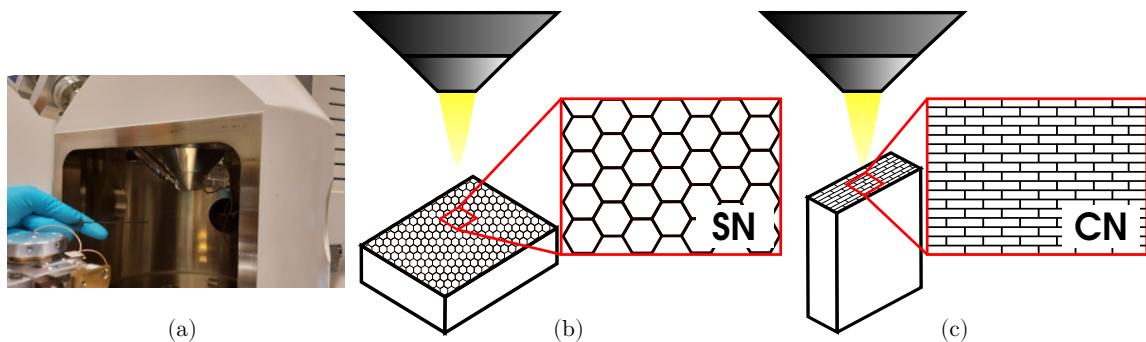


Figura 3.11. Procedimiento de obtención de imágenes MEB. (a) Microscopio electrónico de barrido (MEB), modelo ZEISS EVO 10 SEM, (b) Disposición de las muestras para la superficie de la capa de nácar (SN), (c) Disposición de las muestras para la sección transversal de la capa de nácar (CN).

El procedimiento de obtención de imágenes fue el siguiente: las mitades de la muestra requeridas se utilizan para la obtención de imágenes perpendiculares a la superficie de delaminación (fig. 3.11b), y las otras mitades de la muestra se utilizan para la obtención de imágenes del espesor (fig. 3.11c). Posteriormente, se aplicó una capa de oro de aproximadamente 30 [nm] de espesor utilizando el equipo Cressington 108 Auto Sputter Coater. Se trata de un proceso físico de pulverización de un blanco metálico de gran pureza, en este caso, de oro. Los átomos pulverizados se depositan sobre la muestra, formando una fina capa en su superficie. La capa de oro aplicada tiene un comportamiento conocido, y sus bandas principales se sitúan en 2,1 [KeV] y 9,7 [KeV]. Por último, el examen microscópico se realizó en un microscopio electrónico de barrido Zeiss EVO MA 10 a 20 [kV] (fig. 3.11a).

Capítulo 4

Resultados de los ensayos mecánicos

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos experimentalmente mediante los ensayos de compresión uniaxial y flexo-compresión (sección 3.4.1 y 3.4.2) de forma general para el individuo de estudio *Perumytilus purpuratus*. Posteriormente, se estudian las propiedades del material obtenidas para los 5 tamaños a partir de un análisis estadístico mediante un Análisis de Covarianza Factorial (**ANCOVA**), usando el grosor de la valva de cada individuo como covariable, con el fin de fortalecer el modelo estadístico a partir de una variable directamente relacionada con la resistencia material (debido a que se añade nuevo material en espesor) y estructural (por la diferencia en la resistencia que ofrece la estructura de la concha al aumentar o disminuir el espesor). Finalizando con el test de **Tuckey** para evaluar qué niveles de factores individuales generan diferencias significativas. Estos estudios son utilizados en el análisis de resultados numéricos (sección 5.6.6)

4.2. Análisis de resultados de ensayos mecánicos

4.2.1. Análisis de la superficie de fractura en el ensayo de compresión uniaxial

Este ensayo se realiza para estudiar el material en estado seco de la valva en el análisis de simetría de valvas y crecimiento de valvas (sección 3.2 y 3.3). Los resultados otorgados por la máquina de ensayos Instron 3342 corresponden a las curvas de fuerza contra desplazamiento, de ellas se obtienen las propiedades mecánicas de cada muestra, módulo elástico (E), que representa la rigidez del material, esfuerzo máximo del material alcanzado antes de la rotura (σ_{max}) y deformación máxima del material antes de la rotura (ε_{max}) (apéndice A.1) en las tres direcciones de ortotropía del material; dirección del espesor (d_e), dirección radial (d_r) y dirección tangencial (d_t). La probeta utilizada corresponde a la descrita en la sección 3.4.1 y es obtenida, para el caso de la simetría de valvas, de la valva izquierda y derecha en 3 zonas distintas (fig. 3.2.1) y, para el estudio del crecimiento, son obtenidas de la valva derecha.

Se observó que la probeta utilizada (fig. 3.6) llega al punto de ruptura sin plastificar, al igual como lo describe el comportamiento del modelo utilizado, el cual cuenta con una descripción acabada en el apéndice A.1. Sin embargo, al alcanzar el esfuerzo máximo (σ_{max}) soportado por el material, el fallo de la probeta difiere dependiendo de la dirección en que se comprime. La dirección del espesor (d_e) presenta una fractura tortuosa de la muestra; normalmente se fragmenta en muchos trozos durante el ensayo, se pulveriza o se rompe siguiendo la trayectoria de las plaquetas, mientras que las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t) presentan un patrón particular observado en todos los casos, como se muestra en la figura 4.1. La delaminación de la muestra se observa al alcanzar el esfuerzo máximo (σ_{max}) debido a las placas de estructura de nácar. La tortuosidad es uno de los mecanismos de falla propuesto por Sarikaya [118], y reportado por muchos autores [118, 119, 81, 120, 121, 122, 123, 124].

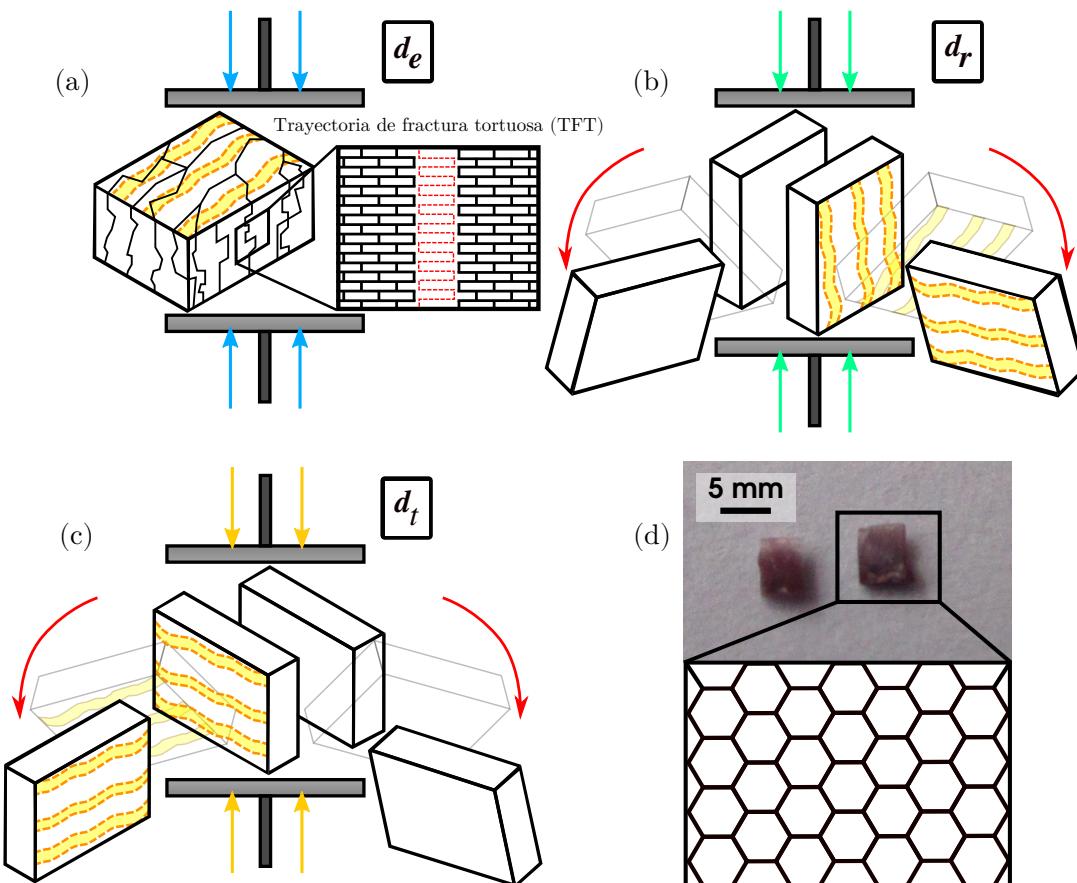


Figura 4.1. Característica de fallo de la muestra al final del ensayo de compresión uniaxial en las direcciones de espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (a) Muestra fracturada por fallo con fractura aparentemente tortuosa al final del ensayo en la dirección del espesor (d_e), (b) Muestra fracturada por delaminación al final del ensayo de compresión en la dirección radial (d_r), (c) Muestra fracturada por delaminación al final de la prueba de compresión en la dirección tangencial (d_t), (d) Fotografía de la muestra fracturada y diagrama de su microestructura después de aplicar la compresión en la dirección radial (d_r) y tangencial (d_t).

La figura 4.1a, muestra el fallo de la probeta cuando se aplica una carga en la dirección del espesor; muestra una trayectoria de fractura tortuosa (TFT) durante la propagación de la grieta. La fractura en esta dirección para materiales nacarados ha sido observada y reportada principalmente en ensayos de flexión y análisis de fractura [77, 96, 116, 117] la propagación de la grieta avanza entre las plaquetas de aragonito en la dirección del espesor. El estudio realizado por Menig et al. [119] informa del tipo de fallo observado en el mejillón *PP*, se realizaron ensayos de flexión, cizallamiento y compresión en *Haliotis rufescens* (abulón), estos últimos en el espesor (d_e) y en la dirección radial o tangencial (d_r o d_t) indistintamente. Observó que el fallo en la dirección del espesor (d_e) sufría una deflexión de las grietas por capas orgánicas, siguiendo la trayectoria de las plaquetas; en las otras direcciones, delaminación y micro padeo bajo compresión. Sin embargo, es necesario observar las imágenes de MEB y observar si las otras direcciones sufren fractura tortuosa, tal y como informa Menig et al. [119].

Extrapolando este tipo de fallo a otros materiales, es posible encontrar una amplia literatura sobre una estructura no orgánica de ladrillo y mortero, como la mampostería [125, 126, 127, 128, 129]. Las investigaciones de estas estructuras incluyen ensayos mecánicos de fuerzas normales uniaxiales a su superficie, tanto en compresión como en tracción, ensayos de cizallamiento, flexión, y análisis de fractura, en los que el fallo por compresión en el que se aplica una carga en las mismas direcciones de este estudio sufre un fallo similar al de las probetas de estructura nacarada, como se muestra en la figura 4.2.

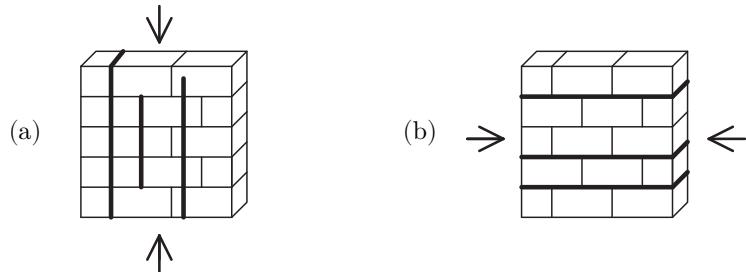


Figura 4.2. Modos de fallo para ensayos de compresión uniaxial en probetas de mampostería. (a) Partición en columnas, (b) partición en capas de una o varias filas de mampostería. Figura adaptada de la investigación de Lishak et al. [127].

El espécimen de la figura 4.2a, comparado con la muestra de nácar (figura 3.6), correspondería a ejercer una fuerza perpendicular a su superficie en la dirección del espesor (d_e). La figura 4.2b, por otro lado, se compara con ejercer la fuerza de carga en la dirección radial (d_l) o tangencial (d_t). Para ambos casos, el modo de fallo es muy similar al del espécimen utilizado en este estudio. Por tanto, debido a este efecto macroscópico, se realiza un análisis de la microestructura de la muestra mediante tecnología MEB.

Cabe recalcar que esta última observación sobre las características de fallo de la mampostería es una simple curiosidad, pero invita a realizar futuras investigaciones en el sentido inverso, es decir, que se considere la microestructura del *P. purpuratus* para futuras macro estructuras en el ámbito ingenieril.

4.2.2. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

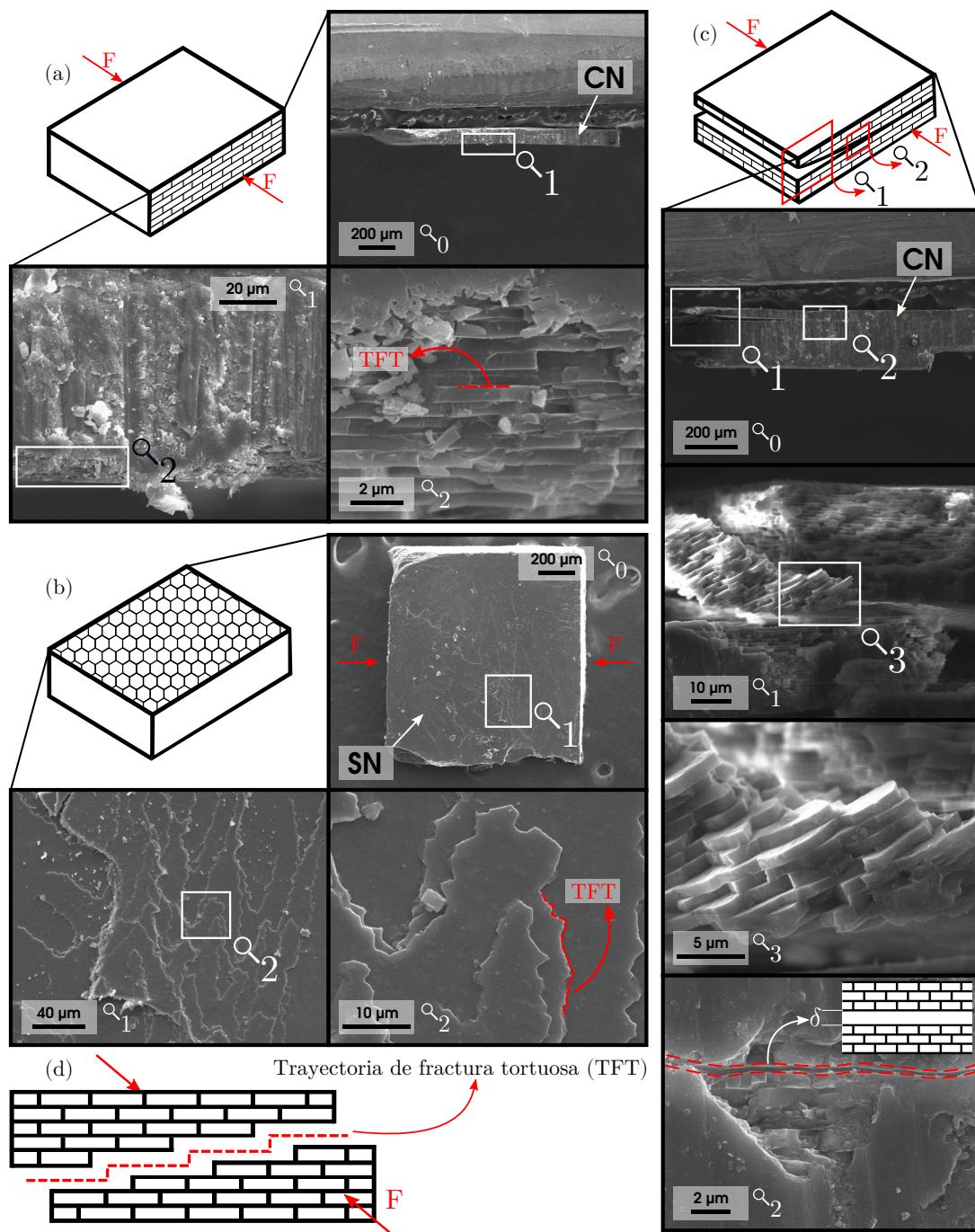


Figura 4.3. Imágenes MEB de la muestra al final del ensayo de compresión en las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t). (a)Imagen en la superficie de la capa nacarada (SN), (b) imagen en la sección transversal de la capa (CN), (c) muestra con delaminación incompleta, cuyo origen de fractura tiene una separación de "ladrillos"de aragonito de δ , (d) trayectoria de fractura tortuosa (TFT). F: dirección de la fuerza aplicada.

En las imágenes de MEB se aprecia una superficie de fractura tortuosa (fig. 4.3a), que se observa en la misma dirección que la fuerza aplicada (F) en las muestras comprimidas en las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t). Las microláminas están formadas por baldosas hexagonales que se muestran en la figura 4.3by, al observar la superficie de fractura a mayor aumento, se revela un recorrido de fractura tortuosa (4.3d), tal como observó Menig et al. [119] en su investigación.

Las imágenes revelan que la dirección de la trayectoria de fractura es perpendicular a la fuerza aplicada en compresión (F). Esto se puede corroborar en la figura 4.3c, que es una muestra que sufrió delaminación en más de un plano, y uno de ellos estaba incompleto, por lo que es posible observar el recorrido de la fractura. En el origen, hay una separación de las baldosas a una distancia δ (figura 4.3c.2), y al final de la fractura, hay una separación de los ladrillos de aragonito (figura 4.3c.1), incluyendo una columna inclinada como resultado del desprendimiento del material, como se muestra en la figura 4.3c.3.

4.2.3. Análisis de la superficie de fractura en el ensayo de flexo-compresión

Este ensayo (sección 3.4.2) se realiza para estudiar la estructura de la valva izquierda en el análisis de crecimiento de valvas (sección 3.3). Los resultados otorgados por el ensayo corresponden a la rigidez de la valva bajo las solicitudes de la flexo-compresión (K), la fuerza máxima soportada bajo la compresión del punzón al alcanzar la rotura de la concha (F_{max}) y el desplazamiento máximo vertical de la zona comprimida (d_{max}), la cual corresponde a la zona más alta de la concha (fig. 3.9). Las curvas obtenidas se detallan en el apéndice A.2, en ellas se observa que la concha es un material elástico lineal, una gran cantidad de ensayos presentan una curvatura en su inicio provocado por un acomodamiento de la valva, es decir, la base utilizada para la flexo-compresión no logra frenar el efecto de fricción de forma rigurosa. Este efecto es llamado **acomodamiento en compresión** en el presente trabajo. Se observó que los tamaños 1, 2, 3 y 4 no presentaban un patrón de rotura de la concha (fig. 4.4), en cambio, las valvas del tamaño 5 presentan un patrón particular observado en la mayoría de los casos.



Figura 4.4. Valvas menores al tamaño 5 después de ser sometidas al ensayo de flexo-compresión

En la figura 4.5 se observa que las valvas del tamaño 5 tienden a generar una fractura cuya grieta tiende a seguir la dirección radial (d_r), es decir, la valva se separa en la dirección tangencial (d_t) de la concha, la cual es fácil de apreciar en la figura 3.7.



Figura 4.5. Valvas del tamaño 5 después de ser sometidas al ensayo de flexo-compresión

Por último, se observa lo que parece ser una consecuencia del análisis realizado para la compresión uniaxial (sección 4.2.1), específicamente sobre la separación de la probeta al realizar la compresión en la dirección radial (d_r) y tangencial (d_t), es decir, una delaminación (fig. 4.6) al someter el material al esfuerzo máximo (σ_{max}) en tales direcciones (fig. 4.1).

En la figura 4.6 se aprecian las consecuencias del ensayo de flexo-compresión en la concha del molusco, específicamente en la zona que el punzón realizó contacto con la valva. Es posible notar que los efectos de pérdida del material son superficiales y localizados, coincidiendo con lo observado y descrito anteriormente.



Figura 4.6. Desprendimiento del material de la valva después de ser sometido al ensayo de flexo-compresión

4.2.4. Conclusiones de resultados de los ensayos mecánicos en la superficie de fractura

Los antecedentes generales recopilados entregan información valiosa en cuanto a la rotura estructural sufrida por la concha y su material.

Se concluye que la probeta sufre una rotura sin patrón específico en la dirección del espesor (d_e) al someter la probeta al ensayo de compresión uniaxial, en cambio la dirección radial (d_r) y tangencial (d_t) presentan patrones específicos, detallados en la figura 4.1, en que aparentemente el material sufre una falla por delaminación separando la probeta en dos, de tal forma que la estructura nacarada queda dividida a partir de sus láminas. Esto se corrobora con lo observado en el ensayo de flexo-compresión, en el cual la concha sufre pérdida de material en un sector localizado, coincidente con el punto de contacto punzón-valva (fig. 4.6). Además, la estructura nacarada también explicaría el comportamiento de rotura en la dirección del espesor (d_e), debido a que no existe la separación uniforme de las láminas como en las demás direcciones, resultando en una probeta pulverizada o con roturas sin ninguna dirección en específico. Para complementar este análisis se emplean simulaciones numéricas con el fin de corroborar el modelo utilizado y los efectos producidos por la compresión de la valva (ensayo de flexo-compresión), por ejemplo, la delaminación (sección 5.6.6).

4.3. Análisis de la simetría de valvas

A continuación se presenta la metodología utilizada para evaluar la hipótesis de si la valva izquierda y derecha del *P. purpuratus* presenta una simetría en el comportamiento mecánico del material de su concha, diferencias entre zonas (fig. 3.1) y en el tamaño del individuo mediante resultados estadísticos y sus respectivas conclusiones.

4.3.1. Metodología de análisis comparativo para simetría de valvas

Para evaluar las diferencias del módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}) en las conchas del *P. purpuratus*, los datos fueron analizados mediante un Análisis de Covarianza Factorial (**ANCOVA**) usando el grosor de la valva de cada individuo como covariante debido a que, a medida que el individuo envejece, el grosor también crece independiente de la geografía [130], siendo un factor en la estructura de la concha. Se compararon estas propiedades mecánicas entre las valvas izquierda y derecha, para 5 rangos de tamaño y 3 zonas (Z_1 , Z_2 y Z_3) de las valvas (sección 3.2), considerando estas variables como factores fijos. Se realizó la prueba de **Tukey** para evaluar qué niveles de los factores individuales generaban las diferencias significativas. Se evaluaron los supuestos de **ANCOVA** sobre los residuos del modelo completo. Tanto el gráfico de residuos como la prueba de heterogeneidad de varianzas no mostraron fuertes desviaciones de lo esperado. El análisis fue implementado utilizando **GLM** (*general linear model*) en el software *Minitab* [131].

La regresión lineal corrobora el comportamiento elástico lineal, y también se observa que el material es frágil, es decir, sin zona plástica. Las curvas con su respectiva desviación estándar para cada grupo pueden verse en la figura 4.7; muestran una aparente simetría de las propiedades mecánicas entre las valvas izquierda y derecha para todos los grupos de edad/tamaño, y una disminución o deterioro de las propiedades mecánicas de la dirección del espesor (d_e) a medida que el molusco envejece, tanto en el esfuerzo máximo (σ_{max}) como en la deformación máxima (ε_{max}). Las demás direcciones no muestran un deterioro de las propiedades mecánicas a primera vista, por lo que es necesario recurrir al análisis estadístico.

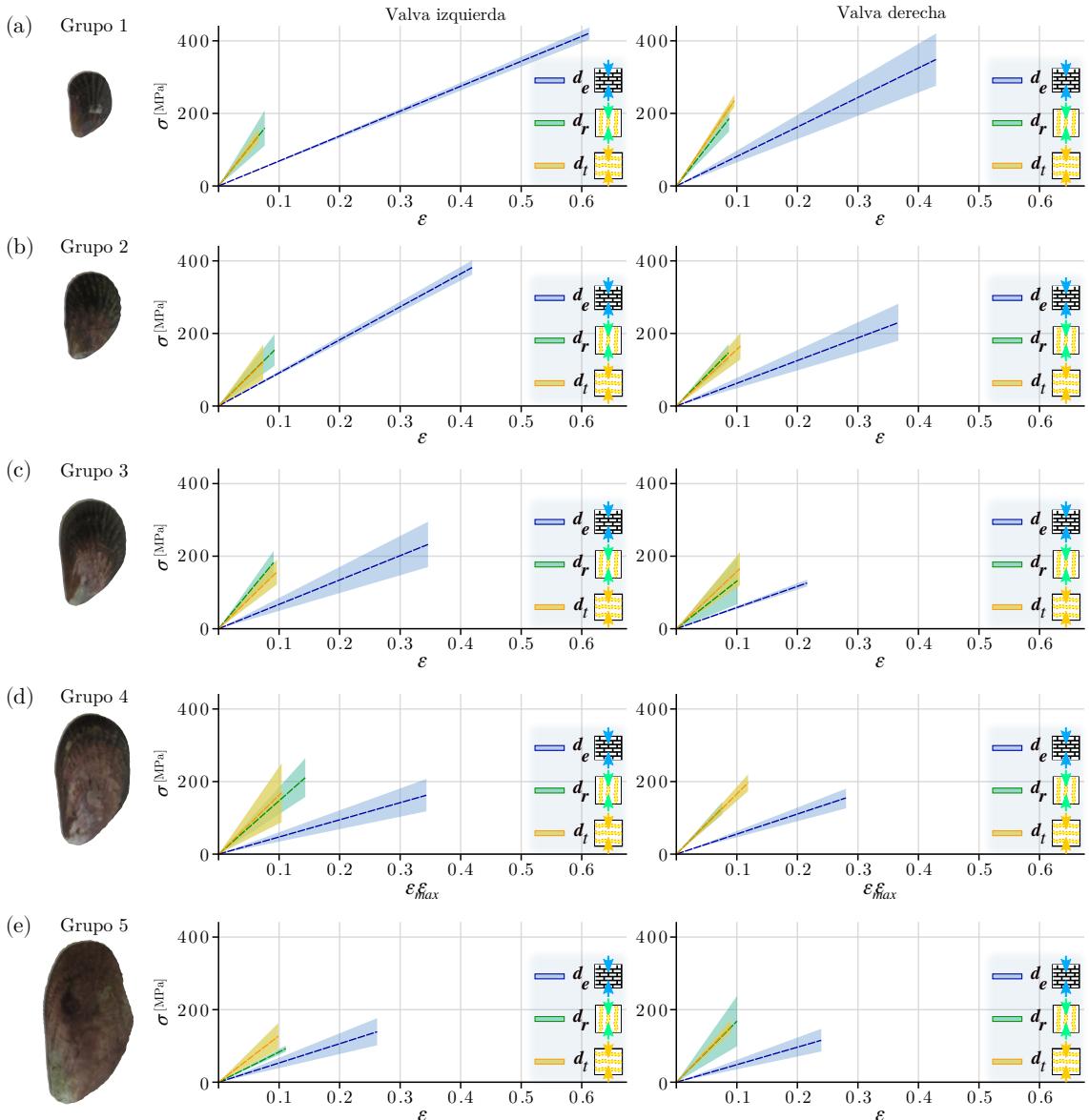


Figura 4.7. Desviación estándar (SD) de la curva esfuerzo-deformación de los cinco grupos (con una representación de la valva derecha de cada grupo) para las valvas izquierda y derecha en sus respectivas direcciones ortótropas del material; espesor (d_{th}), radial (d_r) y tangencial (d_{tr}). (a) grupo 1, (b) grupo 2, (c) grupo 3, (d) grupo 4, (e) grupo 5.

4.3.2. Resultados del módulo elástico (*E*) para la simetría de valvas

El **módulo elástico** (*E*) no presentó diferencias significativas al comparar ambas valvas (izquierda y derecha) y las 3 zonas en las que fue dividida (Tabla 4.1). Los factores tamaño (*T*) y dirección (*d*) de la compresión mostraron diferencias significativas entre los niveles de variación de cada factor. Por lo tanto, hubo una diferencia significativa entre al menos 2 direcciones de ortotropía del material (*d*), no hubo diferencias entre las 3 zonas (*Z*) y la valva izquierda y derecha (*V*) para el módulo elástico (*E*).

Posterior a este análisis se realizó la prueba de **Tukey**, la que reveló que existían diferencias entre la dirección del espesor (*d_e*) y las direcciones de compresión radial (*d_r*) y tangencial (*d_t*) significativamente menor (*p* < 0,05). Entre las direcciones radial (*d_r*) y tangencial (*d_t*) no hubo diferencias significativas (figura 4.8 y 4.9). Los tamaños (*T*: 1 – 5) de los individuos revelan diferencias significativas en el módulo elástico (*E*) en las 3 direcciones hasta el tamaño 3 (*p* < 0,05), es decir, los tamaños 1, 2 y 3 presentan diferencias para la dirección del espesor (*d_e*) de la forma: (1 < 2) > 3 = 4 = 5, la dirección radial (*d_r*) de la forma: (1 = 2 < 3) > 4 = 5, y la dirección tangencial (*d_t*) de la forma 1 = 2 = 3 > 4 = 5. Por lo tanto, en general los 3 módulos elásticos se mantienen con un valor un poco mayor en los primeros 3 tamaños con pequeñas variaciones, para después disminuir y ser constantes en los tamaños 4 y 5. No se observaron grandes diferencias en términos de magnitud a partir del tamaño.

Tabla 4.1. Resultado ANCOVA para Módulo elástico (*E*). El Grosor (*G*) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (*T*); en las valvas (*V*) izquierda y derecha; en 3 zonas de las valvas (*Z*) y en 3 dirección de compresión (*d*). *GL* = Grados de Libertad; *SC* = Suma de cuadrados; *F* = Razón *F*; *p* = *p*-valor

Módulo elástico (<i>E</i>)				
Fuente de Variacion	<i>GL</i>	<i>SC</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Grosor (<i>G</i>)	1; 179	8482661	36,85	<0,001
Tamaño (<i>T</i>)	4; 179	2231018	9,69	<0,001
Valva izq, o der, (<i>V</i>)	1; 179	392566	1,71	0,193
Zona (<i>Z</i>)	2; 179	429319	1,87	0,158
Dirección (<i>d</i>)	2; 179	39192966	170,27	<0,001
<i>T</i> x <i>V</i>	4; 179	182587	0,79	0,531
<i>T</i> x <i>Z</i>	8; 179	109154	0,47	0,873
<i>T</i> x <i>d</i>	8; 179	183583	0,8	0,605
<i>V</i> x <i>Z</i>	2; 179	118832	0,52	0,598
<i>V</i> x <i>d</i>	2; 179	71727	0,31	0,733
<i>Z</i> x <i>d</i>	4; 179	351214	1,53	0,197
<i>T</i> x <i>V</i> x <i>Z</i>	8; 179	22719	0,1	0,999
<i>T</i> x <i>V</i> x <i>d</i>	8; 179	91868	0,4	0,920
<i>T</i> x <i>Z</i> x <i>d</i>	16; 179	205562	0,89	0,578
<i>V</i> x <i>Z</i> x <i>d</i>	4; 179	245962	1,07	0,374
<i>T</i> x <i>V</i> x <i>Z</i> x <i>d</i>	16; 179	73345	0,32	0,995

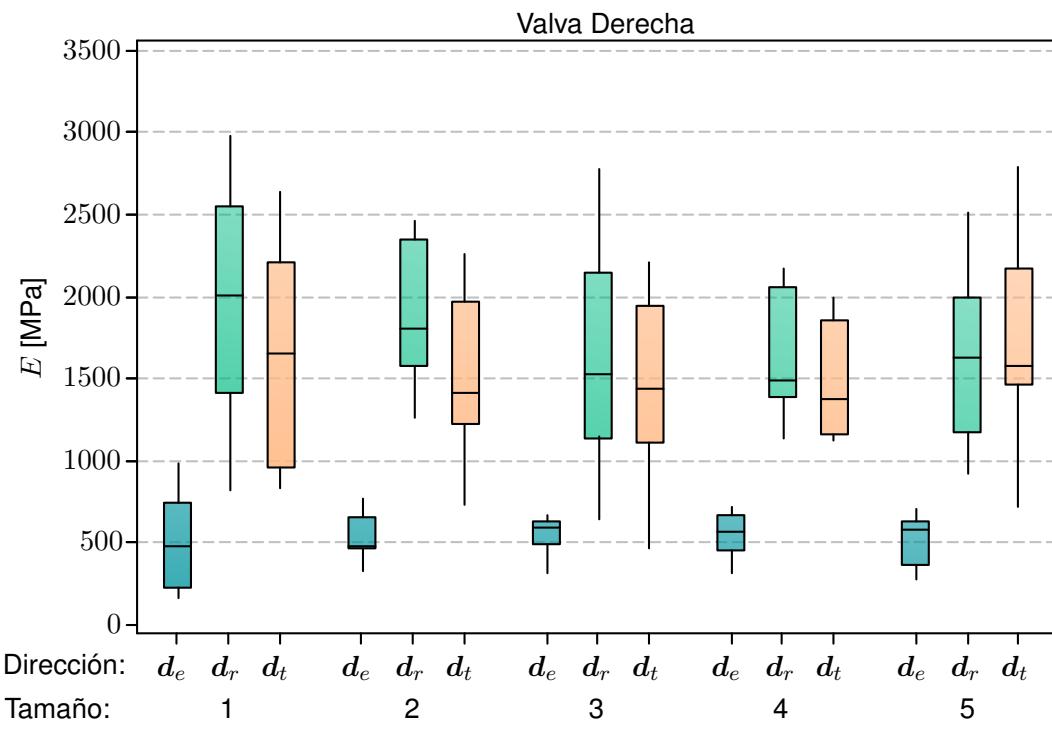


Figura 4.8. Modulo elástico (E) evaluado sobre la valva derecha de *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t)

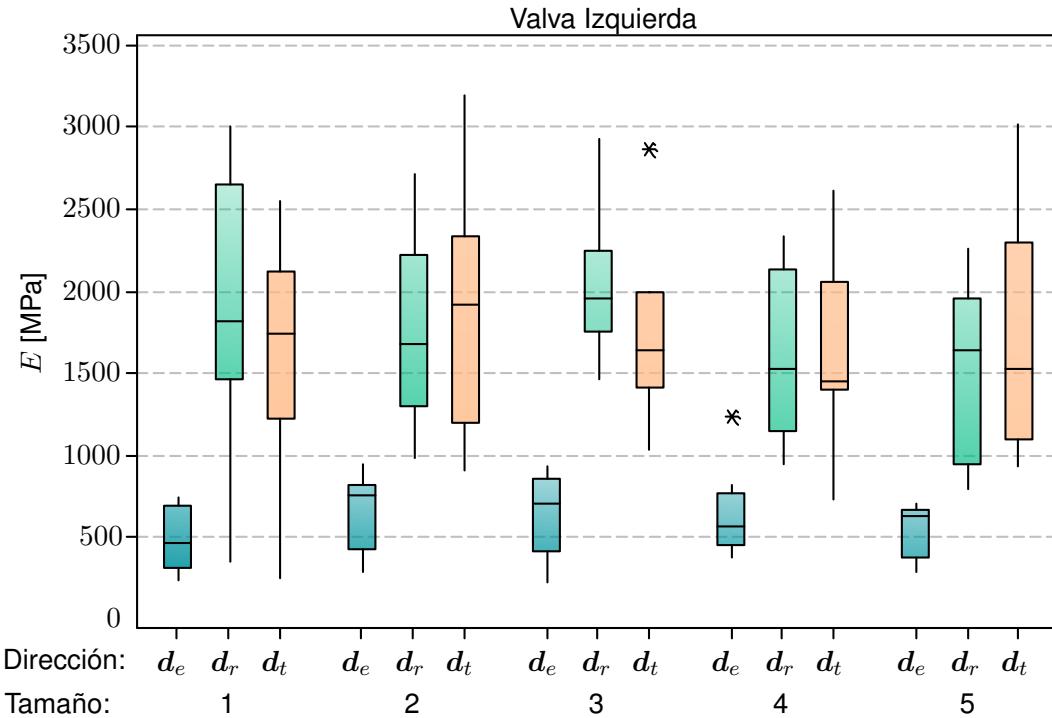


Figura 4.9. Modulo elástico (E) evaluado sobre la valva izquierda de *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (*): valores extremos de la distribución

4.3.3. Resultados del esfuerzo máximo (σ_{max}) para la simetría de valvas

El **esfuerzo máximo** (σ_{max}) no presentó diferencias significativas al comparar ambas valvas (izquierda y derecha) y las 3 zonas en las que fue dividida (Tabla 4.2). Los factores tamaño (T) y dirección (d) de la compresión mostraron diferencias significativas entre los niveles de variación de cada factor. Por lo tanto, hubo una diferencia significativa entre al menos 2 direcciones de ortotropía del material (d), no hubo diferencias entre las 3 zonas (Z) y la valva izquierda y derecha (V).

Posterior a este análisis se realizó la prueba de **Tukey**, la cual reveló que existían diferencias significativas entre la dirección del espesor (d_e) y la dirección de compresión tangencial (d_t), siendo el esfuerzo máximo (σ_{max}) de la dirección del espesor (d_e) soportado antes de la rotura del material significativamente mayor ($p < 0,05$) a la soportada en la dirección tangencial (d_t). Entre las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t), y radial (d_r) y espesor (d_e) no hubo diferencias significativas (figuras 4.10 y 4.11). Se observa que el valor del esfuerzo máximo (σ_{max}) para la dirección radial (d_r) se encuentra en el rango de las otras dos direcciones, por lo tanto, de mayor a menor, los valores del esfuerzo máximo (σ_{max}) se distribuyen de la forma $d_e > d_r > d_t$. Los tamaños de los individuos revelan diferencias para el esfuerzo máximo (σ_{max}) en la dirección del espesor (d_e), de la forma: $1 = 2 > 3 > 4 > 5$ ($p < 0,05$). Las demás direcciones no presentan diferencias significativas a partir del tamaño.

Tabla 4.2. Resultado ANCOVA para Esfuerzo máximo (σ_{max}). El Grosor (G) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (T); en las valvas (V) izquierda y derecha; en 3 zonas de las valvas (Z) y en 3 dirección de compresión (d). GL = Grados de Libertad; SC = Suma de cuadrados; F = Razón F; p = p -valor

Esfuerzo máximo (σ_{max})				
Fuente de Variacion	GL	SC	F	p
Grosor (G)	1; 179	116753	21,82	<0,001
Tamaño (T)	4; 179	35405	6,62	<0,001
Valva izq, o der, (V)	1; 179	11361	2,12	0,147
Zona (Z)	2; 179	1069	0,2	0,819
Dirección (d)	2; 179	25728	4,81	0,009
$T \times V$	4; 179	2473	0,46	0,763
$T \times Z$	8; 179	8699	1,63	0,120
$T \times d$	8; 179	8992	1,68	0,106
$V \times Z$	2; 179	2086	0,39	0,678
$V \times d$	2; 179	11000	2,06	0,131
$Z \times d$	4; 179	9821	1,84	0,124
$T \times V \times Z$	8; 179	2460	0,46	0,883
$T \times V \times d$	8; 179	4409	0,82	0,583
$T \times Z \times d$	16; 179	4794	0,9	0,575
$V \times Z \times d$	4; 179	5454	1,02	0,399
$T \times V \times Z \times d$	16; 179	4585	0,86	0,620

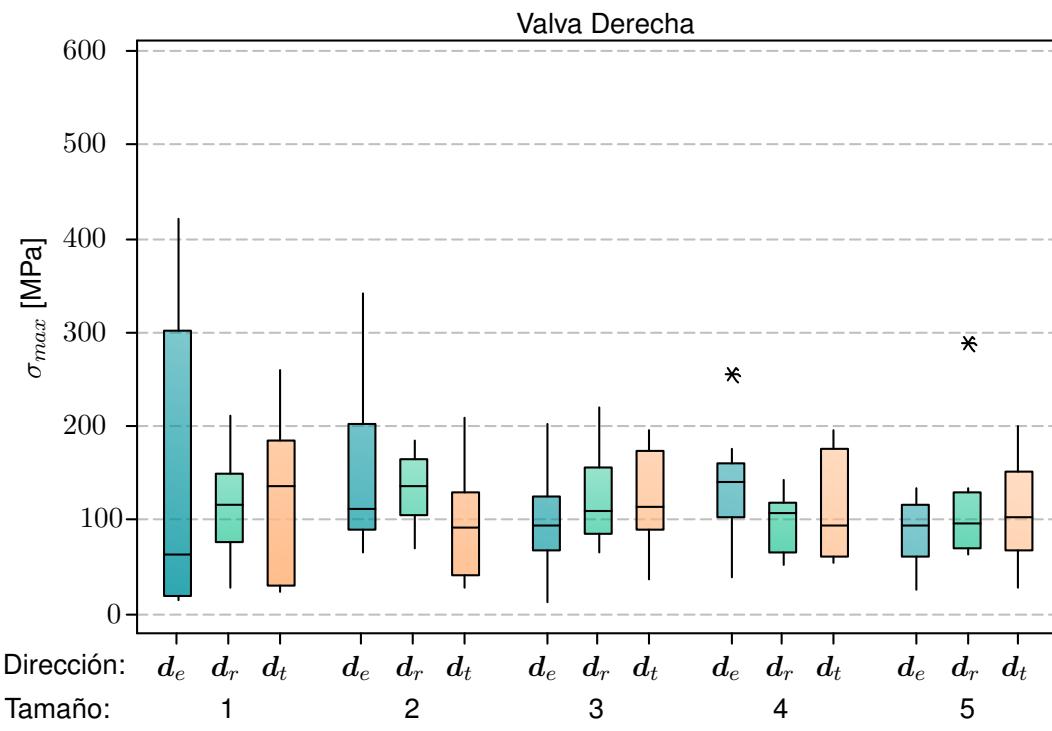


Figura 4.10. Esfuerzo máximo (σ_{max}) evaluado sobre la valva derecha de *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (*): valores extremos de la distribución

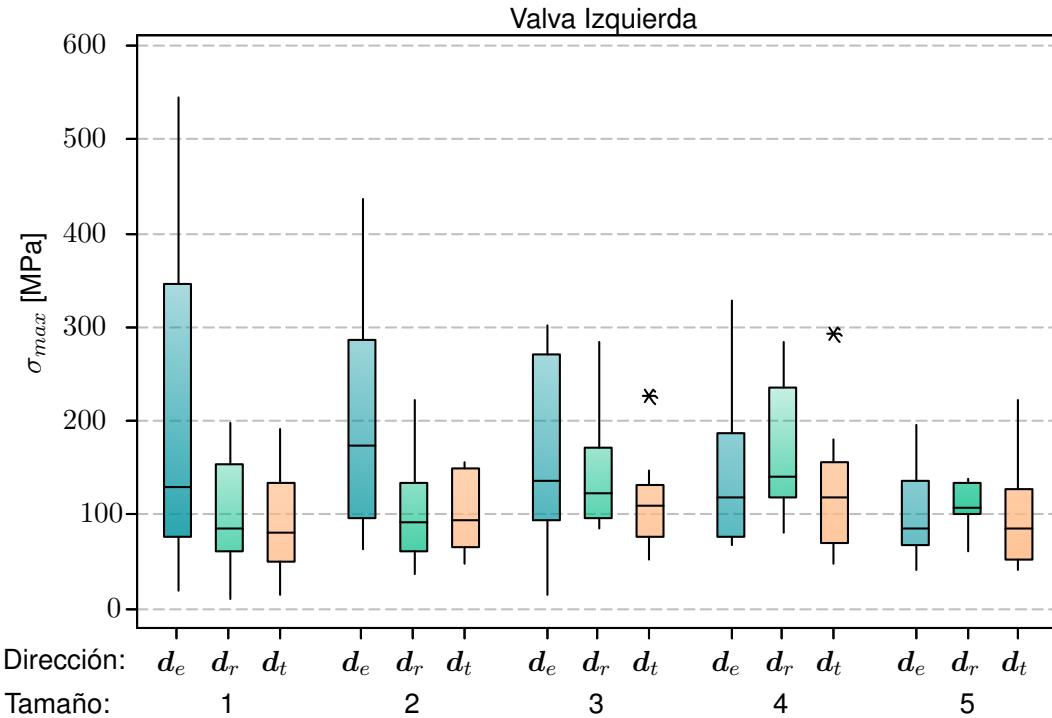


Figura 4.11. Esfuerzo máximo (σ_{max}) evaluado sobre la valva izquierda de *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (*): valores extremos de la distribución

4.3.4. Resultados de la deformación máxima (ε_{max}) para la simetría de valvas

La **deformación máxima** (ε_{max}) no presentó diferencias significativas al comparar ambas valvas (izquierda y derecha), las 3 zonas en las que fue dividida y en sus tamaños en general, aunque sí presentó diferencias al observar el tamaño y dirección juntos (Tabla 4.3). El factor dirección (d) de la compresión refleja diferencias significativas entre los niveles de variación de cada factor. Por lo tanto, hubo una diferencia significativa entre al menos 2 direcciones de ortotropía del material (d), no hubo diferencias entre las 3 zonas (Z), la valva izquierda y derecha (V), y los tamaños (T) en general.

Posterior a este análisis se realizó la prueba de **Tukey**, la que reveló que existían diferencias entre la dirección del espesor (d_e) y las direcciones de compresión radial (d_r) y tangencial (d_t) significativamente mayor ($p < 0,05$), es decir, la deformación máxima (ε_{max}) antes de la rotura es mayor en la dirección del espesor (d_e) que en las otras 2 direcciones. Entre las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t) no hubo diferencias significativas (figura 4.12 y 4.13). Se observa que el valor de la deformación máxima (ε_{max}) para las 3 direcciones toma la forma $d_e > d_r = d_t$. Los tamaños de los individuos revelan diferencias para la deformación máxima (ε_{max}) en la dirección del espesor (d_e), de la forma $1 > 2 > 3 > 4 > 5$ ($p < 0,05$). Las demás direcciones no presentan diferencias significativas a partir del tamaño.

Tabla 4.3. Resultado ANCOVA para Deformación máxima (ε_{max}). El Grosor (G) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (T); en las valvas (V) izquierda y derecha; en 3 zonas de las valvas (Z) y en 3 dirección de compresión (d). GL = Grados de Libertad; SC = Suma de cuadrados; F = Razón F; p = *p*-valor

Deformación máxima (ε_{max})				
Fuente de Variacion	GL	SC	F	p
Grosor (G)	1; 179	0,010349	1,69	0,195
Tamaño (T)	4; 179	0,012374	2,03	0,093
Valva izq, o der, (V)	1; 179	0,015988	2,62	0,107
Zona (Z)	2; 179	0,006161	1,01	0,367
Dirección (d)	2; 179	0,940001	153,96	<0,001
$T \times V$	4; 179	0,003177	0,52	0,721
$T \times Z$	8; 179	0,009423	1,54	0,145
$T \times d$	8; 179	0,020345	3,33	0,001
$V \times Z$	2; 179	0,003939	0,65	0,526
$V \times d$	2; 179	0,019201	3,14	0,045
$Z \times d$	4; 179	0,00546	0,89	0,469
$T \times V \times Z$	8; 179	0,003062	0,5	0,854
$T \times V \times d$	8; 179	0,009067	1,49	0,165
$T \times Z \times d$	16; 179	0,00628	1,03	0,429
$V \times Z \times d$	4; 179	0,00171	0,28	0,891
$T \times V \times Z \times d$	16; 179	0,003485	0,57	0,903

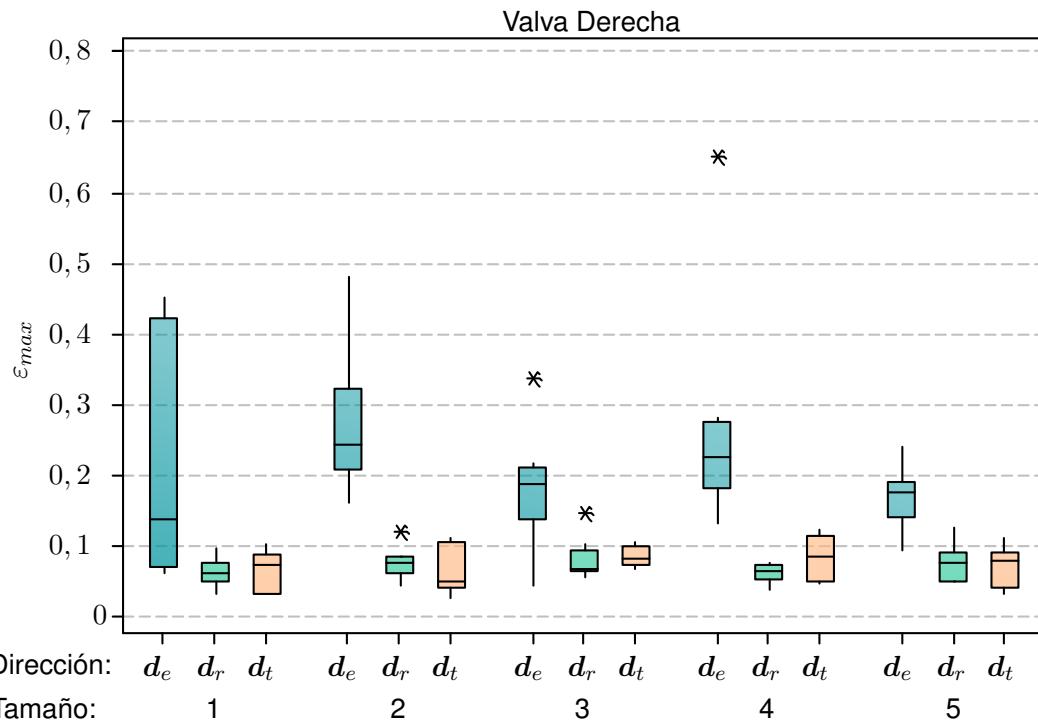


Figura 4.12. Deformación máxima (ε_{max}) evaluada sobre la valva derecha de *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (*): valores extremos de la distribución

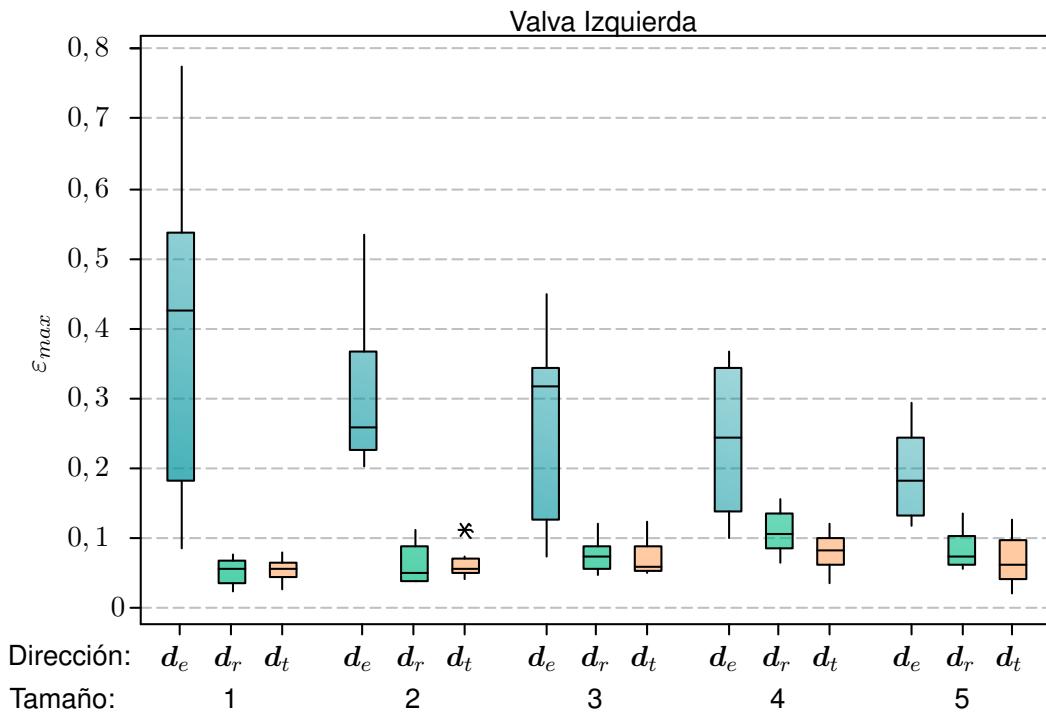


Figura 4.13. Deformación máxima (ε_{max}) evaluada sobre la valva izquierda de *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (*): valores extremos de la distribución

4.3.5. Conclusiones de resultados de simetría de valvas

El módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}) presentan diferencias entre la dirección del espesor (d_e) y las otras dos direcciones, excepto para el esfuerzo máximo (σ_{max}), que no presenta una diferencia significativa entre la dirección espesor (d_e) y radial (d_r). Entre las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t) no se presentaron diferencias significativas en ningún caso. Se observa que el **módulo elástico disminuye** a partir de un mayor tamaño de la concha para las **3 direcciones**. La **dirección del espesor** (d_e) presenta una **disminución para las otras dos propiedades mecánicas** (fig. 4.14). No se presentan diferencias entre la valva izquierda y derecha, tampoco entre las 3 zonas.

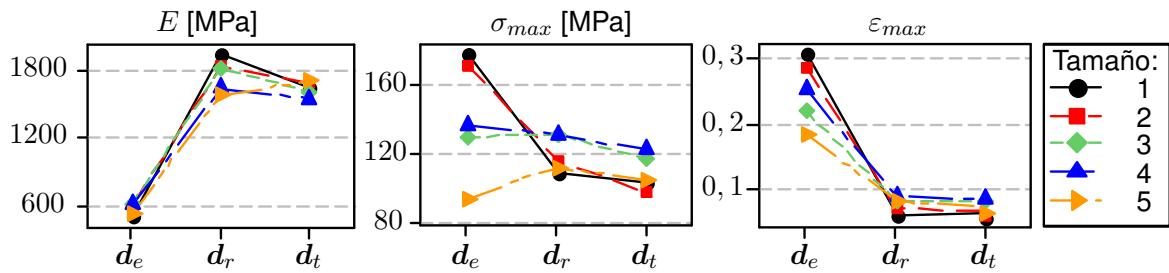


Figura 4.14. M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}) del *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t)

4.4. Análisis del crecimiento de valvas

A continuación se presenta la metodología utilizada para corroborar los resultados obtenidos en el análisis de la simetría de valvas (sección 4.3), además de obtener la curva de crecimiento de los individuos con el fin de estimar la edad de los moluscos provenientes de Quintay. Esta estimación se utiliza posteriormente para fortalecer la información entregada por el análisis estadístico, y así identificar las edades en la que los individuos presenten variaciones en su comportamiento mecánico, información que también es contrastada con los resultados de las simulaciones numéricas (sección 5.6.6).

Al igual que en el análisis de simetría de valvas (sección 4.3), se realizan ensayos de compresión uniaxial para contrastar las propiedades mecánicas a distintos tamaños (o edades gracias a la información entregada por la tasa de crecimiento de los individuos) de la concha derecha del *Perumytilus purpuratus*. Además, se añade el ensayo de flexo-compresión para un análisis estructural utilizando la valva izquierda de los individuos.

Cabe destacar que la siguiente sección es una primera aproximación a la tasa de crecimiento del molusco, la cual sólo considera el largo de la concha, la que servirá para futuros estudios al mejorar el modelo.

4.4.1. Curva de crecimiento

La curva representativa del tiempo de vida del *Perumytilus purpuratus* se estima a partir de la tasa de crecimiento, la cual es obtenida mediante la medición del largo inicial y final del molusco en un lapso de tiempo de 3 meses (sección 3.3).

La metodología empleada para la obtención de la curva requiere, en primer lugar, calcular la curva $\frac{dt}{dl}$, es decir, el tiempo necesario para aumentar en una unidad de longitud el largo de la concha. Para este ejercicio el tiempo se considera en meses y el crecimiento corresponde a la variación de longitud del largo de la concha. De esta forma, y utilizando un ajuste exponencial debido a que a medida que el individuo envejece el crecimiento de su concha es cada vez menor, como lo menciona [Riisgård et al.](#) en su estudio [132], la ecuación representativa de la tasa de crecimiento es:

$$\frac{dt}{dl} = 0,303e^{(0,112x)} \quad (4.1)$$

En la figura 4.15 se aprecia el ajuste exponencial a los puntos representativos de la tasa de crecimiento del largo de la concha en 3 meses. Se observa que un individuo de mayor tamaño requiere una mayor cantidad de tiempo para crecer, o viendo la curva de forma inversa, a mayor tamaño del individuo (o mayor edad) su crecimiento se detiene (considerando que la ecuación 4.1 representa la tasa de crecimiento inversa).

La curva representativa de la edad se obtiene integrando la ecuación 4.1 de la forma:

$$t(l) = \int 0,303e^{(0,112x)} dl = 2,683e^{(0,112l)} + C \quad (4.2)$$

donde $t(l)$ representa la edad en meses de vida del molusco. La constante C , en este caso, no se considera debido a la falta de una condición inicial.

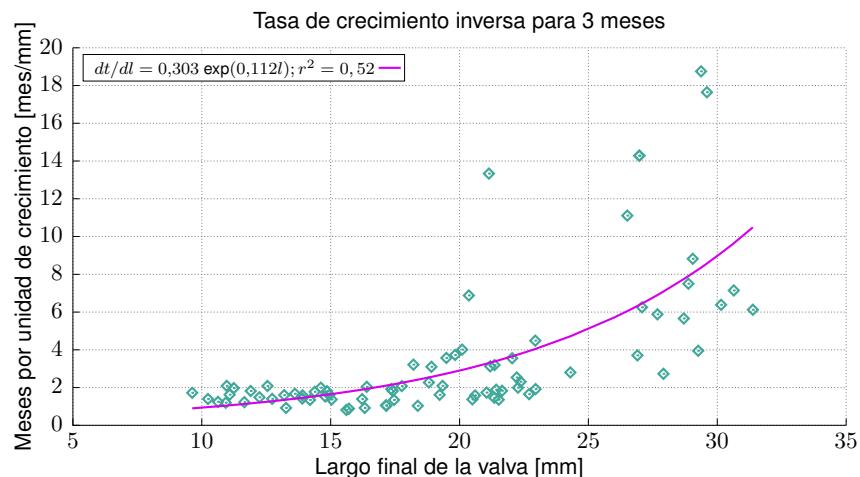


Figura 4.15. Tasa de crecimientos inversa en un tiempo de 3 meses para un determinado largo de valva

En la figura 4.16 se observa la curva dada por la ecuación 4.2, la cual representa la edad del *Perumytilus purpuratus* a partir de la longitud de su concha (tabla 4.4).

Tabla 4.4. Edad de los individuos de *P. purpuratus* a partir del largo de sus conchas

Tamaño	1	2	3	4	5
Edad [meses]	7-10	10-18	19-30	30-41	50-92



Figura 4.16. Curva representativa del tiempo de vida del *Perumytilus purpuratus* a partir del largo de su concha

4.4.2. Metodología de análisis comparativo para crecimiento de valvas

Para evaluar las diferencias del módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}) en el análisis de resistencia del material en la concha derecha, y la rigidez de la valva (K), fuerza de rotura (F_{max}) y el desplazamiento máximo (d_{max}) antes de la rotura en el análisis estructural para la concha izquierda del *Perumytilus purpuratus*, los datos fueron analizados mediante un Análisis de Covarianza Factorial (**ANCOVA**) usando el grosor de la valva de cada individuo como covariante debido a que, a medida que el individuo envejece, el grosor también crece independiente de la geografía [130], siendo un factor considerable en la estructura de la concha. Se compararon estas propiedades mecánicas para 5 rangos de tamaños de las valvas (sección 3.3), considerando esta variable como factor fijo. Se realizó la prueba de **Tukey** para evaluar qué niveles de los factores individuales generaban las diferencias significativas. Se evaluaron los supuestos de **ANCOVA** sobre los residuos del modelo completo. Tanto el gráfico de residuos como la prueba de heterogeneidad de varianzas no mostraron fuertes desviaciones de lo esperado. El análisis fue implementado utilizando **GLM** (*general linear model*) en el software *Minitab* [131].

4.4.3. Resultados del módulo elástico (E) para el crecimiento de valvas

Para el **módulo elástico (E)**, considerando los factores tamaño (T) y dirección (d) de la compresión, se hallaron diferencias significativas entre los niveles de variación para cada factor. Por lo tanto, hubo una diferencia significativa entre al menos 2 direcciones de ortotropía del material (d).

Posterior a este análisis se realizó la prueba de **Tukey**, la que reveló que existían diferencias entre la dirección del espesor (d_e) y las direcciones de compresión radial (d_r) y tangencial (d_t) significativamente menor ($p < 0,05$). Entre las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t) no hubo diferencias significativas (figura 4.17). Los tamaños ($T: 1 - 5$) de los individuos no revelan diferencias significativas en el módulo elástico (E) en las 3 direcciones. De tal forma que, en general, los 3 módulos elásticos se mantienen con un valor constante a partir del tamaño (longitud del largo y grosor de la concha).

Tabla 4.5. Resultado ANCOVA para Módulo elástico (E). El Grosor (G) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariable. Se consideraron 5 rango de tamaños (T) y 3 direcciones de compresión (d). GL = Grados de Libertad; SC = Suma de cuadrados; F = Razón F; $p = p$ -valor

Módulo elástico (E)				
Fuente de Variacion	GL	SC	F	p
Grosor (G)	1; 209	206446	1,41	0,237
Tamaño (T)	4; 209	181687	1,24	0,296
Dirección (d)	2; 209	62273865	423,94	<0,001
$T \times d$	8; 209	676258	4,60	<0,001

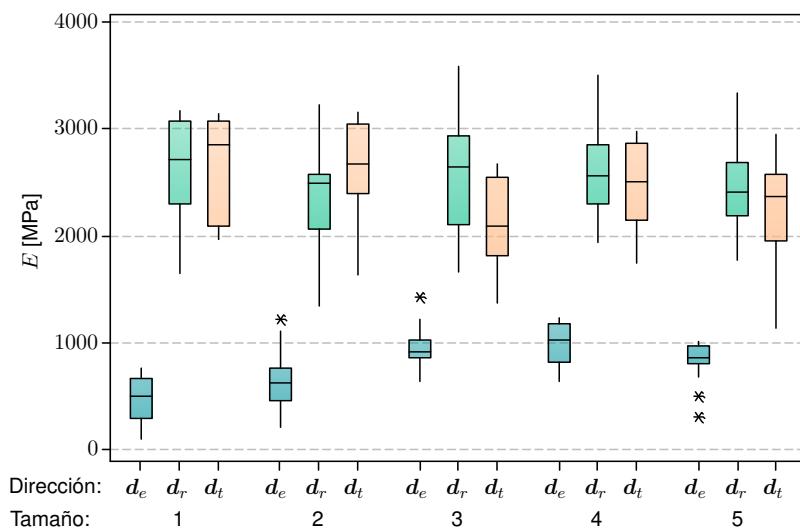


Figura 4.17. Módulo elástico (E) evaluado sobre la valva derecha de *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t). (*): valores extremos de la distribución

4.4.4. Resultados del esfuerzo máximo (σ_{max}) para el crecimiento de valvas

Para el **esfuerzo máximo** (σ_{max}), considerando los factores tamaño (T) y dirección (d), se hallaron diferencias significativas entre los niveles de variación para cada factor. Por lo tanto, hubo una diferencia significativa entre al menos 2 direcciones de ortotropía del material (d).

Posterior a este análisis se realizó la prueba de **Tukey**, la que reveló que existían diferencias entre la dirección del espesor (d_e) y las direcciones de compresión radial (d_r) y tangencial (d_t) significativamente menor ($p < 0,05$). Entre las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t) no hubo diferencias significativas (figura 4.18). Los tamaños (T : 1 – 5) de los individuos revelan diferencias significativas en el módulo elástico (E) en la dirección del espesor (d_e), de forma tal que a mayor tamaño (longitud del largo y grosor de la concha) la magnitud del esfuerzo máximo disminuye, excepto para los tamaños 1 y 2, los cuales no tuvieron diferencias significativas con el tamaño 5, por lo tanto, queda de representado de la siguiente forma: $3 > 4 > 5 = 2 = 1$. Las demás direcciones no mostraron diferencias significativas a partir del tamaño.

Tabla 4.6. Resultado ANCOVA para Esfuerzo máximo (σ_{max}). El Grosor (G) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (T) y 3 direcciones de compresión (d). GL = Grados de Libertad; SC = Suma de cuadrados; F = Razón F; p = p -valor

Esfuerzo máximo (σ_{max})				
Fuente de Variacion	GL	SC	F	p
Grosor (G)	1; 209	2227	0,70	0,405
Tamaño (T)	4; 209	36878	11,55	<0,001
Dirección (d)	2; 209	27097	8,49	<0,001
$T \times d$	8; 209	12314	3,86	<0,001

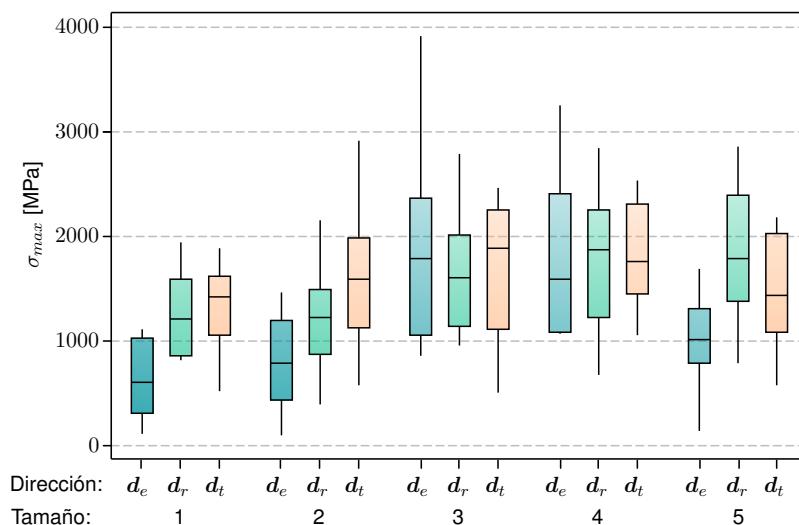


Figura 4.18. Esfuerzo máximo (σ_{max}) evaluado sobre la valva derecha de *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t)

4.4.5. Resultados de la deformación máxima (ε_{max}) en crecimiento de valvas

Para la **deformación máxima** (ε_{max}), considerando los factores tamaño (T) y dirección (d), se hallaron diferencias significativas entre los niveles de variación para cada factor. Por lo tanto, hubo una diferencia significativa entre al menos 2 direcciones de ortotropía del material.

Posterior a este análisis se realizó la prueba de **Tukey**, la que reveló que existían diferencias entre la dirección del espesor (d_e) y las direcciones de compresión radial (d_r) y tangencial (d_t) significativamente menor ($p < 0,05$). Entre las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t) no hubo diferencias significativas (figura 4.7). Los tamaños (T : 1 – 5) de los individuos revelan diferencias significativas en el módulo elástico (E) en la dirección del espesor (d_e), de forma tal que a mayor tamaño (longitud del largo y grosor de la concha) la magnitud del esfuerzo máximo disminuye, excepto para los tamaños 1 y 2, los cuales no tuvieron diferencias significativas con el tamaño 5, por lo tanto, queda de representado de la siguiente forma: $3 = 4 > 5 = 2 = 1$. Las demás direcciones no mostraron diferencias significativas con el tamaño.

Tabla 4.7. Resultado ANCOVA para Deformación máxima (ε_{max}). El Grosor (G) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (T) y 3 direcciones de compresión (d). GL = Grados de Libertad; SC = Suma de cuadrados; F = Razón F; p = p -valor

Deformación máxima (ε_{max})				
Fuente de Variacion	GL	SC	F	p
Grosor (G)	1; 209	0,0000048	0,004	0,846
Tamaño (T)	4; 209	0,014955	11,74	<0,001
Dirección (d)	2; 209	0,151451	118,90	<0,001
$T \times d$	8; 209	0,006283	4,93	<0,001

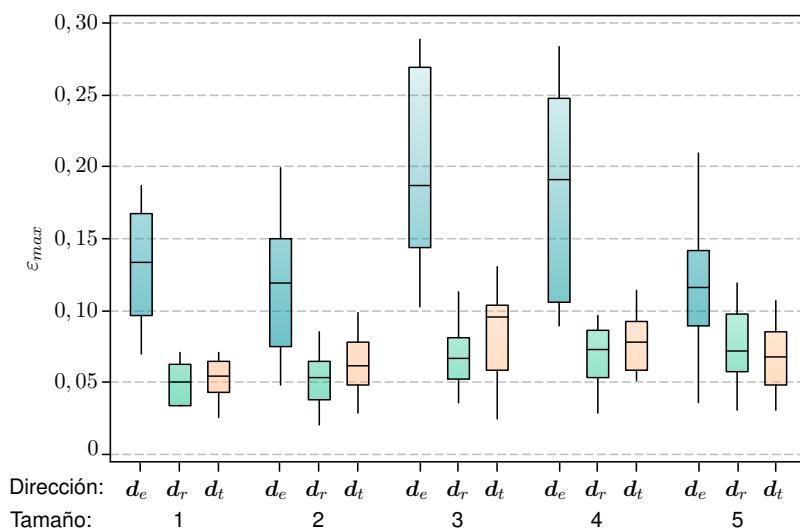


Figura 4.19. Deformación máxima (ε_{max}) evaluada sobre la valva derecha de *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) y compresiones realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t)

4.4.6. Resultados de la rigidez (K) para el crecimiento de valvas

La **rigidez** (K) presentó diferencias significativas al comparar los tamaños de las valvas ($p < 0,05$) mediante el método **ANCOVA**.

Posterior a este análisis se realizó la prueba de **Tukey**, la cual reveló diferencias entre los tamaños (T : 1 – 5) de los individuos, de la forma: $1 = 2 < 3 < 4 = 5$. De tal manera que, en general, la rigidez de la concha aumenta a partir del tamaño (longitud del largo y grosor de la concha) de los individuos (figura 4.20).

Tabla 4.8. Resultado **ANCOVA** para la Rigidez (K). El Grosor (G) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (T). GL = Grados de Libertad; SC = Suma de cuadrados; F = Razón F ; p = p -valor

Rigidez (K)				
Fuente de Variacion	GL	SC	F	p
Grosor (G)	1; 78	63642	2,21	0,141
Tamaño (T)	4; 78	377868	13,14	<0,001

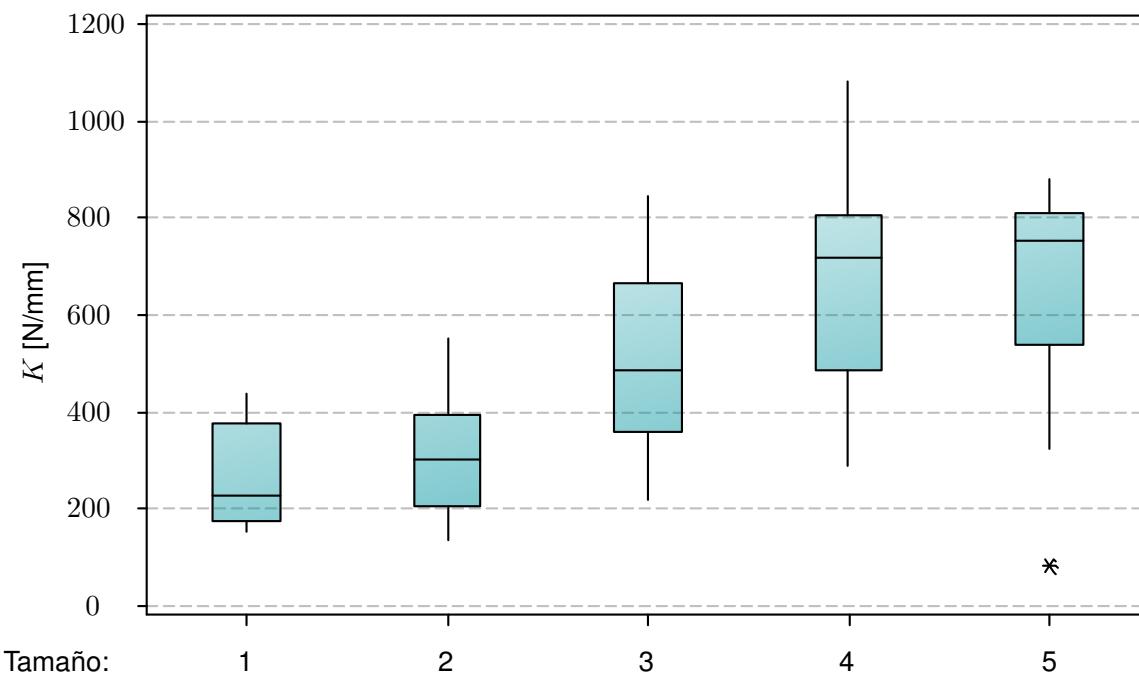


Figura 4.20. Rigidez (K) evaluada sobre la valva izquierda de *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5). (*): valores extremos de la distribución

4.4.7. Resultados de la fuerza máxima (F_{max}) para el crecimiento de valvas

La **fuerza máxima** (F_{max}) presentó diferencias significativas al comparar los tamaños de las valvas ($p < 0,05$) mediante el método **ANCOVA**.

Posterior a este análisis se realizó la prueba de **Tukey**, la cual reveló diferencias entre los tamaños (T : 1 – 5) de los individuos, de la forma: 1 = 2 = 3 < 4 = 5. De tal manera que, en general, la fuerza máxima soportada antes de la rotura de la concha aumenta a partir del tamaño (longitud del largo y grosor de la concha) de los individuos (figura 4.9).

Tabla 4.9. Resultado ANCOVA para la Fuerza máxima (F_{max}). El Grosor (G) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (T). GL = Grados de Libertad; SC = Suma de cuadrados; F = Razón F ; p = p -valor

Fuerza máxima (F_{max})				
Fuente de Variacion	GL	SC	F	p
Grosor (G)	1; 78	14	0,01	0,922
Tamaño (T)	4; 78	12403	8,66	<0,001

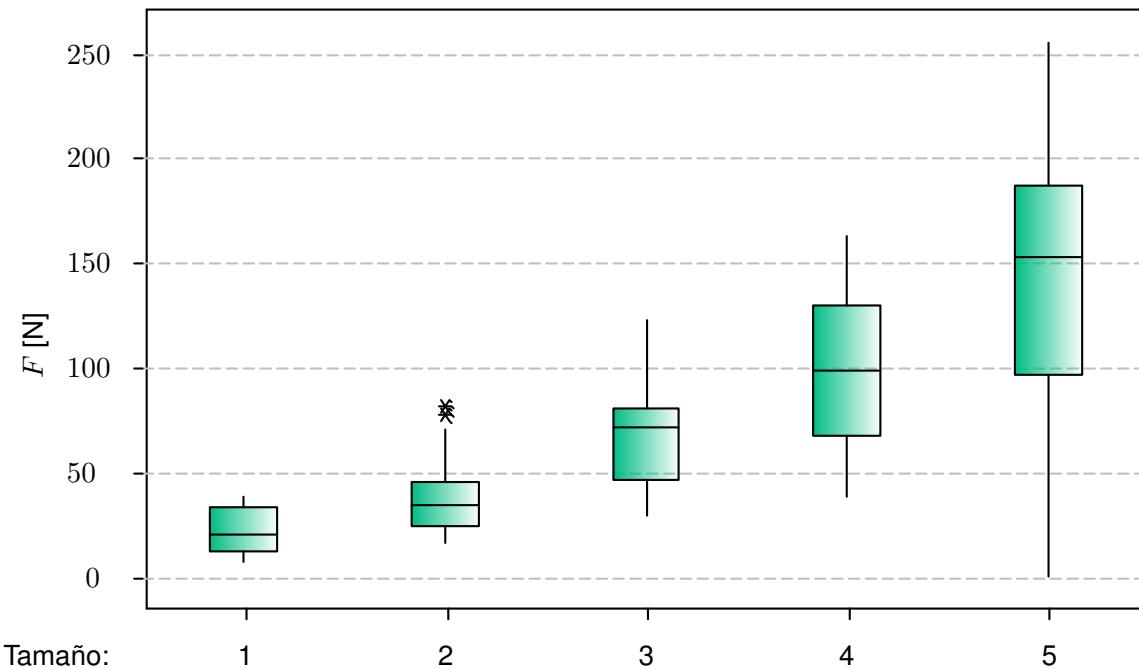


Figura 4.21. Fuerza máxima (F_{max}) evaluada sobre la valva izquierda de *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5). (*): valores extremos de la distribución

4.4.8. Resultados del desplazamiento máximo (d_{max}) para el crecimiento de valvas

El **desplazamiento máximo** (d_{max}) presentó diferencias significativas al comparar los tamaños de las valvas ($p < 0,05$) mediante el método **ANCOVA**.

Posterior a este análisis se realizó la prueba de **Tukey**, la cual reveló diferencias entre los tamaños ($T: 1 - 5$) de los individuos, de la forma: $1 < 2 = 3 = 4 = 5$. De tal manera que, en general, el desplazamiento máximo antes de la rotura de la concha no sufre mayores variaciones a partir del tamaño (longitud del largo y grosor de la concha) de los individuos (figura 4.22), es decir, aumenta mínimamente.

Tabla 4.10. Resultado ANCOVA para el Desplazamiento máximo (d_{max}). El Grosor (G) [mm] de la concha de cada individuo fue utilizado como covariante. Se consideraron 5 rango de tamaños (T). GL = Grados de Libertad; SC = Suma de cuadrados; F = Razón F; p = p -valor

Desplazamiento máximo (d_{max})				
Fuente de Variacion	GL	SC	F	p
Grosor (G)	1; 78	0,001515	0,47	0,493
Tamaño (T)	4; 78	0,008082	2,53	0,047

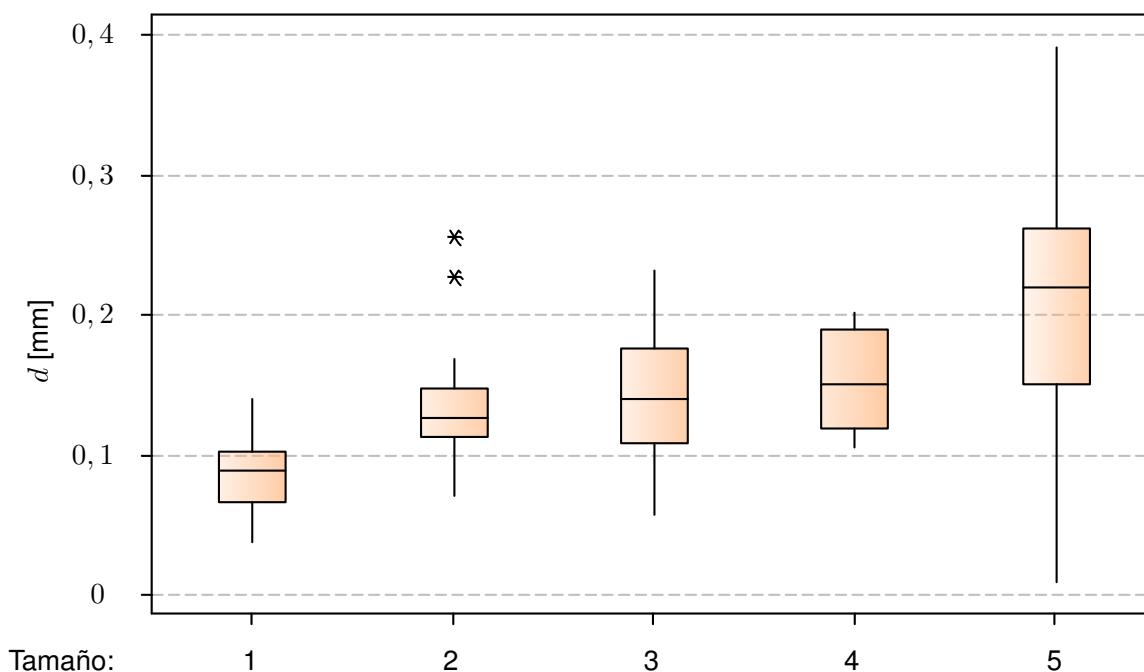


Figura 4.22. Desplazamiento máximo (d_{max}) evaluado sobre la valva izquierda de *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5). (*): valores extremos de la distribución

4.4.9. Conclusiones de resultados del crecimiento de valvas

El módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}) presentan diferencias entre la dirección del espesor (d_e) y las otras dos direcciones. Entre las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t) no se presentaron diferencias significativas en ningún caso. Se observa que el **módulo elástico** no presenta variaciones a partir de un mayor tamaño de la concha para las **3 direcciones**. Para las **otras dos propiedades mecánicas** y sólo en la **dirección del espesor** (d_e), estas disminuyen a partir de un mayor tamaño, aunque los tamaños 1 y 2 no presentan diferencias significativas con el tamaño 5 (fig. 4.23). Los resultados corroboran el estudio realizado para la simetría de valvas (sección 4.3.5), es decir, las propiedades mecánicas del material disminuyen en la dirección del espesor (d_e) a medida que el individuo envejece, aunque difiere en la respuesta mecánica de los primeros 2 tamaños, los cuales presentan bajas magnitudes en las 3 propiedades mecánicas. Esto puede ser debido a problemas de alimentación en los 3 meses que estuvieron en control, lo que explicaría por qué hubo una alta cantidad de individuos del tamaño 1 que perecieron sin signos de depredación (tabla 3.3), representada en una mortalidad aproximada del 68 %. En este lapso de tiempo se observó que la tasa de crecimiento fue mayor para el tamaño 1 y 2 en contraste con los demás tamaños, por lo tanto, se formó una mayor cantidad de material que en los tamaños mayores y, sumado a los problemas de alimentación, impidieron formar una concha con propiedades mecánicas acordes a su tamaño y edad. Esto podría ser un efecto de crecimiento bajo condiciones de estrés, cuya respuesta se manifiesta en peores propiedades mecánicas.

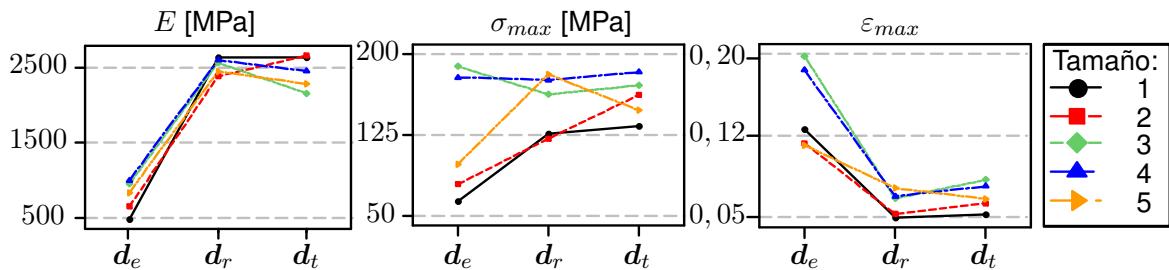


Figura 4.23. M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}) del *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales (1 – 5) realizadas en las 3 direcciones de ortotropía, espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t)

También se observa que, en general, la rigidez de la valva (K), fuerza de rotura (F_{max}) y el desplazamiento máximo (d_{max}) antes de la rotura aumentan con el tamaño o edad de los individuos, es decir, a mayor tamaño la resistencia estructural aumenta.

Este último resultado es peculiar, considerando que aunque las propiedades mecánicas del material empeoran con la edad, el *Perumytilus purpuratus* logra soportar una mayor carga bajo las solicitudes de la flexo-compresión al envejecer. Esto indica que la geometría de las conchas cumple un papel fundamental bajo ataques de depredación, tanto o más importante que las condiciones del material de sus valvas.

4.5. Conclusiones generales de los experimentos

Considerando ambos estudios, simetría de valvas (sección 4.3) y crecimiento de valvas (sección 4.4), es posible concluir que no se aprecian diferencias en el comportamiento mecánico en entre la valva izquierda y derecha y entre las zonas en que se dividió la concha del *P. purpuratus*. Se corrobora que el comportamiento mecánico material y estructural sufre variaciones mientras el individuo crece. Las propiedades del material para la dirección del espesor (d_e) disminuyen cuando el molusco envejece (módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max})), mientras que las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t) no sufren variaciones con la edad, tampoco presentan diferencias significativas en cuanto al comportamiento mecánico entre ellas. El estudio del crecimiento de valvas señala que los individuos de mayor edad poseen valvas más rígidas (K), soportan mayores cargas (F_{max}) y son capaces de tolerar mayores desplazamientos (d_{max}) del punto más alto de su valva (zona de contacto del punzón). Esto indica que, aunque las propiedades del material se vean afectadas negativamente a mayor edad en la dirección del espesor (d_e), la estructura de la concha es capaz de soportar mayores cargas sin llegar a la rotura. Mediante análisis de simulación numérica (capítulo 5) se analiza si la geometría de la concha es preponderante, tanto o más que las propiedades mecánicas, cuando de ataques por depredadores se trata.

Se observó que los tamaños 1 y 2 se vieron afectados negativamente en el comportamiento mecánico después de 3 meses de crecimiento, provocado quizás por falta de alimentación causada por la obstrucción de la apertura de la jaula en la cual se asentaron, ya sea por algas o arena (fig. 3.5), induciendo un crecimiento bajo estrés, situación común en este molusco (característica que le otorga el título de bioindicador debido a su sensibilidad a los cambios ambientales, sección 2.4). Esto indica que sería posible realizar mayores estudios del comportamiento mecánico bajo condiciones de cambio climático gracias a estas pruebas.

Es de consideración destacar la aparente falla por delaminación sufrida en la zona de contacto punzón-valva (fig. 4.24). Esto indica una concentración de esfuerzos en esa zona, sustentada por los resultados de la simulaciones (sección 5.6.6). Esto es posible corroborarlo mediante la microscopía electrónica de barrido (MEB) de la sección 4.2.2.

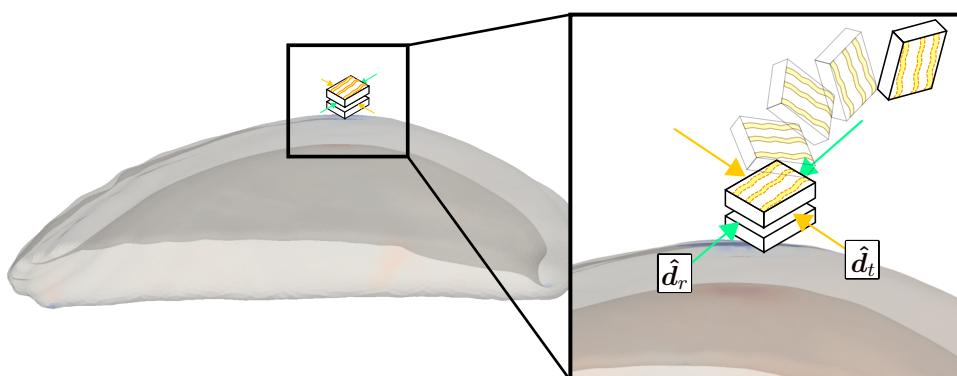


Figura 4.24. Pérdida de material debido a aparente falla por delaminación. Software *ParaView*

Capítulo 5

Simulaciones numéricas

5.1. Introducción

En este capítulo se presenta la caracterización de un modelo elástico lineal ortotropo utilizando **MEF** para el material de la concha del *Perumytilus purpuratus*. Se describen los resultados obtenidos de la modelación numérica de los cinco grupos de tamaños estudiados para las muestras provenientes de Quintay, Región de Valparaíso (sección 3.3). El ensayo modelado es el de flexo-compresión (sección 3.4.2), en que la geometría de la valva izquierda se obtiene mediante una microtomografía computarizada (Micro-CT modelo *SkyScan 1278*), empleando una malla constituida por elementos tetraédricos, mientras que el punzón, base y paredes son modelados como superficies de contacto (fig. 3.9). Las cinco valvas son seleccionadas aleatoriamente, correspondiente cada una a un grupo de los cinco tamaños (tabla 3.2). Los tres valores del módulo elástico representativos de las tres direcciones que caracterizan el material se obtienen de la valva derecha y, para este caso, se utiliza el protocolo del experimento de la simetría de valvas (capítulo 3.2), en que la valva derecha es dividida en tres zonas (fig. 3.1) con el fin de conseguir mayor precisión de los valores utilizados para la simulación. Además, considerando la geometría irregular de la valva, es creado un método novedoso para otorgar la ortotropía a cada elemento que conforma la malla de la concha.

El software de **MEF** utilizado corresponde a *Vulcan* [133], empleando el servidor ubicado en el Laboratorio de Biomecánica y Biomateriales, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Santiago de Chile, el cual se vale de un sistema operativo *Ubuntu 18.04 LTS*, un procesador *Intel(R) Core(TM) i9-9920X@ 3.50GHz* y *128Gb de memoria RAM DDR4 @ 2400MHz*, necesarios para resolver problemas de cálculo en paralelo (*PARDISO*).

El análisis de resultados numéricos es contrastado con los supuestos expuestos en los resultados experimentales (sección 4.5), es decir, se evalúa la resistencia estructural de la geometría perteneciente al *Perumytilus purpuratus* como factor predominante ante ataques de depredadores, junto a la posible concentración de esfuerzos en la zona contacto punzón-valva causante de la aparente falla por delaminación.

5.2. Selección de valvas

Los individuos a utilizar, para el próximo procesamiento en el Micro-CT, fueron seleccionados posterior a los 3 meses de duración del experimento de crecimiento (cap.3.3). Se escogieron 5 conchas del *Perumytilus purpuratus*, una por cada grupo de tamaño (en total 5 tamaños).

Tabla 5.1. Individuos seleccionados: Grupo de tamaño perteneciente, largo inicial previo a los 3 meses del experimento, y largo, altura, ancho y espesor al finalizar el experimento

Tamaño	Largo _i	Largo _f	Alto [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]
1	8,22	10,63	3,10	7,07	0,39
2	13,11	14,62	3,44	9,43	0,42
3	15,48	18,38	4,35	11,36	0,40
4	20,77	22,27	5,32	13,18	0,41
5	25,88	25,98	6,33	14,60	0,67

Las valvas de los cinco distintos tamaños se pueden observar en la figura 5.1, las cuales son procesadas y digitalizadas en el Micro-CT. Posterior a esto, los modelos tridimensionales son mallados con elementos tetraédricos (de cuatro nodos) y preparados para la simulación mediante **MEF**. Estos son seleccionados debido a que son fácilmente adaptables a geometrías complejas (como las de los sujetos de estudio), lo que resulta de gran ayuda al considerar las estrías, curvaturas y espesores variables de la concha. Además, la ortotropía del material es incorporada mediante un método novedoso desarrollado en el contexto de este trabajo. Las características y calidad de los elementos, la metodología de implementación de la ortotropía y el procedimiento de la simulación se presentan detalladamente más adelante.

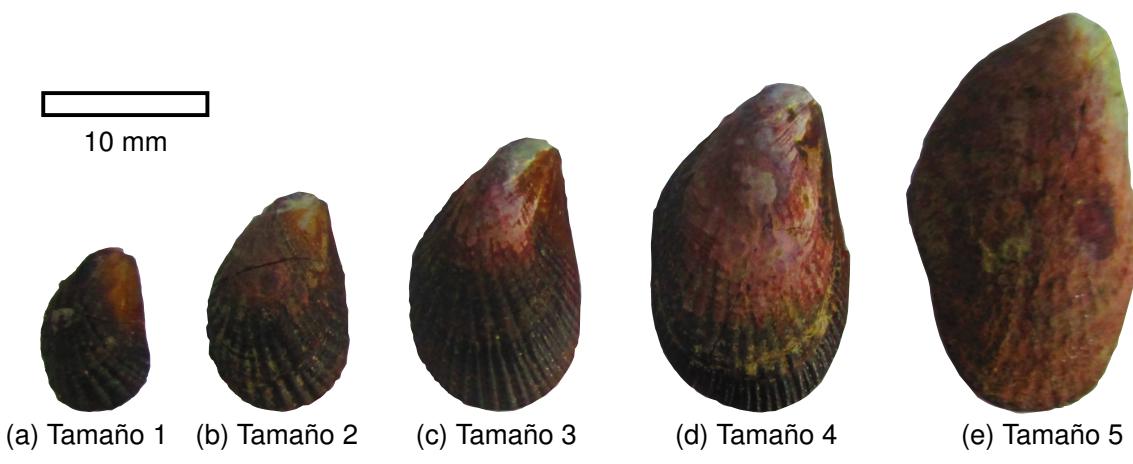
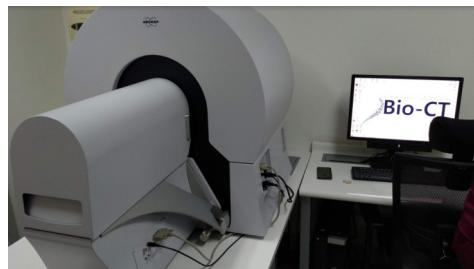


Figura 5.1. Valvas seleccionadas

5.3. Geometría de valvas

5.3.1. Microtomografía computarizada

Uno de los principales problemas de simulación numérica de materiales biológicos es la complejidad de su geometría, otorgando resultados insatisfactorios al diseñar mediante software tipo CAD un modelo fiel a la realidad. Por esta razón se ha optado utilizar la reconstrucción de imágenes de la tomografía de la concha para su reproducción digital. Este es realizado a partir de una microtomografía computarizada (Micro-CT modelo *SkyScan 1278* (fig. 5.2)), ubicado en el Departamento de Odontología Conservadora de la Universidad de Chile (FOUCH) mediante el proyecto **FONDEQUIP EQM 150010**, cuya resolución resulta en imágenes tomográficas computarizadas aplicadas a objetos pequeños con resoluciones nominales (tamaño de píxeles) en el rango de micrones o submicrones de 1-100 [μm] [134]. La tomografía entrega imágenes de la valva en formato *.tif* de toda su sección transversal.



(a) Micro-CT modelo *SkySkan 1278*



(b) Muestra de imagen de sección transversal de ambas valvas del molusco en formato *.tif* obtenida del Micro-CT

Figura 5.2. Micro-CT utilizado en la digitalización de las valvas

Se emplea el software *InVesalius* para el procesamiento de imágenes, programa de código abierto de reconstrucción de imágenes tomográficas y resonancia magnética [135]. El programa dispone de una herramienta de segmentación basada en la selección de umbrales o *threshold*; en este estudio se utiliza el umbral de un hueso compacto adulto (662-1988), predefinido en el software. Se ajuste con este umbral debido a que logra captar la totalidad de la valva, tal como se observa en la figura 5.3.

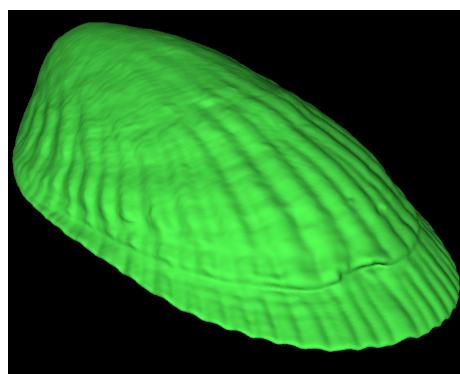


Figura 5.3. Reconstrucción de la concha mediante el software *InVesalius* [135]

5.3.2. Mallado de las valvas

EL software *InVesalius* entrega la geometría de la valva en un archivo formato *.stl*, el cual es necesario transformar a *.stp* para formar un sólido. Este proceso se realiza después de corregir errores que pudieran surgir de la reconstrucción inicial, ya sea agujeros o protuberancias no coincidentes con el modelo original. Estos surgen a partir de errores en el proceso de generación de imágenes en la microtomografía computarizada y en la reconstrucción a partir del programa *InVesalius*, pero son fácilmente corregidos en los software *MeshLab* [136] y *Meshmixer* [137], programas de código abierto orientados al procesamiento de mallas tridimensional, los cuales proporcionan un conjunto de herramientas que permiten limpiar, inspeccionar, renderizar, corregir y convertir este tipo de mallas. Posterior al análisis de las mallas en formato *.stl*, se procede a utilizar el software *Fusion 360*, programa enfocado en el modelado CAD 3D, creado por Autodesk, utilizando la licencia de estudiante por parte de la Universidad de Santiago de Chile. Con *Fusion 360* el trabajo se enfoca en suavizar la superficie de la valva, cambiar la cantidad de elementos nominales de la malla y proceder a convertir la malla a un sólido formato *.stp*.

Posterior a esto, se inicia el mallado de elementos finitos tetraédricos de cuatro nodos mediante el software *GiD* [138], un pre y post procesador universal para simulaciones numéricas en ciencia e ingeniería, en el cual se emplea la licencia perteneciente al Laboratorio de Biomecánica y Biomateriales de la Universidad de Santiago de Chile.

Debido a que la valva en la simulación es sometida a flexión, la cantidad de elementos en el espesor debe ser considerada al momento de mallar a causa de la baja sensibilidad de los tetraedros a este tipo de solicitudes. Se deben considerar dos aspectos importantes de los resultados experimentales, en primer lugar el desplazamiento promedio del punzón hasta el punto de rotura de la valva resultó muy bajo, aproximadamente la décima parte de un milímetro; en segundo lugar, la geometría del tamaño más pequeño (tabla 5.1) consta de un largo mayor a 10 milímetros, por lo tanto, al ser los efectos de flexión restringidos a un desplazamiento tan bajo en contraste a la geometría sometida al ensayo y, teniendo en cuenta que la capacidad de memoria del servidor no puede ser superada a causa de una cantidad tan alta de elementos, se utilizan 5 elementos tetraédricos en el espesor para cada valva. Las figuras 5.4 y 5.5 muestran el resultado del mallado.

Se utilizaron tres criterios para la calidad de la malla (especificados en la sección siguiente): ángulo diédrico mínimo, calidad de forma y, finalmente, se comprueba que los elementos del mallado que posean una mala calidad (especificados los criterios más adelante) no estén tan cercanos entre sí para evitar efectos negativos en los gradientes de esfuerzos, los cuales son parte importante en el análisis del comportamiento que tiene la valva y su compleja geometría a la compresión del punzón.

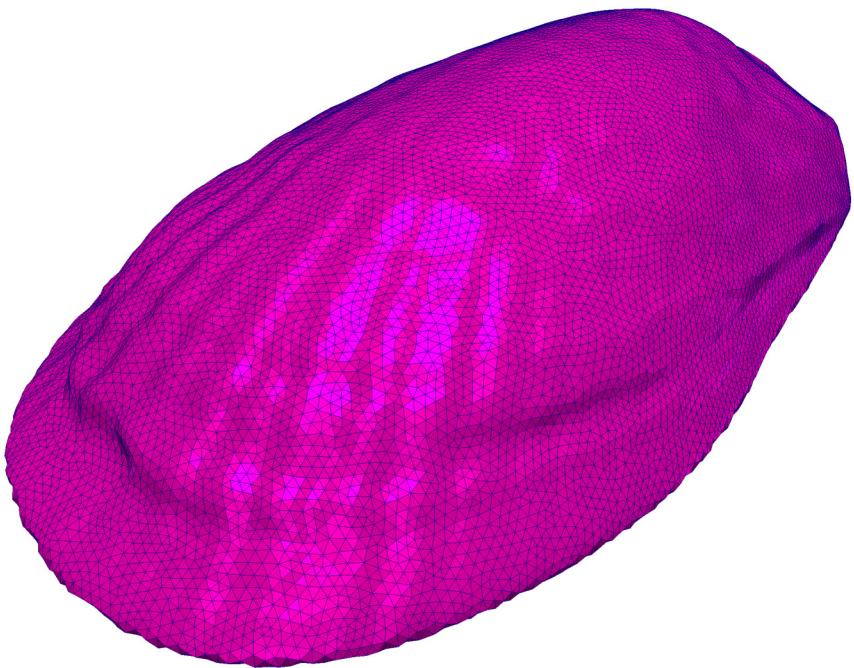


Figura 5.4. Malla procesada en *GiD*

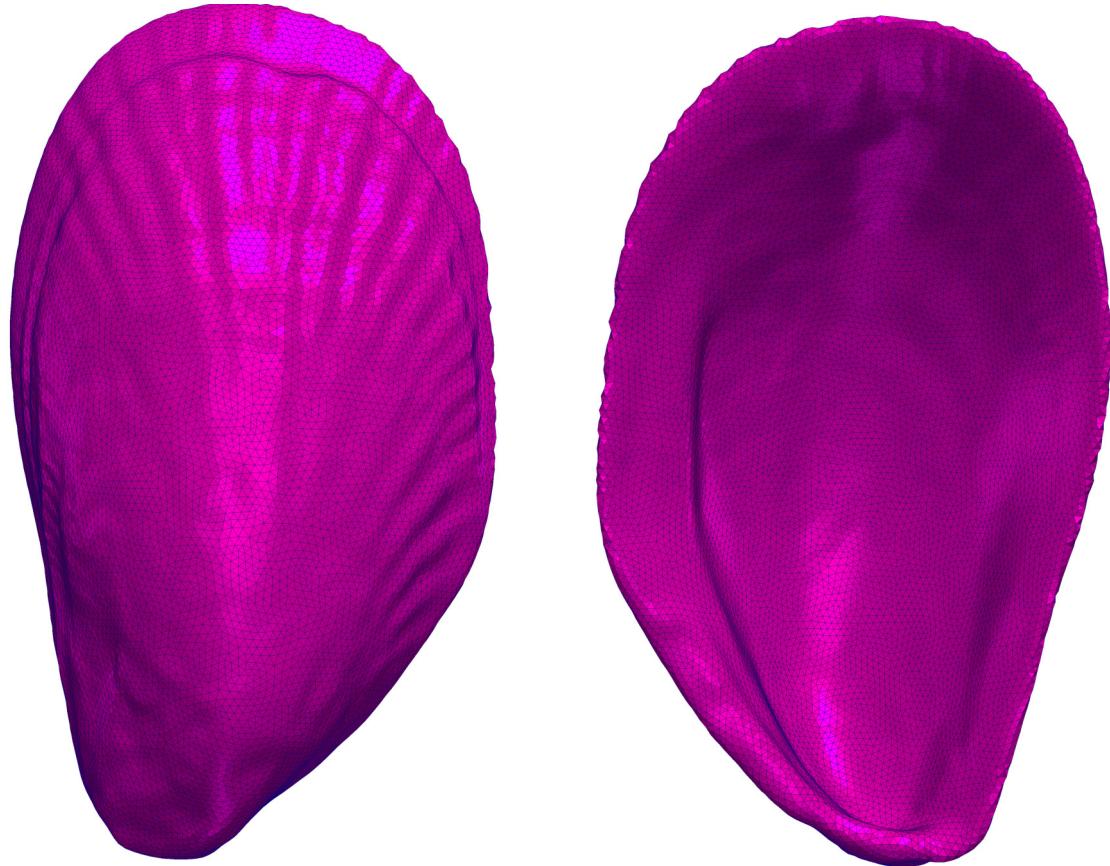


Figura 5.5. Malla procesada en *GiD* de la vista superior e inferior

5.3.2.1. Calidad de malla

Para evaluar la malla se usaron dos criterios, los cuales están enfocados en el elemento tetraédrico que forma la malla.

El primero es llamado **Criterio del ángulo diédrico mínimo** [139], en el cual suponemos un tetraedro con vértices a, b, c y d , como se observa en la figura 5.6. Sea $\mathbf{u} = \mathbf{b} - \mathbf{a}$, $\mathbf{v} = \mathbf{c} - \mathbf{a}$ y $\mathbf{w} = \mathbf{d} - \mathbf{a}$. Entonces las normales de las caras triangulares abc y abd están dados por $\mathbf{u} \times \mathbf{v}$ y $\mathbf{u} \times \mathbf{w}$, respectivamente. El ángulo diedro θ en la arista ab es el ángulo entre estas dos normales.

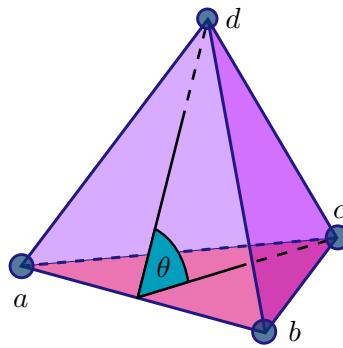


Figura 5.6. Ángulo diédrico θ perteneciente al tetraedro que conforma la malla

Aplicando la ecuación de la tangente, se obtiene la fórmula para el ángulo diedro. Debido a que $\tan \theta$ tiene una discontinuidad en 90° , es importante convertirla en una fórmula cotangente inversa, expresada en la ecuación 5.1.

$$\theta = \cot^{-1} \frac{\sqrt{(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u})(\mathbf{v} \cdot \mathbf{w}) - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{v})(\mathbf{u} \cdot \mathbf{w})}}{\sqrt{(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u})}} \quad (5.1)$$

El segundo criterio es la **Calidad de forma** [140], el cual mide la semejanza del elemento con el de referencia (un tetraedro regular en el caso de los tetraedros). Su valor es 1 para un elemento perfecto (el de referencia), y disminuye a medida que el elemento empeora. Si alcanza una cifra negativa significa que el elemento tiene un jacobiano negativo en algún momento. La expresión matemática de esta medida de calidad (q) es la siguiente.

$$q = \frac{6\sqrt{2} \cdot Volumen}{\sum_{i=1}^6 l_i^3} \quad (5.2)$$

donde *Volumen* es el volumen del tetraedro, y l_i ($i = 1..6$) son las longitudes de las aristas del tetraedro.

A continuación se presenta el resultado de ambos criterios para cada una de las 5 valvas malladas en un histograma acumulativo, los cuales son entregados por el software *GiD*.

5.3.2.2. Calidad de los elementos del tamaño 1

Valva mallada con 340.750 elementos tetraédricos.



Figura 5.7. Comparativa de malla y modelo real del tamaño 1

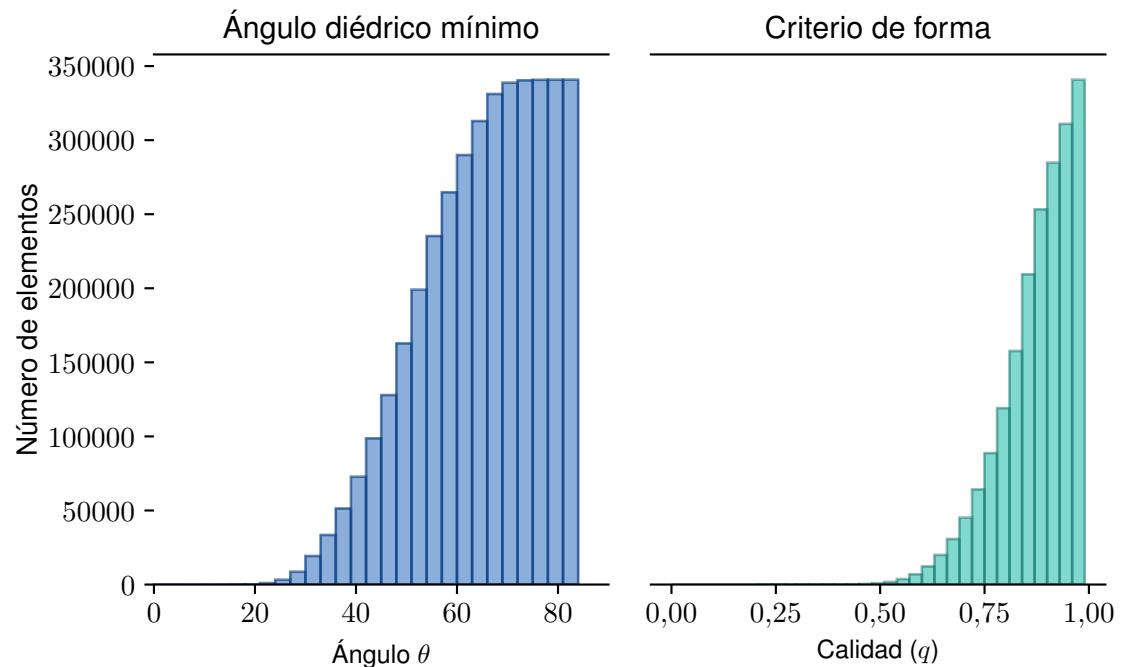


Figura 5.8. Histograma acumulativo para criterios de calidad del tamaño 1: Ángulo diédrico mínimo y criterio de forma

5.3.2.3. Calidad de los elementos del tamaño 2

Valva mallada con 213.136 elementos tetraédricos.

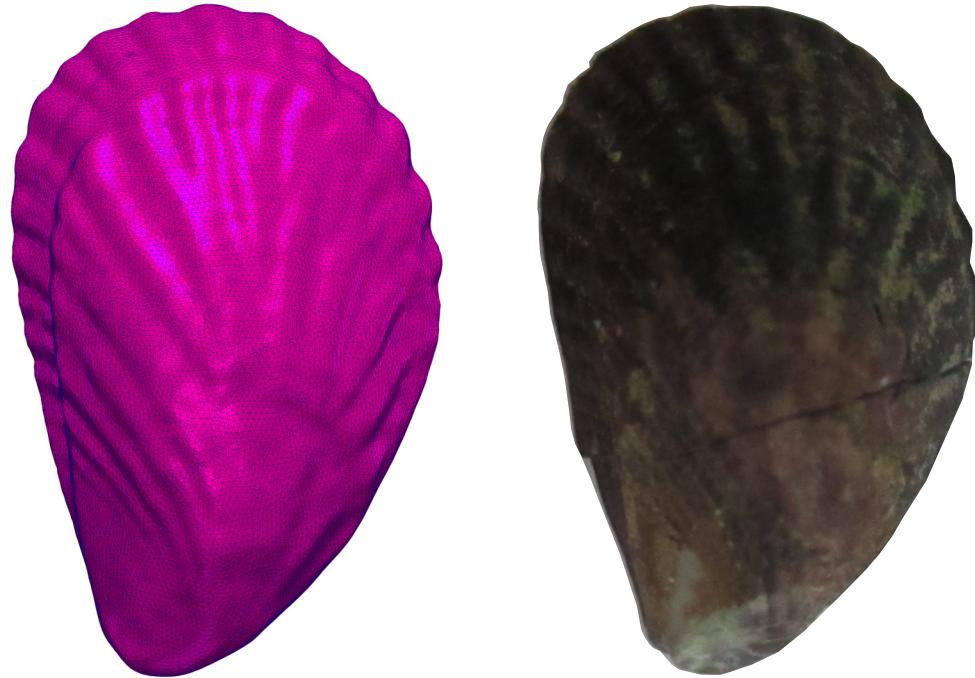


Figura 5.9. Comparativa de malla y modelo real del tamaño 2

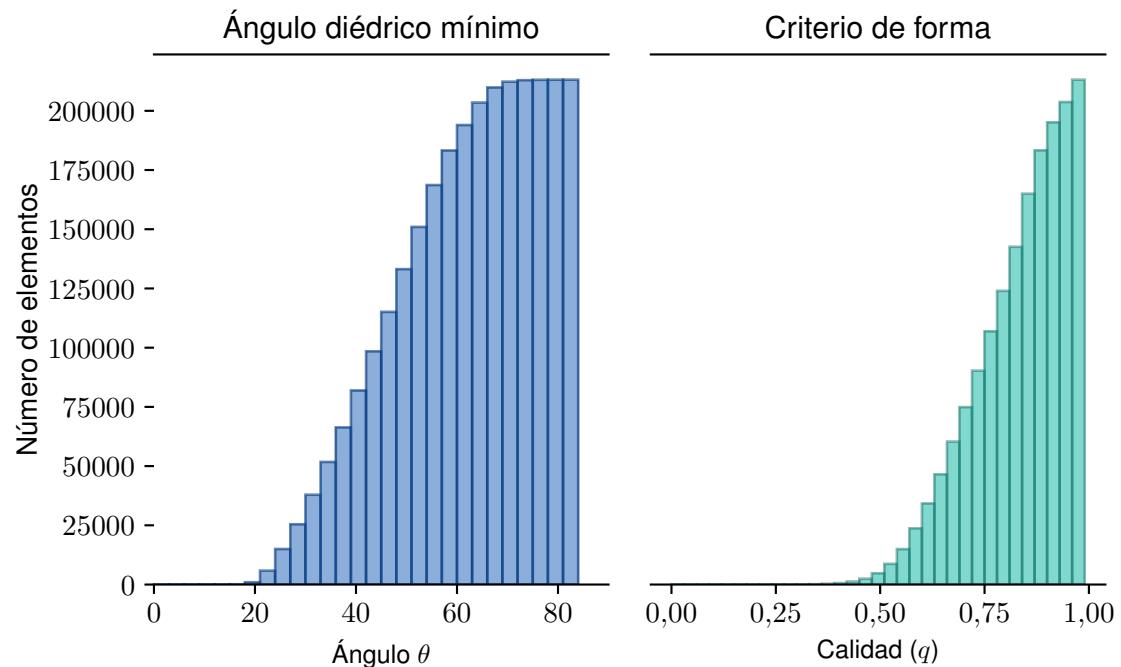


Figura 5.10. Histograma acumulativo para criterios de calidad del tamaño 2: Ángulo diédrico mínimo y criterio de forma

5.3.2.4. Calidad de los elementos del tamaño 3

Valva mallada con 226.316 elementos tetraédricos.

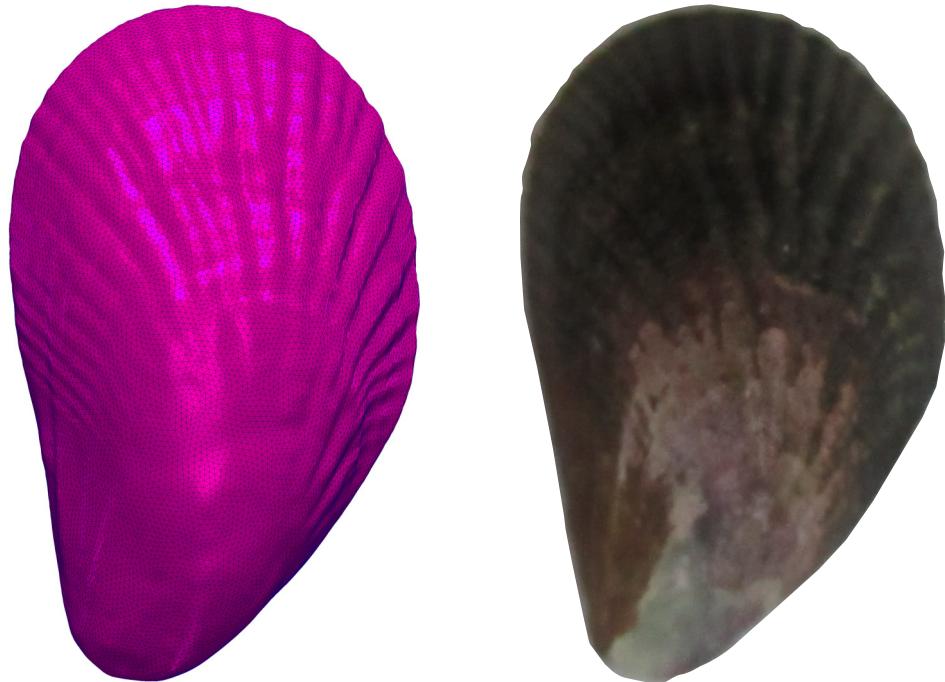


Figura 5.11. Comparativa de malla y modelo real del tamaño 3

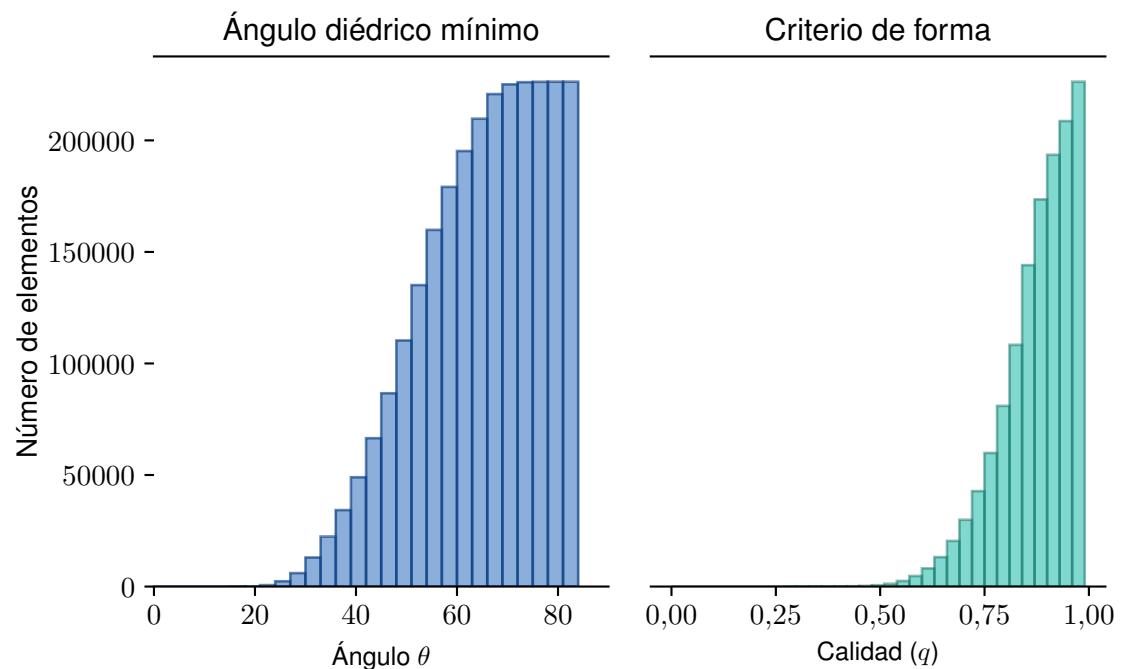


Figura 5.12. Histograma acumulativo para criterios de calidad del tamaño 3: Ángulo diédrico mínimo y criterio de forma

5.3.2.5. Calidad de los elementos del tamaño 4

Valva mallada con 195.703 elementos tetraédricos.

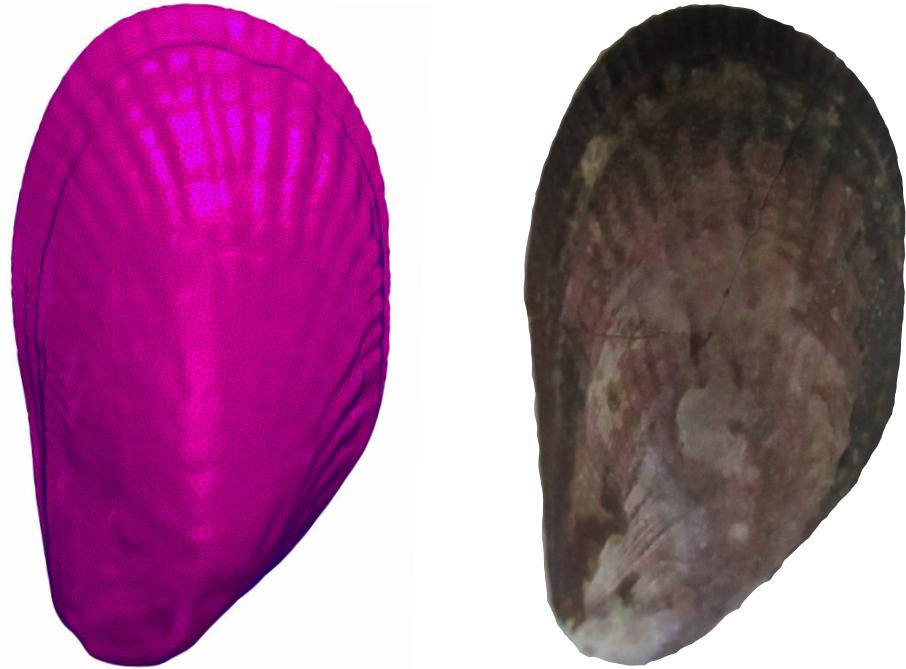


Figura 5.13. Comparativa de malla y modelo real del tamaño 4

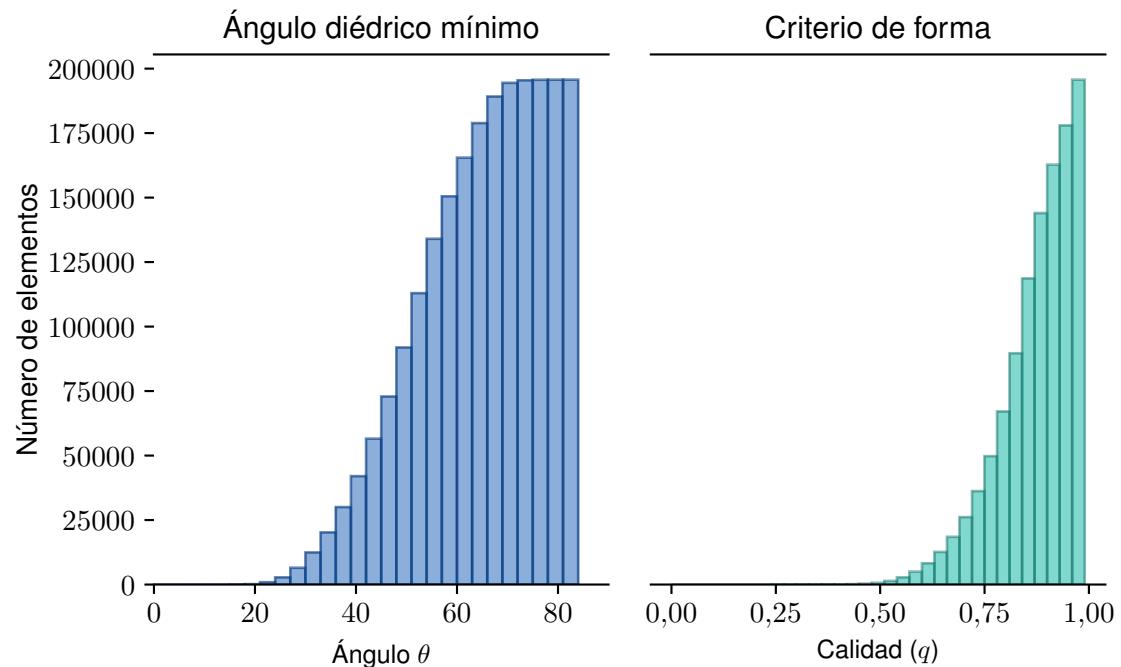


Figura 5.14. Histograma acumulativo para criterios de calidad del tamaño 4: Ángulo diédrico mínimo y criterio de forma

5.3.2.6. Calidad de los elementos del tamaño 5

Valva mallada con 297.166 elementos tetraédricos.

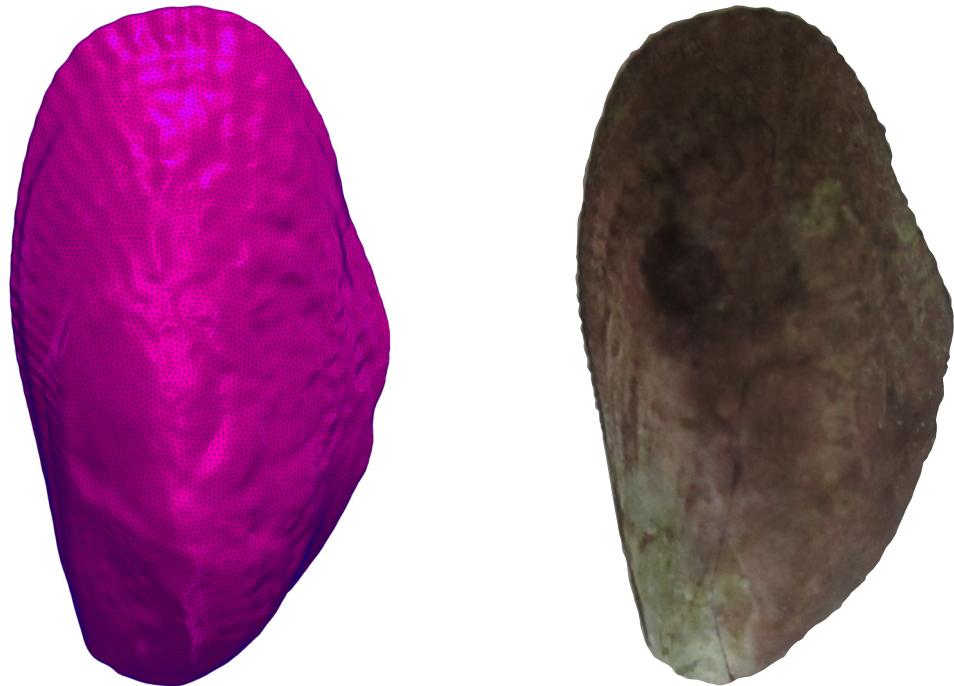


Figura 5.15. Comparativa de malla y modelo real del tamaño 5

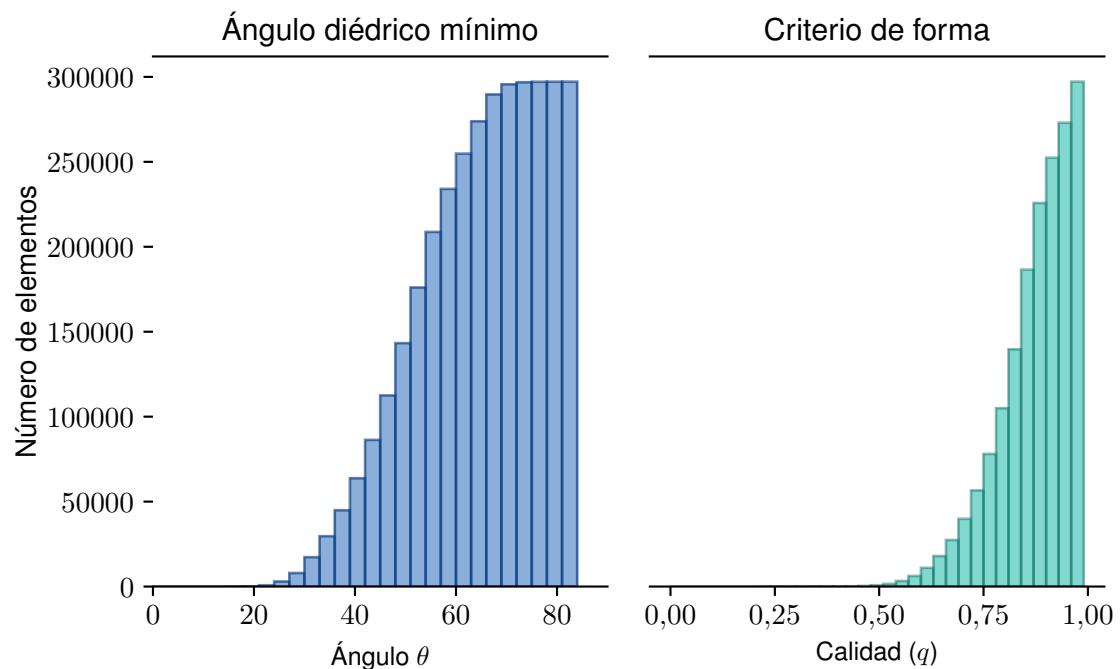


Figura 5.16. Histograma acumulativo para criterios de calidad del tamaño 5: Ángulo diédrico mínimo y criterio de forma

5.3.2.7. Análisis del mallado

Los histogramas entregados por el software *GiD* muestran que el ángulo predominante en todas las valvas es de 60° , el cual es el ángulo de preferencia para los tetraedros, por lo que el mallado refleja un buen resultado en la geometría de los elementos a partir del **criterio del ángulo diédrico mínimo**. Por otra parte, al realizar el mallado, se aseguró que el ángulo mínimo (elementos de peor calidad) no fuera menor a 15° como criterio para este proceso. El segundo criterio resulta en que la calidad de forma concentra la mayor cantidad de elementos cercanos a un valor 1, es decir, elementos semejantes a un tetraedro regular.

Otro factor a considerar es la ubicación de los elementos de mala calidad en la malla (criterio explicado anteriormente), debido a que el gradiente del esfuerzo podría resultar perjudicado y no captar correctamente la solicitud de contacto del punzón o los contacto entre valva-base y valva-pared. Considerando esto, un tercer criterio fue observar la ubicación de los elementos en el mallado de la valva. En la figura 5.17 se observa la valva de tamaño 4 con los elementos poseedores de un ángulo menor a 30° resaltados en color rojo. La cantidad de tetraedros con ángulos críticos es de 33.070 de 195.703 elementos totales del mallado, una cantidad mínima y que, observando la imagen, es posible apreciar que tales tetraedros no se encuentran cercanos entre sí, de tal forma que la distribución de los elementos no perjudica el gradiente del esfuerzo.

Considerando una buena calidad de malla para cada uno de los cinco tamaños, ahora es necesario otorgar la ortotropía del material a la simulación numérica, para lo cual se ha desarrollado un método novedoso, capaz de representar las direcciones características de la concha al utilizar los mismos elementos tetraédricos de la malla.

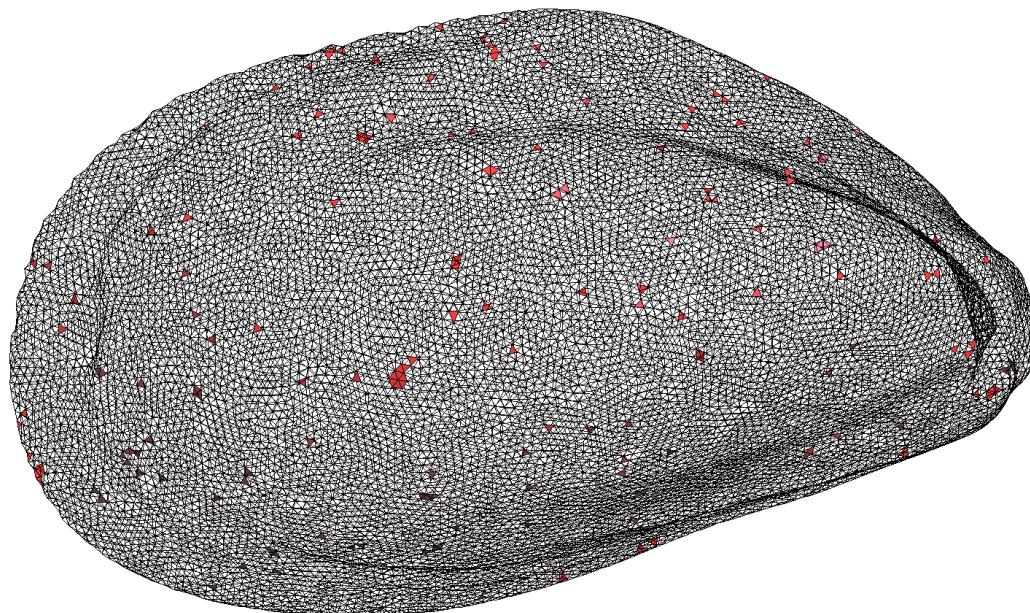


Figura 5.17. Valva de tamaño 4 con elementos de ángulo diédrico menor a 30° resaltados en color rojo

5.3.3. Direcciones de la ortotropía

En la figura 5.18 se observa la malla de cada una de las 5 valvas, en ellas se ha puesto énfasis en modelar la geometría de la concha con criterios de la calidad de los tetraedros, número de elementos y ubicación de estos, haciendo falta un último componente esencial para representar el ensayo de flexo-compresión en una simulación numérica. En este apartado se explica la metodología empleada para otorgar a los elementos la ortotropía que rige el comportamiento mecánico del material de la concha, expuesto en el capítulo 2.

El método elegido se basa en adaptar una superficie parametrizada a la superficie de la concha, de modo que esta logre captar las estrías y curvaturas propias de la valva. Cuando la superficie paramétrica se haya adaptado de forma satisfactoria, se procede a realizar una proyección ortogonal de los baricentros de los tetraedros (que en su totalidad representan a la valva como una nube de puntos) a la superficie recién adaptada. Finalmente, considerando la proyección ortogonal como la dirección que va desde el baricentro a su punto más cercano a la superficie paramétrica, se calcula el vector unitario que represente la dirección del espesor de la concha, y en consecuencia, la dirección tangencial y radial.

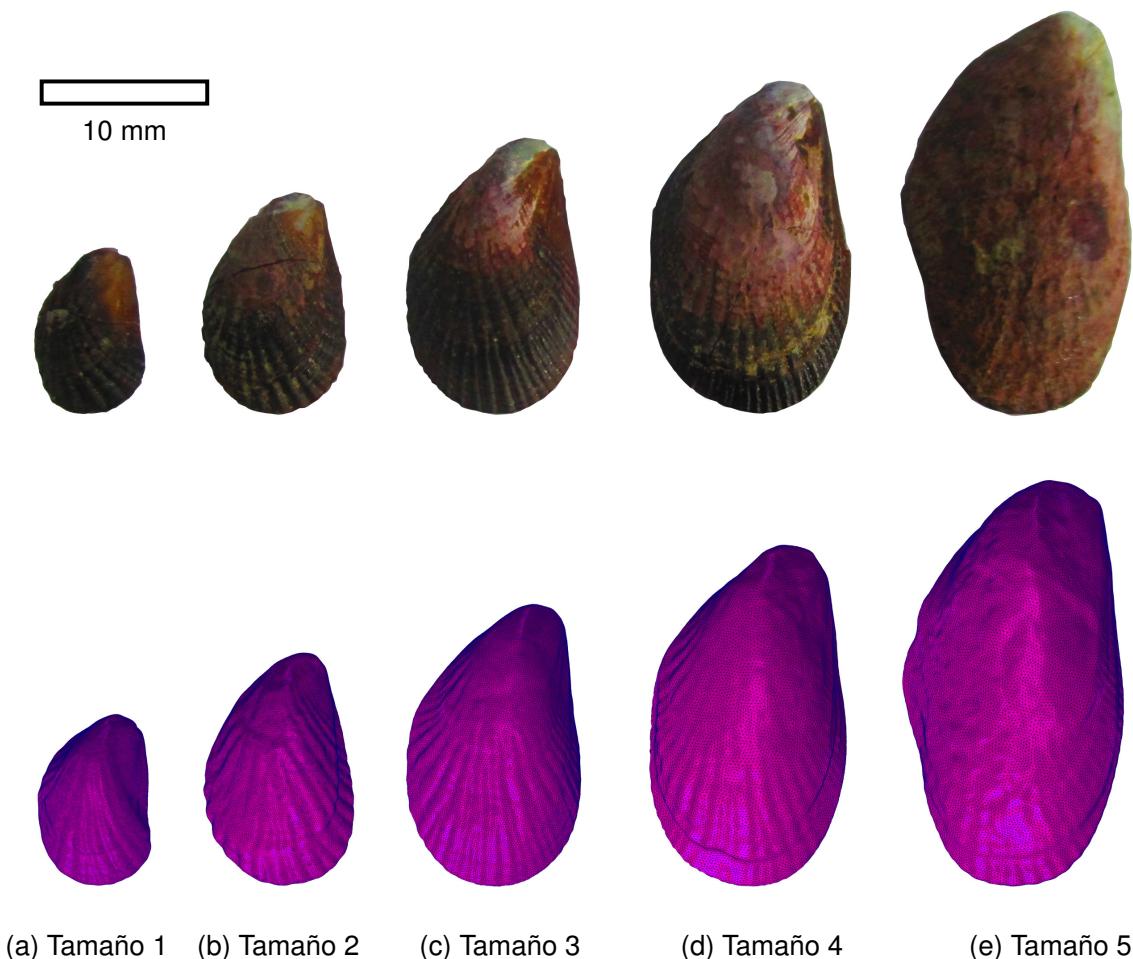


Figura 5.18. Valvas seleccionadas y sus respectivas mallas para simulación numérica

5.3.3.1. Baricentros de los elementos tetraédricos

El primer paso para otorgar las direcciones del comportamiento material es identificar el baricentro perteneciente a cada elemento tetraédrico (fig. 5.19). El procedimiento se realiza con el fin de identificar el punto de origen de la base ortonormal al que pertenecen los tres versores de dirección material, necesarios para ser procesados por Vulcan. Esto quiere decir que cada elemento cuenta con su propio baricentro, cuya ubicación dentro del elemento dependerá de la disposición espacial de los nodos que lo conforman.

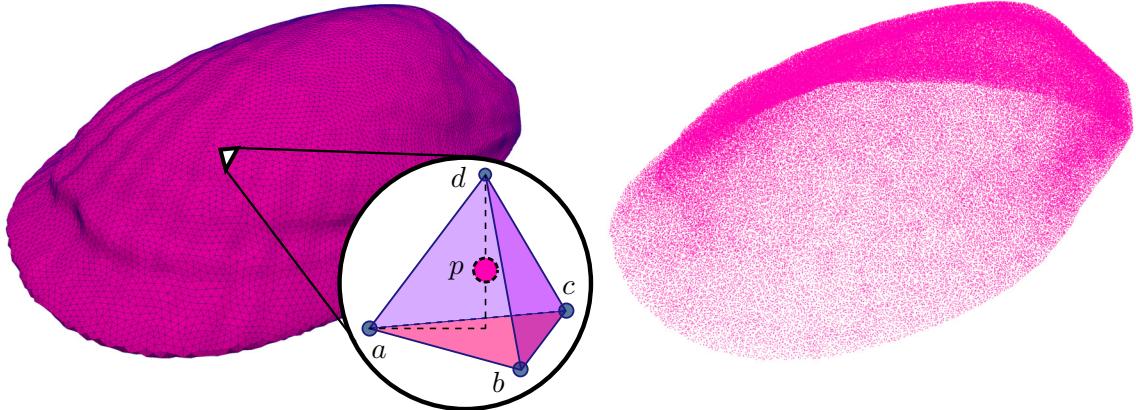


Figura 5.19. Baricentro p del tetraedro que conforma la malla de las valvas

Suponemos un tetraedro con vértices a , b , c y d . Sea p el baricentro del elemento, su ubicación en el espacio viene dado por:

$$p_i = \frac{a_i + b_i + c_i + d_i}{4} \quad (5.3)$$

5.3.3.2. Superficie parametrizada

Los baricentros, además de servir como **punto de origen para la base ortonormal**, también resultan útiles para formar la **superficie paramétrica**. Es decir, todos los elementos tetraédricos de la valva tendrán su correspondiente baricentro, los cuales son representativos de la geometría mallada de la concha (fig. 5.19). Estos forman una nube de puntos, los cuales se utilizan para refinar la superficie paramétrica que adopta la forma de la valva.

Para realizar el ajuste de la superficie se utiliza el proyecto de código abierto *Point Cloud Library* o (*PCL*) [141], software gratuito para uso comercial y de investigación. PCL se divide en una serie de pequeñas bibliotecas de código que pueden ser compiladas por separado y, en este caso, se utiliza el **Fitting trimmed B-splines to unordered point clouds**, en el cual se ejecuta un algoritmo de ajuste **B-spline** en una nube de puntos (los baricentros de los elementos tetraédrico de la malla) para obtener una representación suavizada de la superficie paramétrica correspondiente a la superficie de la concha.

Este algoritmo consiste en 5 pasos:

- Se inicia el algoritmo **B-spline surface** mediante el **Análisis de Componentes Principales** (ACP) [142], de manera que se reduce la nube de puntos a dos orientaciones, aplanando el espesor de la valva. Esto se logra disminuyendo la dimensionalidad de los datos a dos componentes principales a partir de un ajuste de un prisma que encierra una sección de la nube de puntos, en que sus aristas mayores serán las que contengan la mayor cantidad de puntos en esa dirección (superficie conformada por el largo y ancho de la valva), reduciendo el espesor a un estado aproximadamente plano.
- Después de reducir la dimensionalidad de la nube de puntos, la superficie cuenta con un número mínimo de puntos de control. Típicamente no son suficientes para representar detalles más finos de la geometría subyacente de la nube de puntos. Sin embargo, al aumentar los puntos de control hasta el nivel de detalle deseado y posteriormente ajustar la superficie **B-spline**, se presentan problemas de convergencia, por esta razón se refina la superficie **B-spline** aumentando los grados de libertad para ambas direcciones de los componentes principales. Se realiza un refinamiento y ajuste de manera iterativa la cantidad de veces que sea necesaria para conseguir una superficie satisfactoria (esto depende de la valva), a partir de variables internas de ajustes (modificables), las cuales son: *interior_smoothness*, el suavizado de la superficie interna, *interior_weight*, el peso que tienen los puntos interiores de la superficie con respecto al total de ellos, *boundary_smoothness*, el suavizado de la superficie en la frontera de la nube de puntos, y *boundary_weight*, el peso de los puntos adyacentes a la frontera de la nube de puntos con respecto del total.
- Ahora que la superficie se encuentra ajustada a la nube de puntos, es necesario recortar las regiones que queden fuera del dominio de la nube. Para lograrlo, se proyecta la nube de puntos al dominio paramétrico utilizando los baricentros más cercanos a la superficie **B-spline**, por lo que en el dominio de \mathbb{R}^2 se realiza un ajuste de curva **B-spline**, la cual tiene como función ser una curva que recorte de forma cerrada la superficie que contenga aproximadamente todos los puntos de la nube. Este algoritmo considera que la superficie es continua, por lo que no deja huecos dentro de ella.
- Se realiza un ajuste de la curva **B-spline** recientemente creada, con un enfoque similar al ajuste de la superficie, es decir, la curva se refina y ajusta de forma iterativa.
- Finalmente, se procede a la triangulación de la superficie **B-spline** recortada. Una vez terminado el ajuste de la curva, la representación geométrica consiste en una superficie **B-spline** y una curva cerrada **B-spline**, definida dentro del dominio paramétrico de la superficie **B-spline**. Ahora, el algoritmo crea una malla triangular de la superficie **B-spline** recortada y después elimina los triángulos que se encuentran fuera de la curva de recorte.

Los resultados del ajuste de la superficie con forma paramétrica $\Gamma : s(u, v)$ en \mathbb{R}^3 , se pueden observar en la figura 5.20, ajuste perteneciente a la malla de la valva de tamaño 4. Como se observa, la superficie logra captar las estrías y curvaturas de la nube de puntos, lo que sucede con cada una de las 5 valvas (apéndice B.1). Estas utilizaron la misma cantidad de refinamientos y ajustes, 4 y 5 respectivamente, con las siguientes variables internas de ajuste: *interior_smoothness*: 0.6, *interior_weight*: 1.0, *boundary_smoothness*: 0.4 y *boundary_weight*: 0.2. Estos fueron seleccionados de forma iterativa hasta que el resultado de la superficie paramétrica fuera satisfactorio para las 5 valvas a simular.

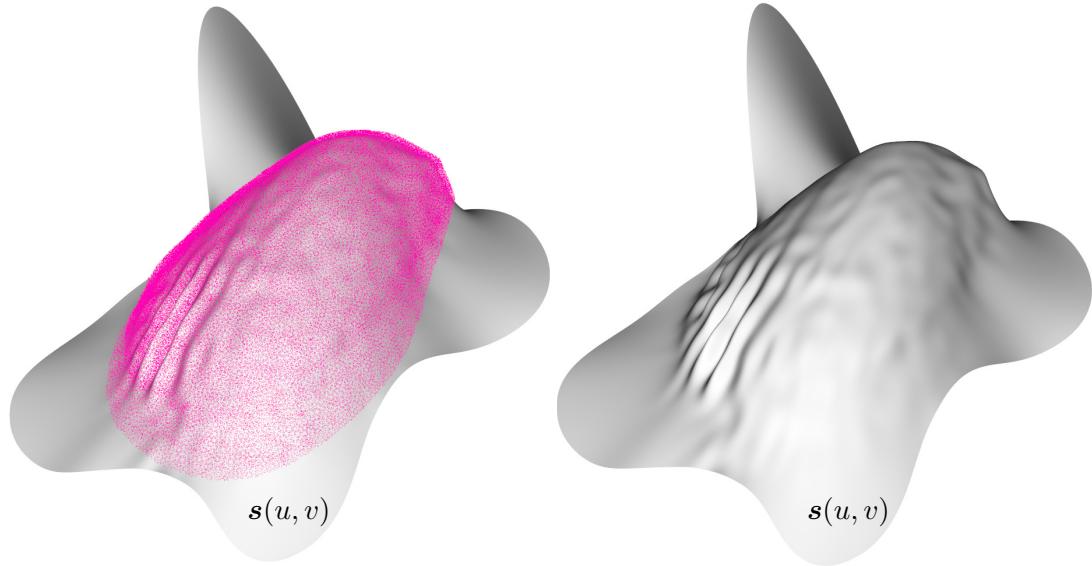


Figura 5.20. Ajuste de la superficie paramétrica a los baricentros de la valva de tamaño 4

5.3.3.3. Proyección ortogonal a la superficie paramétrica

La primera dirección calculada corresponde al vector de la dirección del espesor, para esto se utilizan los baricentros de cada elemento, lo que significa que cada uno le dará a su correspondiente elemento las 3 direcciones de ortotropía. La forma en que se calcula el primer versor es uniendo dos puntos, el baricentro y su correspondiente proyección ortogonal a la superficie paramétrica. Este es un tema de discusión en matemática, conocido como el *Problema de la proyección ortogonal de un punto a una superficie paramétrica*, debido que no existe una solución analítica que otorgue una respuesta directa a un problema clave, esenciales para la selección interactiva de curvas y superficies, problemas de ajuste de curvas y para la proyección de una curva sobre una superficie [143]. Se han propuestos diversos métodos iterativos para encontrar solución, tales como convertir el problema de la proyección en el de encontrar la raíz de un polinomio utilizando el método Newton-Raphson [144], o proyectar ortogonalmente un punto en una curva o superficie paramétrica mediante la subdivisión de la curva o superficie de Bézier, haciendo uso de la relación entre los puntos de control y la curva o superficie, tal como [Ma et al.](#) con su propuesta de algoritmo de proyección a una curva o

superficie paramétrica [143]. En el presente trabajo se resuelve este problema a partir de la investigación realizada por [Li et al.](#) en su trabajo sobre proyección ortogonal, con el algoritmo llamado **Geometric Strategy Algorithm** (GSA) [145], el cual tiene la ventaja de ser un método independiente del valor iterativo inicial, ventaja sobre Newton-Rapshon que es dependiente de éste, y sólo necesitar información de segundo orden de la superficie. Mediante resultados experimentales presentados [145], GSA demuestra poseer la ventaja de una mayor velocidad de convergencia que los métodos previos, por esta razón se ha optado por utilizar este método.

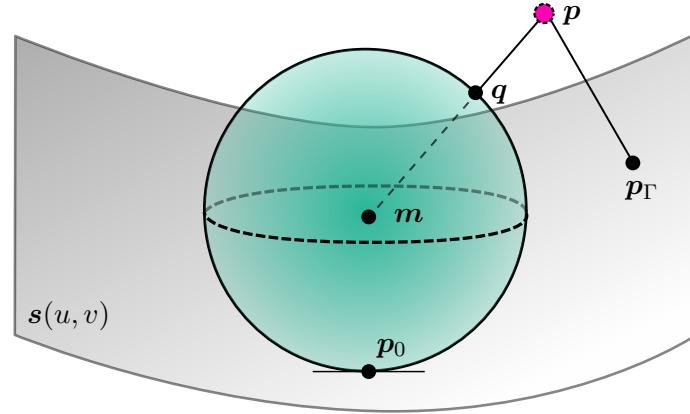


Figura 5.21. Demostración gráfica del método GSA. Imagen inspirada de [145]

El algoritmo calcula la distancia mínima entre un punto en el espacio y una superficie paramétrica, entregando el punto más cercano perteneciente a la superficie (*footpoint*) con sus correspondientes parámetros. El método consiste en crear una esfera normal a la superficie paramétrica (fig. 5.21), especificando su radio y centro de la esfera m , determinados por la propia curvatura de la superficie. Sea la superficie con forma paramétrica $\Gamma : s(u, v)$ en \mathbb{R}^3 , considerando p el punto baricentro del elemento tetraédrico a proyectar en la superficie. Se asume $p_0 = s(u_0, v_0)$ como el parámetro iterativo inicial (u_0, v_0) en la superficie paramétrica $s(u, v)$, correspondiente al punto tangente de la esfera con la superficie paramétrica, el cual puede ser un valor aleatorio debido a que el método no depende del parámetro inicial. El punto q es la intersección del segmento \overline{pm} y la esfera. p_Γ corresponde al punto de la proyección ortogonal entre el baricentro p y la superficie paramétrica $s(u, v)$. La expresión para hallar los parámetros incrementales es:

$$q - p_0 \approx \frac{\partial s}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial s}{\partial v} \Delta v \quad (5.4)$$

u_0 y v_0 son actualizados según $u_0 + \Delta u \rightarrow u_0$ y $v_0 + \Delta v \rightarrow v_0$ respectivamente. Es decir, los valores inciniales toman la forma $t_0 = (u_0, v_0)^T$, se calcula el incremento $\Delta t = (\Delta u, \Delta v)^T$ y se actualiza el valor inicial $t_0 + \Delta t$, siendo $t_0 = t_0 + \Delta t$. El cálculo finaliza cuando $\| \Delta t \| < \varepsilon$, es decir, cuando el incremento sea cercano a 0 o menor a un error ε . Una descripción acabada del método implementado se describe en la publicación de [Li et al.](#) [145].

5.3.3.4. Dirección espesor

El algoritmo se ejecuta para cada uno de los baricentros representantes de los elementos, de manera que se forma el vector de dirección espesor (d_e) utilizando el baricentro (p) y su proyección ortogonal (p_Γ), de la forma $d_e = p - p_\Gamma$ y, normalizando el vector, se calcula el versor correspondiente a la dirección del espesor \hat{d}_e . El resultado se puede observar en la figura 5.22, en que se aprecia el contraste entre la malla y la nube de puntos con las direcciones del espesor para cada elemento. Se puede apreciar que los versores logran captar las estrías y líneas de crecimiento de la valva, convergiendo las puntas de estos en los sectores con mayor relieve, también se observa que la dirección es normal a la superficie.

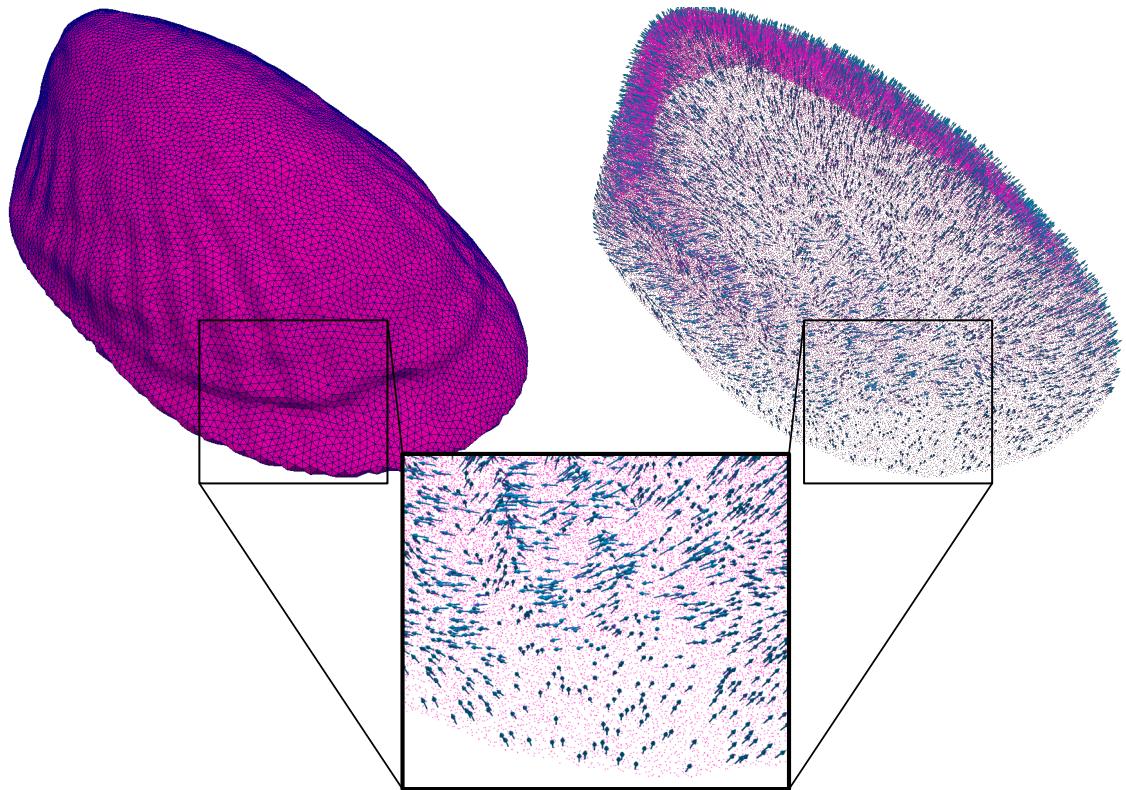


Figura 5.22. Dirección espesor \hat{d}_e calculado mediante GSA, con sólo 50.000 versores representados para no saturar la imagen

Las direcciones siguientes se calculan a partir de la dirección del espesor y un punto de origen de las estrías, las cuales se interpretan como la dirección radial. Por lo tanto, las demás direcciones son dependientes del resultado entregado por el método GSA, es decir, la dirección del espesor (\hat{d}_e) y el criterio a utilizar para ubicar el origen de las estrías.

Por lo tanto, es necesario estimar el origen de las estrías de la valva para definir las direcciones radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t), y así considerar un punto de referencia para crear un vector que une el origen con cada baricentro, el vector de crecimiento c .

5.3.3.5. Dirección tangencial

La segunda dirección a calcular es la tangencial a las estrías, por lo tanto, es necesario determinar el origen de dichas estrías, las cuales se encuentran en el sector cercano al umbo, como se aprecia en la figura 5.23.

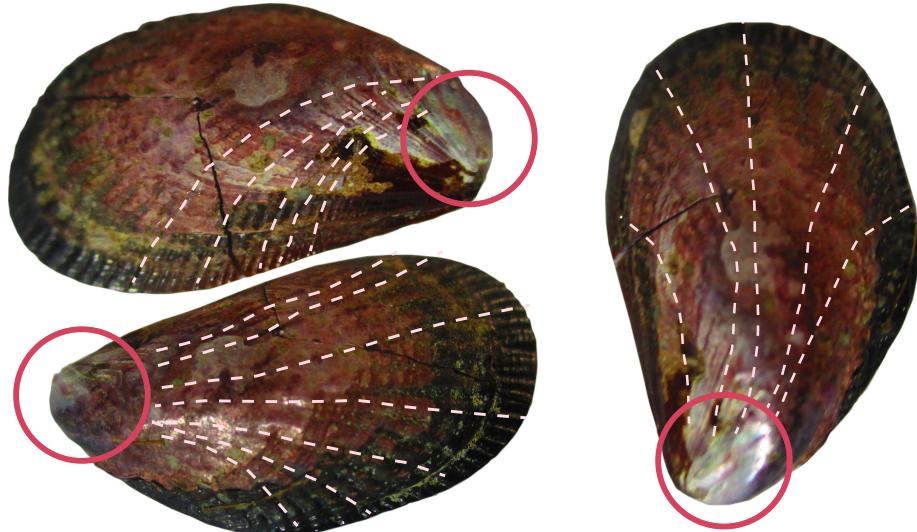


Figura 5.23. Zona de origen de las estrías dentro de la zona circular

Dentro de la zona delimitada se selecciona un nodo de la malla, denominado o , en el cual se asume la convergencia de todas las estrías de la valva, como se observa en la figura 5.24.

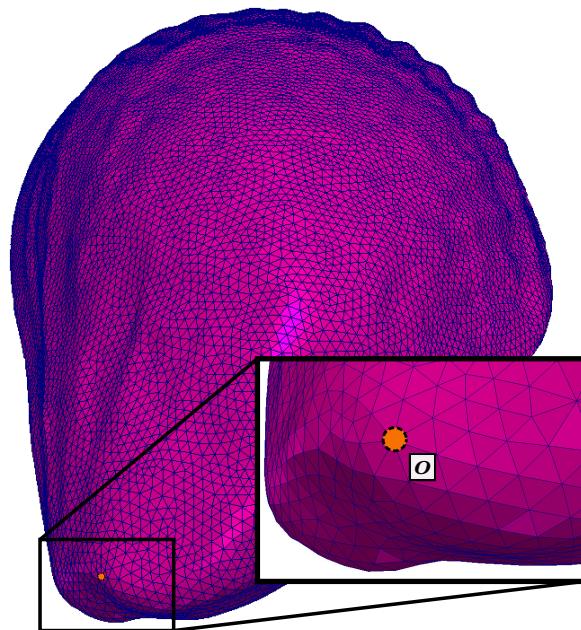


Figura 5.24. Zona de origen de las estrías o

Ahora que se tiene identificado el punto de origen de crecimiento, se procede a crear el vector de crecimiento de la forma $c = p - o$, este vector se origina en el punto o y llega hasta cada uno de los baricentros p , por lo que el producto cruz entre el vector de crecimiento (c) y el vector de dirección espesor (d_e) entrega un tercer vector normal al plano originado por ambos, el cual corresponde a la dirección tangencial, de la forma $d_t = c \times d_e$ y, normalizando el vector, se calcula el versor correspondiente a la dirección tangencial \hat{d}_t .

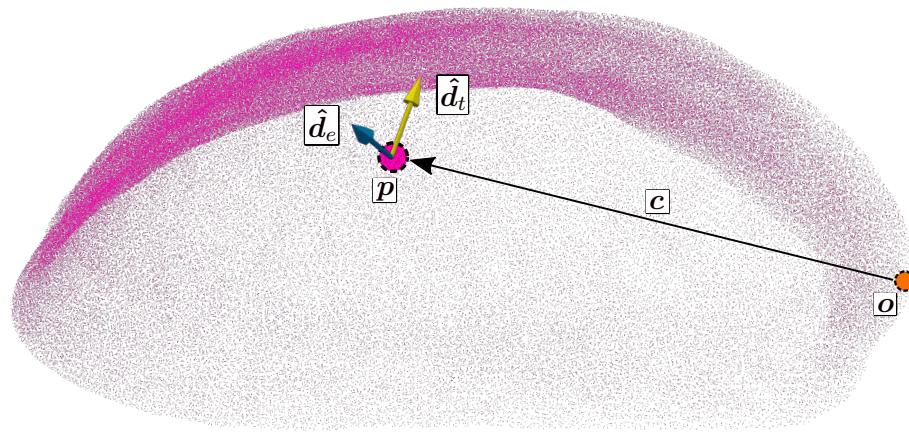


Figura 5.25. Cálculo de la dirección tangencial de los elementos de la malla

El proceso se puede observar gráficamente en la figura 5.25, y en la figura 5.26 el resultado final, considerando todos los baricentros. Se observa, al igual que la dirección normal, la dirección tangencial logra captar las estrías de la valva.

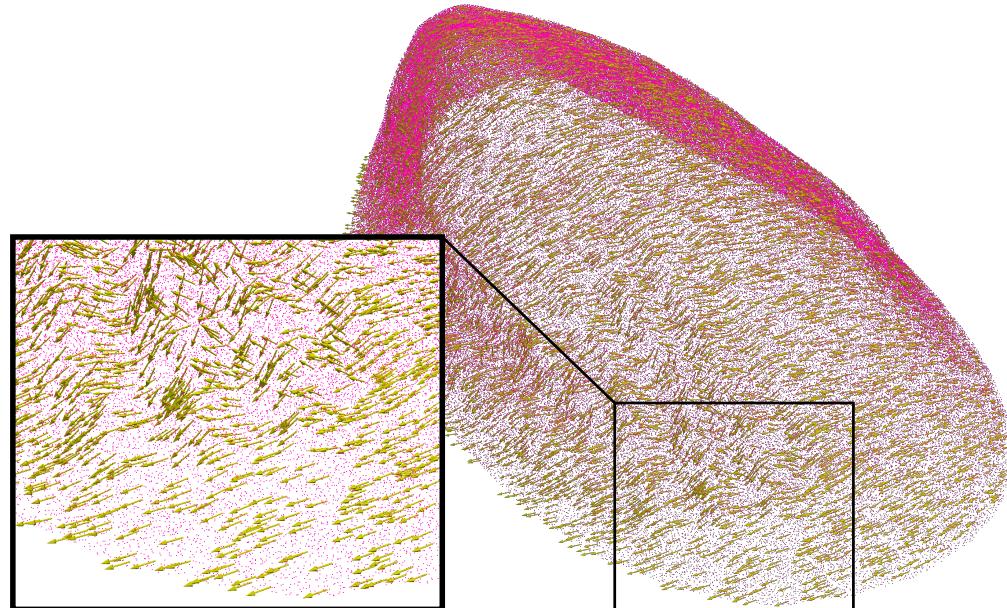


Figura 5.26. Dirección tangencial \hat{d}_t calculado mediante GSA.

5.3.3.6. Dirección radial

Con la dirección del espesor (d_e) y tangencial (d_t) calculada, sólo queda realizar producto cruz entre ellas para obtener la dirección radial, de la forma $d_r = d_e \times d_t$ y, normalizando el vector, se calcula el versor correspondiente a la dirección radial \hat{d}_r . En la figura 5.27 se puede observar el resultado final, que al igual que las demás direcciones, es capaz de captar las estrías.

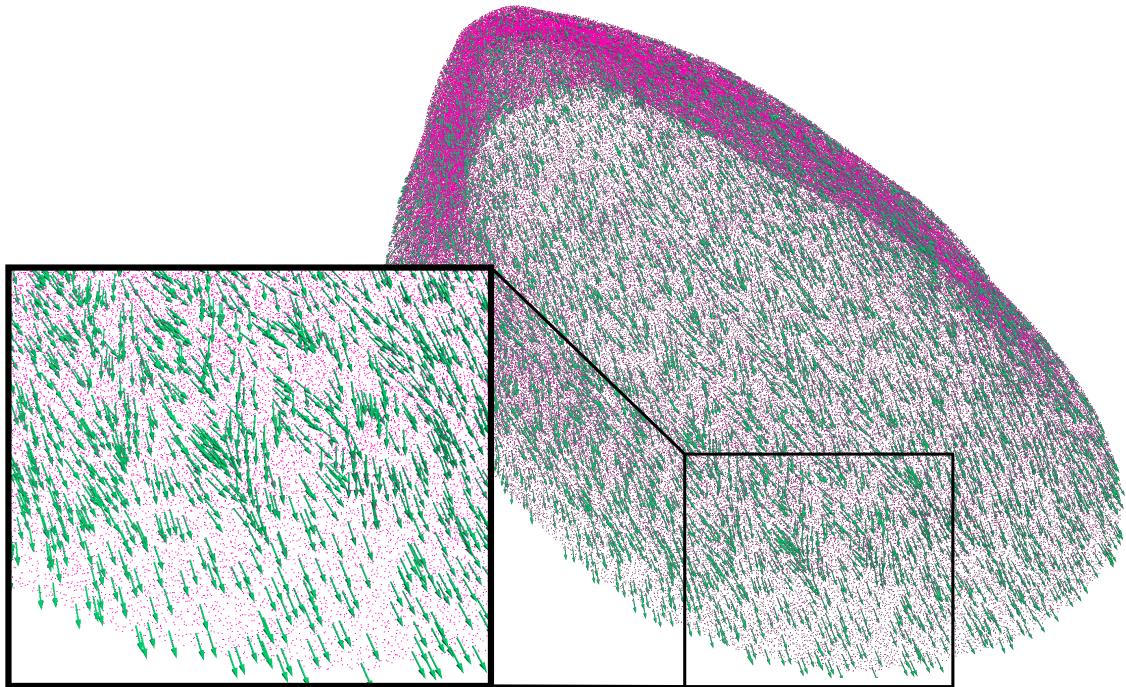


Figura 5.27. Dirección radial \hat{d}_r calculado mediante GSA.

También es posible apreciar, considerando que el origen de crecimiento se encuentra cercano al umbo, que las direcciones radiales y tangenciales se originan y rotan en torno al punto de origen de las estrías o (zona trasera de la valva), respectivamente:

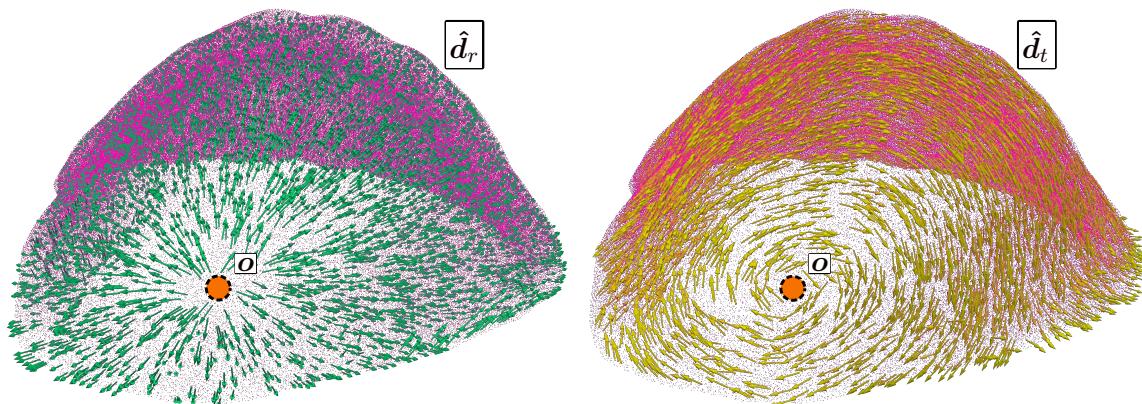


Figura 5.28. Dirección radial y tangencial con origen y rotación respecto al origen o

5.3.3.7. Análisis de direcciones ortótropas

Como se menciona anteriormente en cada análisis de las tres direcciones, se observa, considerando el contraste entre ellas (fig. 5.29), que todas logran captar las estrías. Los versores de la dirección del espesor (\hat{d}_e) convergen en los sectores más altos de las estrías. La dirección tangencial (\hat{d}_t), en esas mismas zonas, forma ondas producto de tales estrías. La dirección radial (\hat{d}_r) es paralela a las estrías y converge en las zonas menos suaves de la superficie.

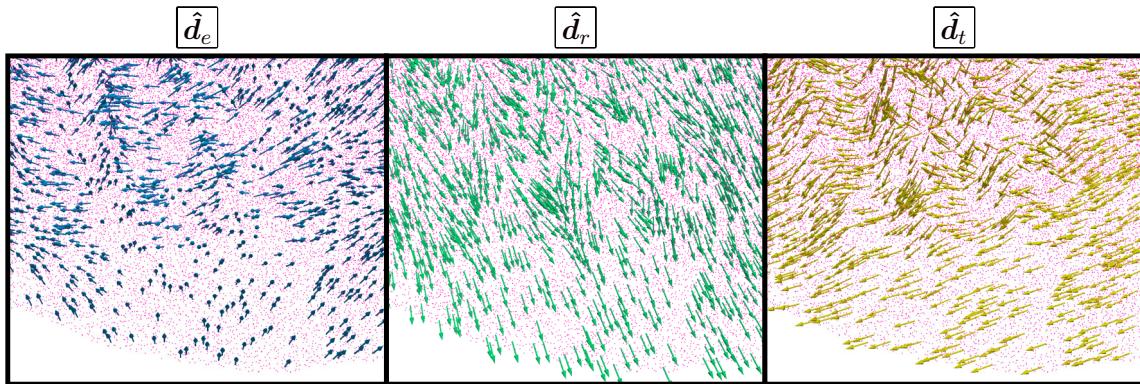


Figura 5.29. Contraste entre la dirección del espesor (\hat{d}_e), dirección radial (\hat{d}_r) y dirección tangencial (\hat{d}_t)

En conclusión, el método y criterios utilizados para otorgar ortotropía al material resulta satisfactorio, ya sea la librería *PCL* que adapta la superficie paramétrica considerando la geometría irregular de la concha, y el método *GSA*, el cual logra encontrar la proyección ortogonal de los baricentros de la valva en no más de 10 minutos para aproximadamente 300000 elementos. Por último, estimar el origen de las estrías otorgando un punto en el espacio para formar el vector de crecimiento c , otorga resultados visuales (mediante análisis gráfico de los versores) satisfactorios, considerando que tal vector representa una recta y no una curva a lo largo de la valva. Considerando estos resultados, se obtiene una buena aproximación de las direcciones ortótropas.

Cabe señalar que este método puede resultar útil para otros tipos de biomateriales o estructuras con geometrías irregulares y difíciles de definir, ya que la librería *PCL* capta con buenos resultados nubes de puntos a medida que aumenta el refinamiento y ajuste, entregando una superficie parametrizada suave. Por otro lado, el método *GSA* resulta útil para realizar trabajados de proyección con la superficie recién creada.

Otra forma de utilizar la librería *PCL* podría ser en simulaciones con elementos tipo Shell para estas conchas, por ejemplo, con espesores variables, definiendo el centro del elemento con la superficie paramétrica y el espesor mediante la superficie externa de la concha. En futuros estudios se podría comparar los resultados de simulaciones con elementos tetraédricos y con elementos tipo Shell, de forma que se logre simplificar el problema y el tiempo de cálculo.

5.4. Elementos de contacto

Una vez generadas las direcciones ortótropas del espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) en toda la valva para cada elementos que la conforma, se procede a generar las mismas condiciones del ensayo de flexo compresión (fig. 3.9), es decir, el modelo digital del punzón, base y las cuatro paredes. Estos se conforman por elementos cuadráticos, a los cuales es impuesto un desplazamiento nulo y no nulo para ciertas direcciones (sección 5.5).

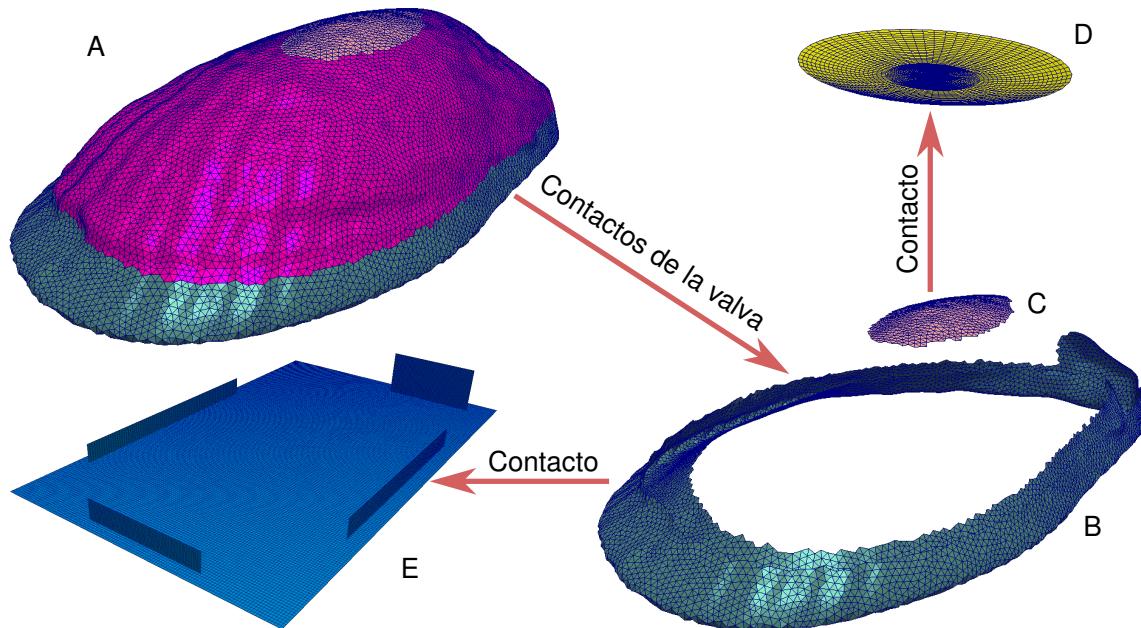


Figura 5.30. Disposición de elementos creados para la simulación. A: Valva sometida a simulación de flexo-compresión, B: Elemento de contacto de la valva en la zona de la frontera, la cual contacta con base y paredes, C: Elemento de contacto de la valva en su zona más alta, la cual contacta con el punzón, D: Punzón, malla que realiza contacto con la zona más alta de la valva, E: Base y paredes, malla que realiza contacto con la zona de la frontera de la valva

Para el punzón se utiliza el diámetro de 17,1 [mm], al igual que su geometría física, concentrando una mayor cantidad de elementos en el centro de la figura, con un total de 3.072 elementos, cantidad constantes para cada una de las 5 simulaciones. La base y paredes cuentan con cantidad de elementos variables para cada tamaño de valva, debido a que la base diseñada por [Abarca](#) se ajusta dependiendo del tamaño de la concha. Además, se crean elementos triangulares de contactos propios de la valva en su superficie, los cuales se pueden observar en la figura 5.30, con la valva color magenta, la zona de contacto de la frontera color azul y la zona de contacto en la zona más alta de la valva color rosa. A la zona alta de la valva se le impone un contacto restrictivo entre ella y el punzón, mientras que la zona de contacto de la frontera de la valva se le impone un contacto restrictivo entre ella y la base y paredes, de forma tal que el software [Vulcan](#) no utilice recursos de forma innecesaria buscando contactos en sectores que no se ha dispuesto experimentalmente para ser efectuado.

5.5. Procedimiento de la simulación

La simulación de flexo-compresión, al igual que su versión experimental, cuenta con imposición de movimiento. En el experimento el punzón tiene un desplazamiento vertical negativo para realizar el contacto con la valva, mientras que la base y paredes se encuentran con una imposición de desplazamiento nula para todas las direcciones. En la simulación (fig. 5.31), al contrario que en el experimento, el punzón se encuentra con un movimiento (U) impuesto nulo en los ejes x , y , y z ($U_x = 0$, $U_y = 0$, $U_z = 0$), mientras que la base y paredes poseen un desplazamiento impuesto en los ejes x y z de valor nulo ($U_x = 0$, $U_z = 0$), y para el eje y se impone un desplazamiento positivo no nulo ($U_y = desp.$). La valva no cuenta con restricción de movimiento.

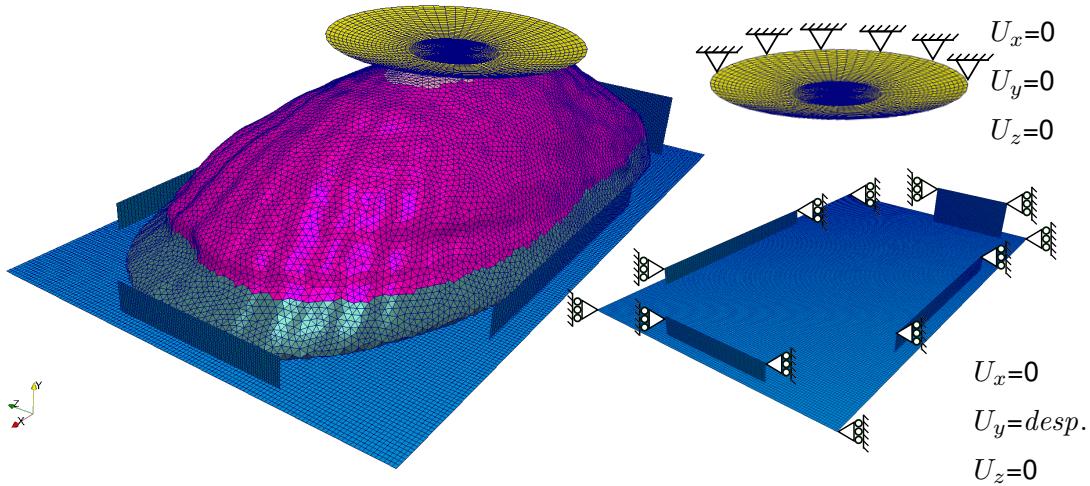


Figura 5.31. Simulación de flexo-compresión con sus respectivas restricciones de movimiento

La metodología escogida, la cual difiere de la experimental en la imposición de movimientos para los elementos de contacto, resulta necesaria debido a la dificultad de definir una posición inicial de la valva. Esto se explica en las siguientes tres fases de la simulación, la cual no resulta perjudicada debido a que el movimiento relativo del punzón con respecto a la base y paredes es el mismo a la inversa, es decir, la velocidad con que avanza la base y paredes en el eje y , es la misma con la que baja el punzón en el eje vertical del experimento de flexo-compresión. Las tres fases en que se divide la simulación corresponden primero al acomodamiento de la valva, necesaria para establecer una posición inicial, después, el confinamiento de la valva mediante la base y paredes y, finalmente, el proceso de compresión de la concha. Todos los pasos utilizan un modelo de contacto del tipo penalización, para el primer y segundo paso rige una ley cuadrática de penetración sin roce, el paso final se divide en dos partes, ambas con ley lineal de penetración, sin roce y con roce respectivamente. Una descripción acabada del método de penalización de contactos queda descrita en la publicación de Cañas et al. [146]. Para efectos prácticos las unidades del penalizador lineal se asumirán de ahora en adelante como $[N/mm^3]$.

5.5.1. Fase 1: Acomodamiento

Los elementos de contacto como el punzón, base y paredes cuentan con desplazamientos impuestos, mientras que la valva, para realizar una correcta simulación de las condiciones experimentales, no cuenta con ninguna debido a que la forma irregular de su frontera no permite establecer una posición inicial en que la concha se asiente en la base. Por ello se impone un desplazamiento nulo en el punzón, y se deja la valva de forma que a simple vista parezca en su estado de asentamiento, es decir, que las curvaturas de la frontera se vean tangentes a la superficie de la base, y así, imponer un desplazamiento no nulo en la base, de forma contraria al experimento, en que los desplazamientos son no nulo en el punzón y nulo en la base. La simulación comienza otorgando las direcciones ortótropas, con el punzón, base y paredes a una distancia de 0,2 [mm] de la valva (separación entre nodos), sin ejercer un contacto inmediato. Luego se impone el desplazamiento de la base y, al efectuar una fuerza de contacto, provoca que la valva rote y se acomode mientras la base avanza en el eje y . El modelo de contacto es de penalización con ley cuadrática sin roce, de la siguiente forma:

$$P_n = E_{n0}g_n + E_ng_n^2 \quad (5.5)$$

donde E_{n0} [N/mm³] y E_n [N/mm⁴] son constantes que controlan la relación entre penetración g_n [mm] y la presión del contacto aplicada a la superficie P_n [MPa]. Se establece esta ley debido a que en el proceso de acomodamiento se ejerce una fuerza de contacto a la valva, la cual no se encuentra con ningún tipo de restricción, lo que provoca que esta se desplace de forma estrepitosa en el espacio, por lo que, para cada uno de los 5 tamaños, se designan los mismos parámetros para el contacto del punzón: $E_{n0} = 1,0$ y $E_n = 10,0$, base: $E_{n0} = 1,0$ y $E_n = 0,2$ y paredes: $E_{n0} = 0,1$ y $E_n = 1,0$. Estos fueron seleccionados mediante iteraciones que otorgaran un resultado satisfactorio, es decir, acomodar la valva sin que fuera expulsada del sitio del ensayo, asegurando su giro y que no se desplace de forma estrepitosa. La ley cuadrática permite que la valva penetre la base y punzón con un parámetro lineal bajo, y después, gracias al parámetro cuadrado, se detenga la penetración y la valva logre asentarse. En la figura 5.32 se observa como el punzón y base son penetrados por la valva.

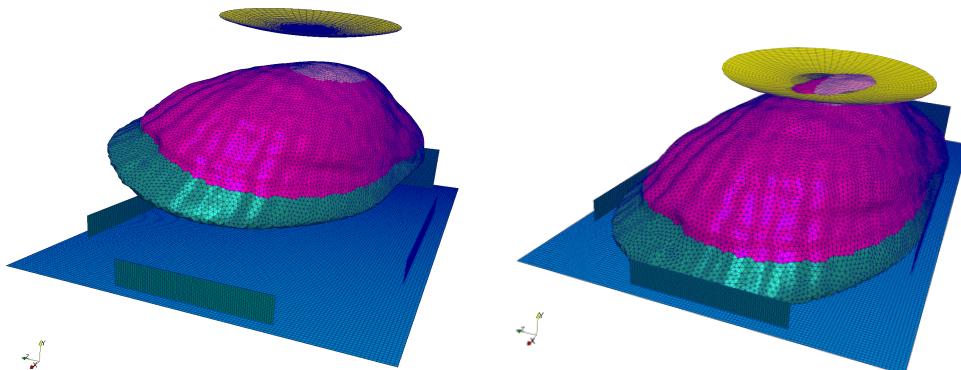


Figura 5.32. Proceso de acomodamiento de la valva

5.5.2. Fase 2: Confinamiento

Después de realizar el acomodamiento, se obtienen los desplazamientos nodales de la valva a partir del archivo `.pos` creado por `Vulcan` en el paso en que la valva ya se haya asentado. Al igual que en el acomodamiento se otorgan las direcciones ortótropas nuevamente, debido a que tal proceso ha desplazado los elementos de su posición inicial y, al efectuar una nueva simulación, esta debe contar con las direcciones actualizadas a la posición final. La simulación comienza con el punzón, base y paredes a una distancia nula a la valva y, al igual que el paso anterior, utiliza el modelo de contacto de penalización cuadrática (ecuación 5.5), debido a que la valva debe, nuevamente, penetrar el punzón y base con un criterio de penetración máxima de 0,001 [mm] aproximadamente, lo suficiente para que el punzón ejerza una fuerza despreciable. Cuando esto ocurre, el confinamiento está completo y se procede cambiar el modelo a un penalizador lineal, aumentando el valor de los parámetros.

5.5.3. Fase 3: Compresión

Ahora que la valva se encuentra confinada por el punzón, base y paredes, es necesario aumentar el penalizador para que la penetración sea mínima. En este caso no es necesario otorgar nuevamente las direcciones de ortotropía, debido a que, como está confinada, se requiere utilizar los mismos esfuerzos y desplazamientos nodales del paso anterior. Esto se efectúa mediante la creación del archivo formato `.ini`, en que el software `Vulcan` reconoce las condiciones de la fase 2 para comenzar una nueva simulación con condiciones iniciales (esfuerzos y desplazamientos nodales, incluidas las rotaciones sufridas por las direcciones ortótropas). Al emplear condiciones iniciales, es posible utilizar penalizadores o propiedades mecánicas nuevas, por lo que se utiliza un modelo de contacto de tipo penalizador lineal, asignando a los parámetros del punzón, base y paredes un valor de 100.000 (apéndice B.2).

5.5.4. Consideraciones de la simulación y propiedades mecánicas

La simulación se realiza considerando bajas deformaciones, debido a que el desplazamiento al que se somete la concha es de aproximadamente un 1% de su largo total. Se considera un módulo elástico unimodular para cada dirección, debido a la imposibilidad de un ensayo de tracción (sección 3.4.1), obtenidos mediante el ensayo de compresión uniaxial (tabla 5.2). Los coeficientes de Poisson (ν_{ij}) son de 0,2 en todas las direcciones, magnitud extraída de los trabajos de [Davis](#) para materiales no ferrosos [147], y de [Stempflé et al.](#) al obtener el valor de 0,2 para las plaquetas de nacar mediante nanoindentación [148]. Los módulos de corte se estiman para cada orientación usando la relación propuesta por [Huber](#) en 1923 [149, 150] (ec. 5.6), para materiales ortótropos en su zona elástica lineal.

$$G_{ij} = \frac{\sqrt{E_i E_j}}{2(1 + \sqrt{\nu_{ij} \nu_{ji}})} \quad (5.6)$$

5.5.5. Algoritmo de simulación

El programa principal que controla cuándo se ejecutan las librerías de *PCL* [141] y el algoritmo *GSA* [145] es denominado *shellSimulation.py*, el cual interpreta la malla generada en *GiD* (malla de la valva, punzón, base y paredes), calcula los baricentros de los elementos tetraédricos y define las distancias a las cuales se encuentran los elementos de contacto de la valva (distancia entre nodos). Posterior a esto, se crea un archivo formato *.pcd*, el cual contiene los datos de la nube de puntos conformada por los tetraedros. Estos datos son utilizados por la librería *PCL* para el refinado y ajuste de la superficie paramétrica, la que es exportada en formato *.3dm*. Ahora, para interpretar la superficie paramétrica se utiliza el algoritmo *on2json*, un ejecutable que permite convertir archivos *3DM* al formato *JSON*, soportado por *NURBS-Python (geomdl)*, librería **B-spline** y **NURBS spline** para el lenguaje de programación Python que, en este caso, permite interpretar la superficie parametrizada $s(u, v)$ en Python [151]. Se obtienen las proyecciones ortogonales mediante el algoritmo *GSA*, programado en el mismo *shellSimulation.py* para, posteriormente, calcular las direcciones del espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t). Con las direcciones calculadas, se ejecuta la simulación en el software *Vulcan* con el modelo de contacto de penalización cuadrática, con una distancia de los elementos de contacto de 0,2 [mm] para el acomodamiento. Después de asentar la valva, se ejecuta el algoritmo *n_disp.py*, el cual entrega los desplazamientos nodales sólo del set de la valva y en formato binario *.npz*. Se vuelve a ejecutar *shellSimulation.py* y, con las direcciones ortotropas calculadas a partir de sumar las posiciones nodales iniciales con los desplazamientos del archivo *.npz*, se confina la valva hasta una penetración máxima de 0,001 [mm]. Finalmente, se realiza la compresión de la concha con un modelo de penalización lineal ejecutando el algoritmo *makeInitial.py* para utilizar los desplazamientos y esfuerzos nodales como condiciones iniciales en una simulación final.

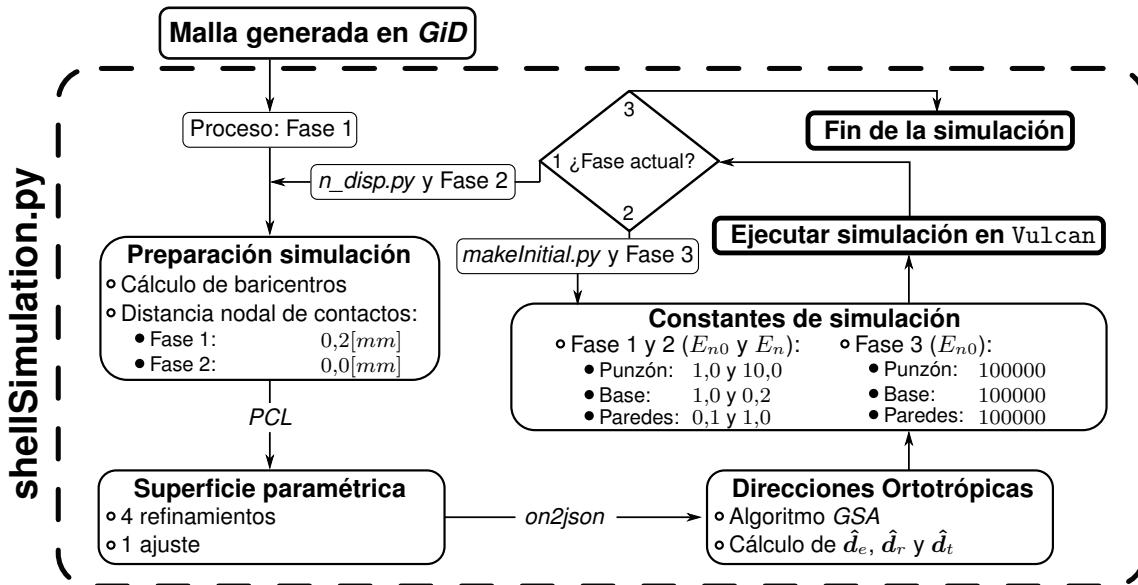


Figura 5.33. Algoritmo de simulación de flexo-compresión

5.6. Resultados de simulación

A diferencia del ensayo de flexo compresión experimental (sección 3.4.2), la simulación numérica otorga la fuerza ejercida por el punzón contra el desplazamiento de la superficie, mientras que en el experimento, ambas medidas, fuerza y desplazamiento, corresponden al otorgado por el punzón. Criterio analizado en la sección 5.5.

Los resultados contemplan la curva experimental y de simulación, de fuerza contra desplazamiento y, para cuantificar la bondad del ajuste y el error entre la curva experimental y de simulación numérica, se utilizan las ecuaciones 3.1 y 3.3 respectivamente.

Además, se analiza visualmente los sectores en que la valva se rompe (experimental) para realizar el contraste con la simulación, para tracción y compresión, mediante el gradiente y dirección de los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3), de tal forma que permita determinar si el modelo es capaz de predecir en qué sector existe concentración de esfuerzos y a partir de cuál dirección de ortotropía. Para determinar si la concentración de esfuerzo observado en la simulación para romper la concha (valva izquierda) es suficiente, se utiliza la valva derecha para obtener el módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}) de las tres zonas en que fue seccionada la valva, tal como se explica en la introducción de este capítulo (5.1). Las propiedades mecánica de cada tamaño se observan a continuación:

Tabla 5.2. Módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}) de las 5 valvas derechas a partir del ensayo de compresión uniaxial

Tamaño	Dirección	E [MPa]	σ_{max} [MPa]	ε_{max} [mm/mm]
1	d_e	574,8	107,2	0,188
	d_r	3080,1	99,9	0,033
	d_t	2071,3	51,8	0,026
2	d_e	$607,5 \pm 79,6$	$78,4 \pm 28,3$	$0,121 \pm 0,036$
	d_r	$2905,7 \pm 245,4$	$91,8 \pm 18,1$	$0,032 \pm 0,004$
	d_t	$2449,8 \pm 247,8$	$111,5 \pm 26,3$	$0,045 \pm 0,007$
3	d_e	$889,6 \pm 46,6$	$127,8 \pm 14,9$	$0,143 \pm 0,01$
	d_r	$3168,1 \pm 213,1$	$87,1 \pm 22,2$	$0,027 \pm 0,005$
	d_t	$2709,1 \pm 398,6$	$72,4 \pm 16,8$	$0,027 \pm 0,002$
4	d_e	$685,1 \pm 22,5$	$132,4 \pm 23,9$	$0,193 \pm 0,034$
	d_r	$2853,4 \pm 366,2$	$93,7 \pm 16,1$	$0,033 \pm 0,002$
	d_t	$2487,8 \pm 32,1$	$105,6 \pm 35,8$	$0,043 \pm 0,014$
5	d_e	$829,5 \pm 254,5$	$151,3 \pm 75,5$	$0,162 \pm 0,063$
	d_r	$2714,9 \pm 143,8$	$235,8 \pm 36,5$	$0,089 \pm 0,017$
	d_t	$2144,8 \pm 131,7$	$114,6 \pm 36,9$	$0,056 \pm 0,022$

Como se observa en la tabla 5.2, el tamaño 1 no presenta SEM debido a su pequeño tamaño (tabla 5.1), por lo tanto, no es posible dividir las conchas del tamaño 1 en tres zonas distintas, por lo que se utiliza el valor único obtenido.

Una de las consideraciones por abordar fue el roce en las simulaciones. Según Abarca, la base del ensayo de flexo-compresión (fig. 3.10) fue diseñada de tal forma que impida el desplazamiento en la superficie de la misma, efecto provocado por el punzón al momento de comprimir la valva. Lo que se observó fue que en una gran cantidad de ensayos experimentales esto no se cumple de forma rigurosa, de tal forma que la curva descrita no es lineal en todo el dominio presentando una curvatura muy pronunciada al inicio de la compresión, omitiendo tal curvatura en el análisis de los ensayos experimentales. Esto es descrito en el apéndice A.2. Se ha nombrado a tal efecto como **acomodamiento en compresión**.

El efecto de roce también se presentó en las simulaciones pero, considerando que la valva confinada presenta una fuerza inicial, la curva del **acomodamiento en compresión** se extiende más allá del intervalo experimental del efecto, siendo menos pronunciada, pero más duradera. Esto se debe a que las primeras reacciones detectadas por el punzón, el modelo de penalización presenta unos parámetros muy bajos, por lo que la valva no realiza el efecto de **acomodamiento en compresión** a los inicios de la curva. El otro problema surge porque sí existe fricción durante el ensayo experimental, por lo tanto, aunque los parámetros de la penalización fueran mayores de igual forma no logaría captar la fricción que ejercen la base y paredes en la valva. Debido a esto, se opta por realizar la simulación con y sin roce en la fase 3 (sección 5.5.3), con un coeficiente de fricción de 0,5 y un modelo de penalización lineal que oscila entre 7500 y 10000, valores obtenidos por iteración hasta que el resultado ya no fuera variable por más que se aumentaran los parámetros (apéndice B.3 y B.2 respectivamente), es decir, que la curva de fuerza contra desplazamiento tuviera un mejor ajuste.

De esta forma, se realizan las cinco simulaciones considerando el valor de los parámetros de penalización descritos en el algoritmo de la simulación de flexo-compresión (fig. 5.33) y, considerando el efecto del roce, se añade para todas las valvas un coeficiente de fricción de 0,5 entre valva-base y valva-pared. No se considera roce entre valva-punzón debido a que en las pruebas descritas en el apéndice B.4 no tuvieron un efecto significativo.

Para cada tamaño se realiza una comparación entre la curva (Fuerza vs Desplazamiento) experimental y simulada (con y sin roce) mediante la bondad de ajuste r^2 y el error *NRMSE*. En este análisis se observa que la simulación que mejor representa el ensayo experimental es la curva **con roce**, por lo que se detalla el campo del esfuerzo principal 1 (σ_1), 2 (σ_2) y 3 (σ_3) para esta simulación, con el fin de identificar la concentración de esfuerzos a tracción y compresión (considerando que σ_1 presenta el mayor efecto de tracción y σ_3 el mayor efecto de compresión), incluyendo la dirección de distribución de los esfuerzos soportados por la concha. Se utiliza la fuerza y no el desplazamiento como criterio de comparación para la concentración de esfuerzos principales, es decir, el contraste se observa en el instante en que, para ambas situaciones, el punzón o celda de carga detecta la fuerza de rotura de la valva (F_{max}). Esto se debe a que la curva experimental y de simulación no son exactamente iguales, por lo que la carga es el efecto directo apreciable. Finalmente, todas las curvas de simulación, como resultado, tuvieron una bondad de ajuste superior a 0,9, excepto la de tamaño 1.

5.6.1. Resultados de simulación: Tamaño 1

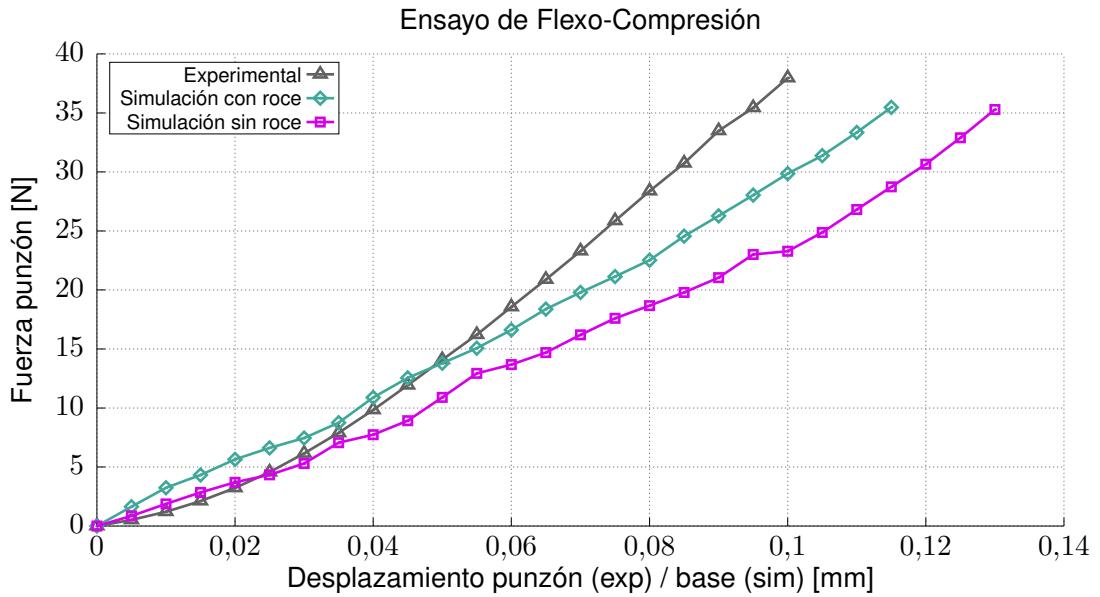


Figura 5.34. Simulación flexo-compresión para el tamaño 1

En la figura 5.34, se aprecia que la simulación sin roce posee la menor bondad de ajuste y mayor error *NRMSD* que la curva con roce (tabla 5.3), alejándose de la curva experimental después de un desplazamiento de 0,05 [mm] aproximadamente. La falta de fricción provoca que la valva disponga de menor restricción de movimiento que su símil con roce, representando una curva más cercana a la experimental y una bondad de ajuste cercana a 0,9. Cabe destacar que la simulación con roce se desplaza un 14 % más de distancia que la curva experimental para alcanzar la misma fuerza.

Tabla 5.3. Fuerza de rotura (F_{max}), desplazamiento de rotura (d_{max}), bondad y error de ajuste de curva experimental y simulación con y sin roce. Tamaño 1

Condición	F_{max} [N]	d_{max} [mm]	r^2	<i>NRMSD</i>
Experimental	39	0,1023	-	-
Con roce	39	0,1169	0,8951	0,1008
Sin roce	39	0,1315	0,6803	0,1760

A partir del análisis de las curvas experimentales y de simulación, se puede observar que el efecto de fricción disminuye el error entre la curva experimental y la simulación. También se aprecia que la curva de simulación sin roce permanece con una curvatura un mayor tiempo que la experimental y con fricción, alcanzando una pendiente similar a la experimental en el último tercio del recorrido.

5.6.1.1. Tamaño 1: simulación con roce. Campo de esfuerzos principales $\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$

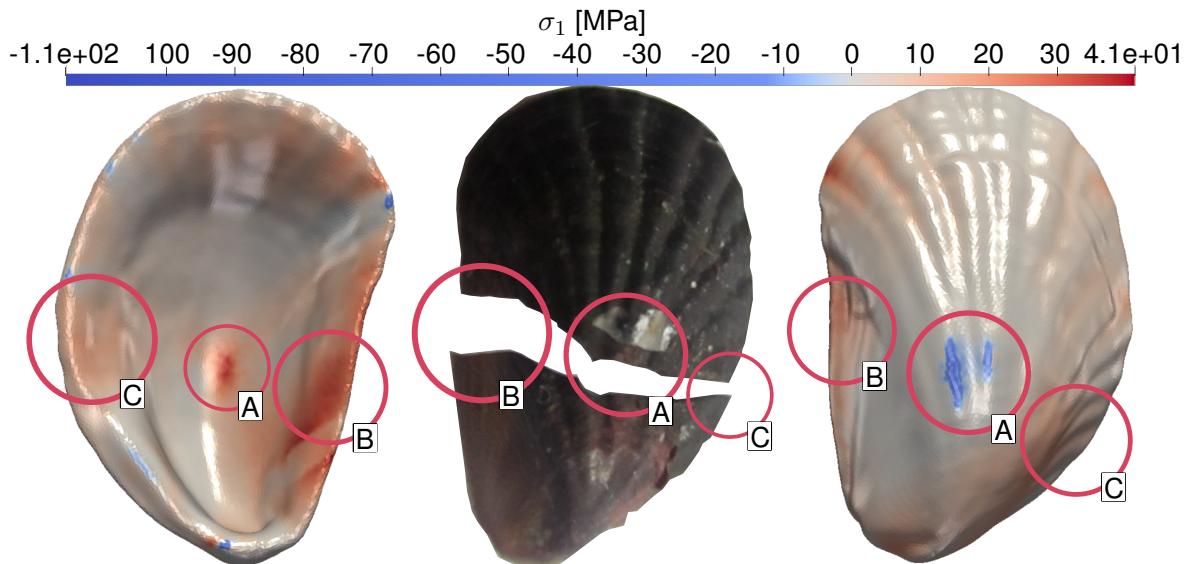


Figura 5.35. Campo del esfuerzo principal 1 (σ_1). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 1

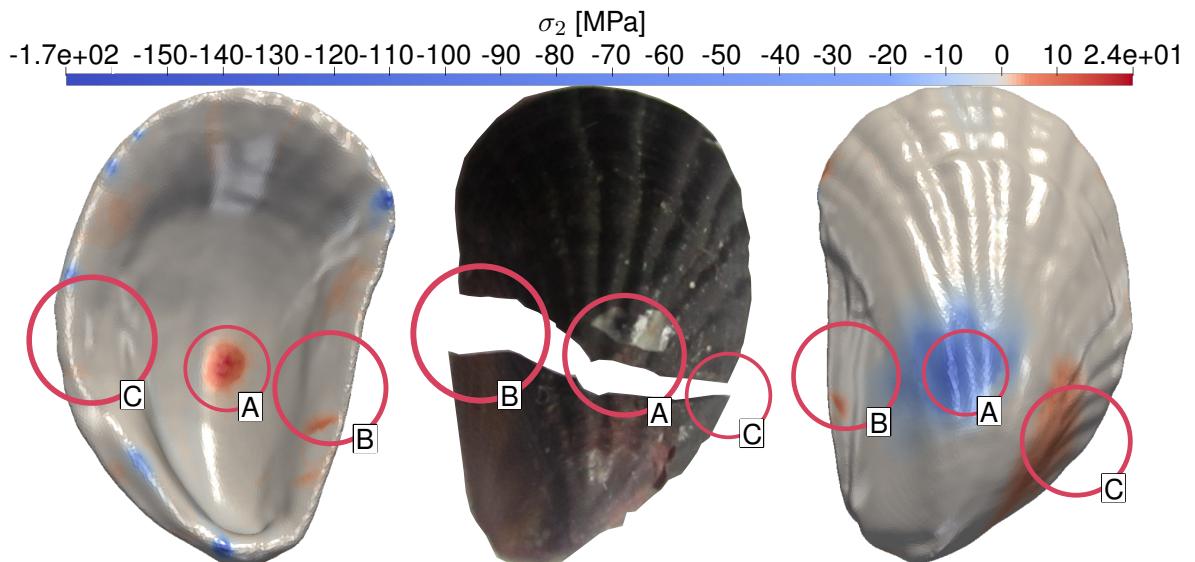


Figura 5.36. Campo del esfuerzo principal 2 (σ_2). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 1

En la figura 5.35 y 5.36 se observa como las zonas de concentración de esfuerzos son equivalentes (A, B y C) para ambos esfuerzos principales, con valores de esfuerzo a tracción máximos para σ_1 y σ_2 de 41 y 24 [MPa] en la zona A (zona cóncava), respectivamente. Los valores de esfuerzo a compresión máximos σ_1 y σ_2 son de 110 y 170 [MPa] en la zona A (zona convexa). Ambos esfuerzos máximos, en tracción y compresión, se concentran en el

sector A, presentando compresión la superficie que realiza el contacto directo con el punzón (zona convexa), mientras que por reacción a la compresión del punzón, la zona interna es sometida a tracción (zona cóncava). Las zonas B y C presentan los siguientes valores más altos a tracción, los cuales corresponden a los mismos sectores en que la valva, mediante el ensayo experimental, sufre la rotura del material. Esto indica que la simulación logra captar las zonas críticas de la valva a partir de las solicitudes del ensayo.

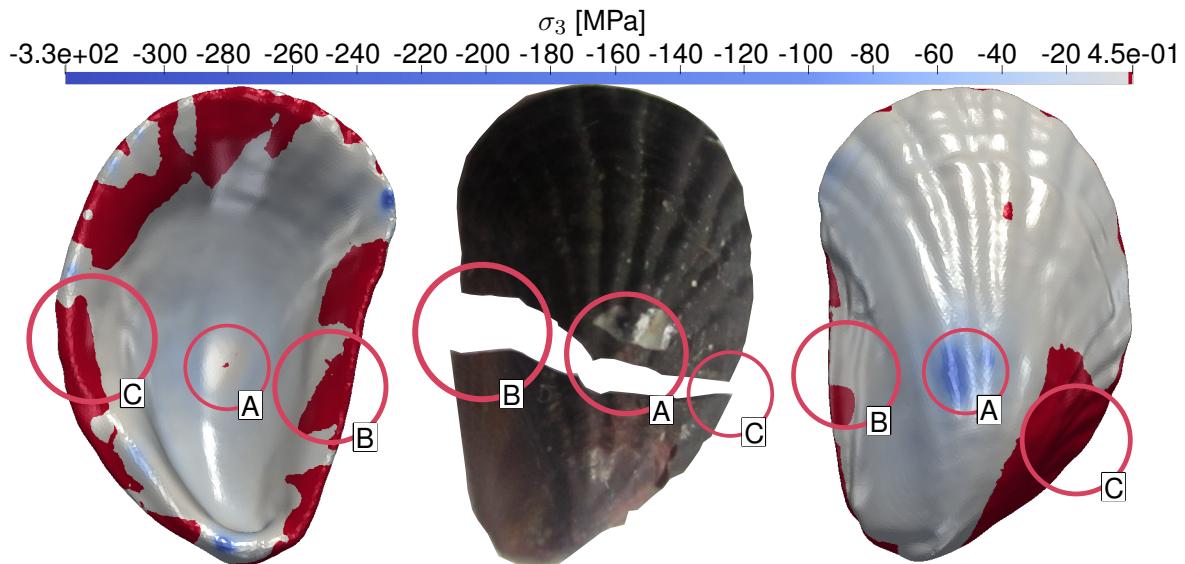


Figura 5.37. Campo del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 1

La figura 5.37 indica que para σ_3 la magnitud del efecto de tracción es insignificante, al contrario de la compresión, el cual ocupa la totalidad de la valva. Esto deja a los sectores B y C sin efectos de esfuerzo significativo para compresión. La concentración de todo el esfuerzo de compresión se observa en el sector A con 330 [MPa]. Considerando este análisis, la simulación indica que el sector A se encuentra con efecto de compresión significativos en 3 direcciones ortogonales entre sí (indicados mediante σ_1 , σ_2 y σ_3), y los sectores B y C con efectos significativos de tracción en dos direcciones ortogonales (indicados mediante σ_1 y σ_2).

A continuación, se realiza el análisis de dirección en que se ejerce el esfuerzo de tracción y compresión para las zonas A, B y C. Además, se procede a detallar el esfuerzo máximo soportado por tal dirección utilizando la siguiente tabla:

Tabla 5.4. M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}). Tamaño 1

Tamaño	Dirección	E [MPa]	σ_{max} [MPa]	ε_{max} [mm/mm]
1	d_e	574,8	107,2	0,188
	d_r	3080,1	99,9	0,033
	d_t	2071,3	51,8	0,026

5.6.1.2. Tamaño 1: simulación con roce. Dirección de esfuerzos principales

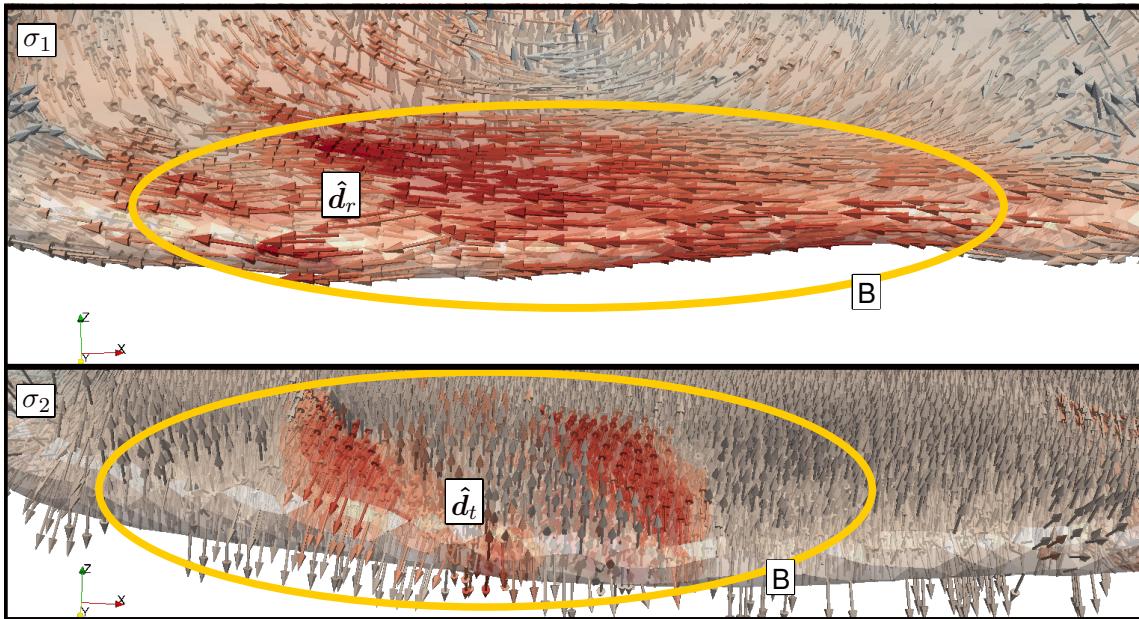


Figura 5.38. Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona B. Software *ParaView*. Tamaño 1

En la figura 5.38 se observa que la zona B, mismo sector en que la valva sufrió la rotura del material, presenta una concentración de esfuerzo a tracción de 41 y 24 [MPa] en las direcciones radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t), respectivamente. Esto indica que la concentración de esfuerzos se distribuye en las mismas direcciones definidas para el material. Según la tabla 5.4, el esfuerzo presentado no sería suficiente para la rotura de la valva en alguna de las dos direcciones.

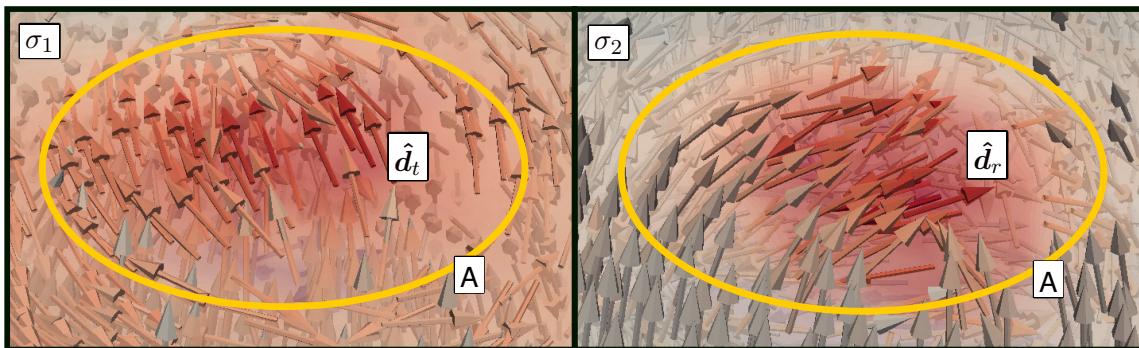


Figura 5.39. Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona A a tracción. Software *ParaView*. Tamaño 1

En la figura 5.39 se observa que la zona A presenta dos esfuerzos de tracción a direcciones ortogonales entre sí, con valores de 41 y 24 [MPa] aproximadamente. Las direcciones de ambos esfuerzos principales (σ_1 y σ_2) son coincidentes con las direcciones ortótropas del material; tangencial (\hat{d}_t) y radial (\hat{d}_r) respectivamente.

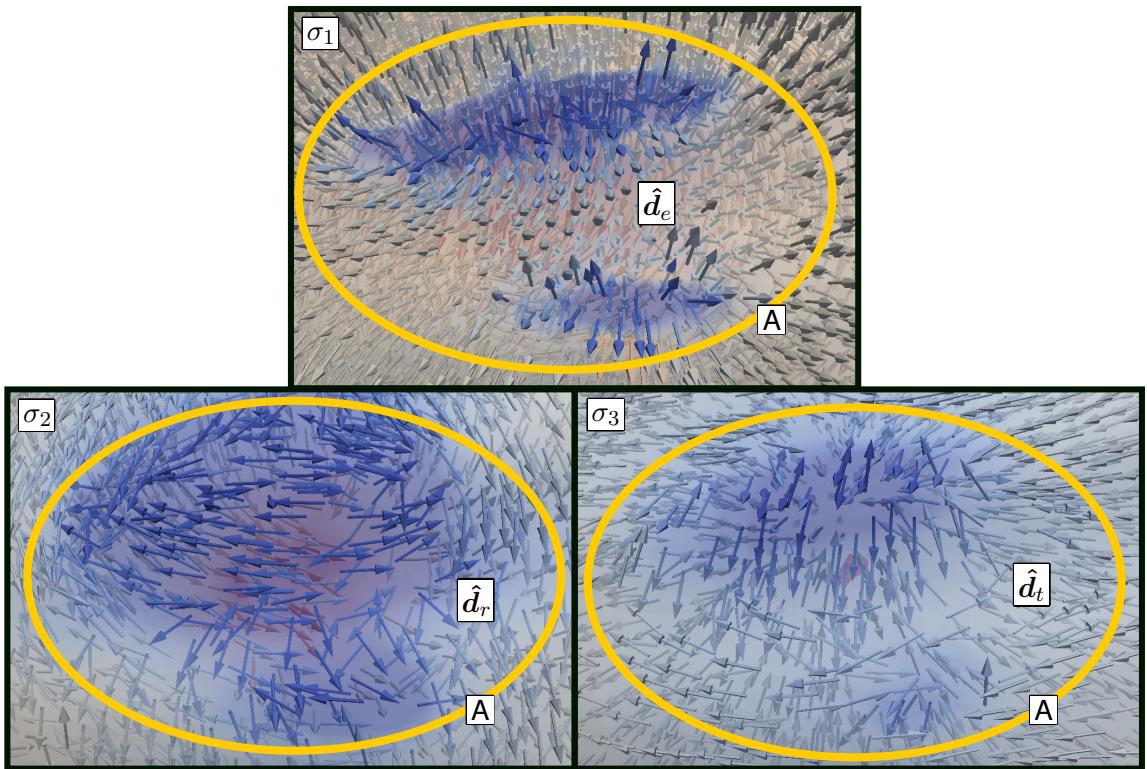


Figura 5.40. Concentración de esfuerzos: σ_1 , σ_2 y σ_3 para zona A a compresión. Software *ParaView*. Tamaño 1

En la figura 5.40 se observa que la zona de contacto del punzón presenta un estado compresión en tres direcciones normales entre sí, las cuales son coincidentes con las direcciones ortótropas del material. Las direcciones del espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) coinciden con las direcciones de los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3), cuyos valores corresponden a 110, 170 y 330 [MPa] respectivamente. Esto indica que los 3 esfuerzos principales alcanzan el esfuerzo máximo soportado por el material para las tres direcciones ortótropas (tabla 5.4), por lo que el punto crítico es la zona en que se realiza contacto con el punzón.

Realizando el seguimiento del esfuerzo de compresión en la zona A (zona convexa), se determina que el valor del esfuerzo máximo, en la dirección tangencial (\hat{d}_t), se alcanza cuando el punzón registra 10 [N], la dirección radial (\hat{d}_r) lo alcanza a los 17 [N] y, el valor máximo en la dirección del espesor (\hat{d}_e), a los 34 [N], el más cercano a los 39 [N] (fuerza F_{max} de ruptura experimental detallada en tabla 5.3). Esto indica que la valva, a pesar de soportar el esfuerzo de compresión máximo del material en la dirección tangencial (\hat{d}_t) y radial (\hat{d}_r) en los inicios del ensayo, no sufre una ruptura total de su estructura hasta que se alcanza el esfuerzo máximo de compresión en la dirección del espesor (\hat{d}_e), o el esfuerzo máximo a tracción en la dirección tangencial (\hat{d}_t) finalizando el ensayo.

Esto puede ser debido a que la zona afectada por la compresión es muy pequeña comparada con la totalidad de la concha, por lo que la valva sufre roturas del material en un pequeño sector (zona A en la superficie convexa) a partir de los efectos de compresión. Estos efectos pueden no ser suficientes para romper la valva, hasta que en la misma zona A se presenta el efecto de tracción en el lado cóncavo. Para comprobar esto, se observa en la figura 5.41 la distribución de los esfuerzos principales en el espesor de la valva, en contraste con la figura 5.40, en la que se observa la distribución de estos esfuerzos en la superficie convexa.

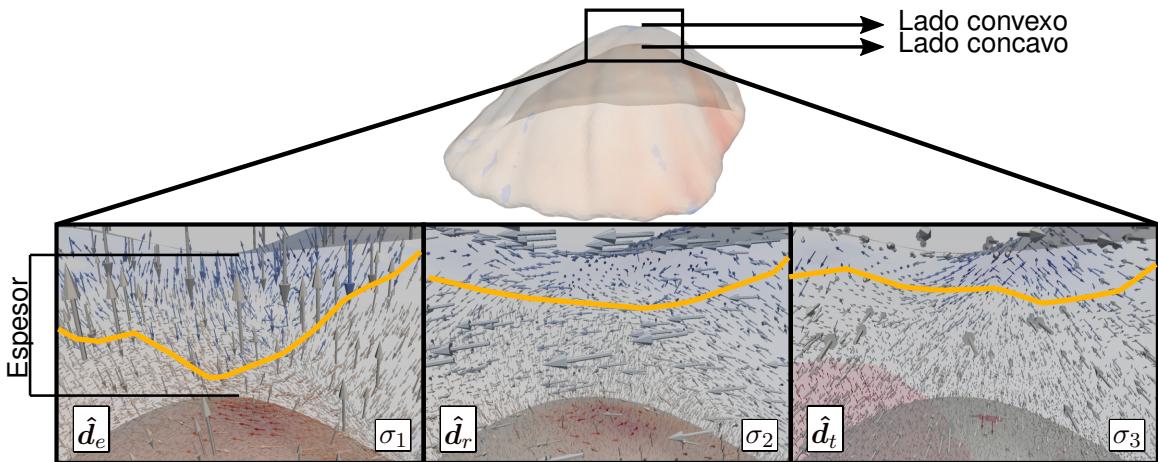


Figura 5.41. Concentración de esfuerzos: dirección espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) para zona A a compresión. Software *ParaView*. Tamaño 1

En la figura 5.40 se observa que, aunque el esfuerzo principal 1 (σ_1) en la dirección del espesor (\hat{d}_e) esté menos distribuido en la superficie que las demás direcciones, este encuentra presente en casi la totalidad del grosor de la concha (fig. 5.41).

Esto último, coincide con lo visto experimentalmente en el ensayo de flexo-compresión, cuyas valvas sometidas al ensayo sufrían una delaminación en la zona de contacto con el punzón (fig. 4.6), indicando que posiblemente se trate de una concentración de esfuerzos en las direcciones coincidentes a los esfuerzos principales 1 y 2 (σ_2 y σ_3), es decir, con las direcciones radial y tangencial (\hat{d}_r y \hat{d}_t), respectivamente.

Cabe destacar que las probetas prismáticas que sufrieron delaminación fueron las que se sometieron a la compresión uniaxial en estas mismas direcciones (fig. 4.1), pudiendo dar indicios que, bajo la solicitud de flexo-compresión, el material podría estar sufriendo una fractura tortuosa en la zona de contacto (explicado en la sección 4.2.2).

En la figura 5.42 se puede observar como las direcciones del esfuerzo principal 3 (σ_3) coinciden con las estrías de la valva cuando esta se encuentra en su totalidad a compresión.



Figura 5.42. Dirección del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software *ParaView*. Tamaño 1

5.6.2. Resultados de simulación: Tamaño 2

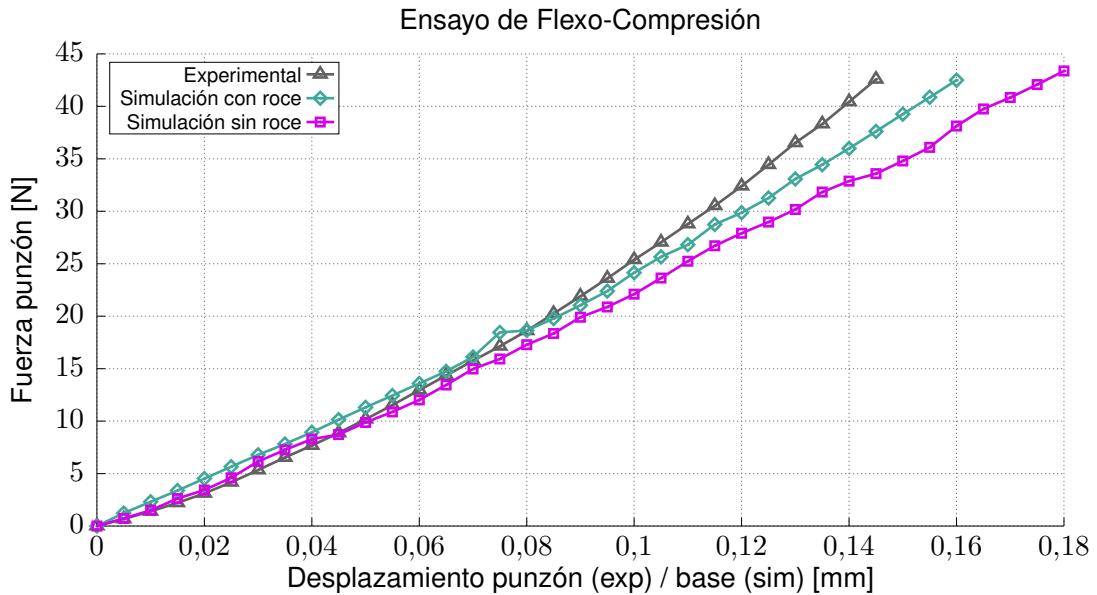


Figura 5.43. Simulación flexo-compresión para el tamaño 2

En la figura 5.43, se aprecia que ambas curvas se comienzan a alejar de la curva experimental a los 0,1 [mm] aproximadamente. La simulación sin roce posee la menor bondad de ajuste y mayor error *NRMSD* (tabla 5.5) que la simulación con roce. La falta de fricción provoca que la valva disponga de menor restricción de movimiento que su símil con roce, la que además de representar una curva más cercana a la experimental, presenta mayor bondad de ajuste. La simulación con roce se desplaza un 9,6 % más de distancia que la curva experimental para alcanzar la misma fuerza.

Tabla 5.5. Fuerza de rotura (F_{max}), desplazamiento de rotura (d_{max}), bondad y error de ajuste de curva experimental y simulación con y sin roce. Tamaño 2

Condición	F_{max} [N]	d_{max} [mm]	r^2	<i>NRMSD</i>
Experimental	43,5	0,1478	-	-
Con roce	43,5	0,1621	0,9754	0,0461
Sin roce	43,5	0,1816	0,9284	0,0787

Al igual que en el tamaño 1 (sección 5.6.1), se observa que el efecto de fricción disminuye el error entre la curva experimental y la simulación. Es necesario destacar que ambas curvas de simulación presentan una bondad de ajuste superior a 0,9, por lo que ambas simulaciones demuestran ser una buena interpretación del ensayo experimental.

5.6.2.1. Tamaño 2: simulación con roce. Campo de esfuerzos principales $\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$

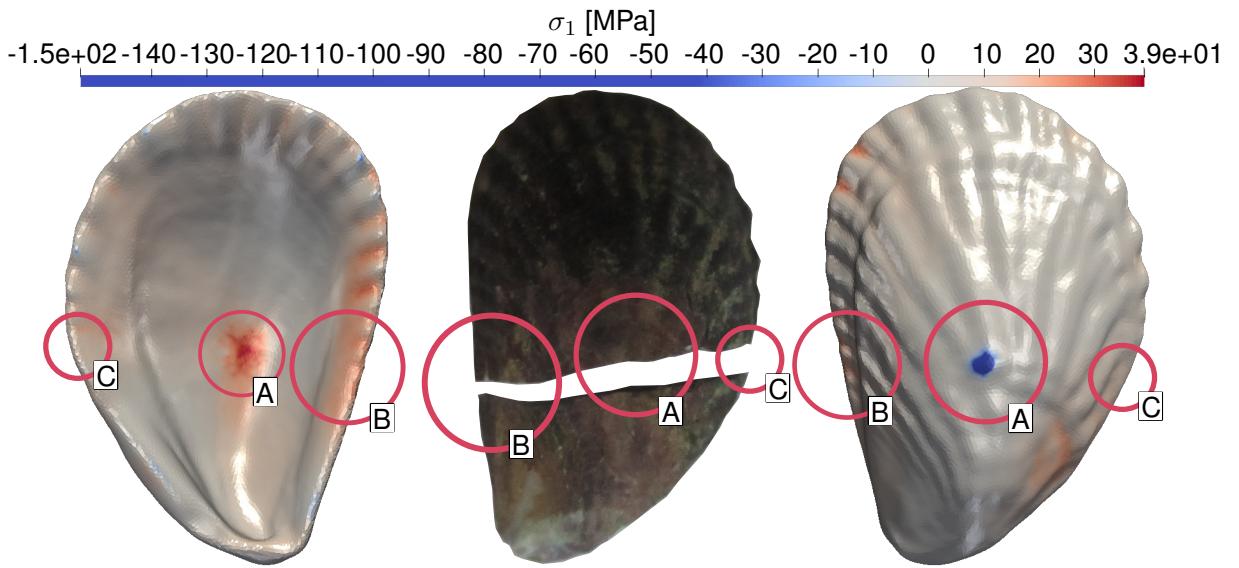


Figura 5.44. Campo del esfuerzo principal 1 (σ_1). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 2

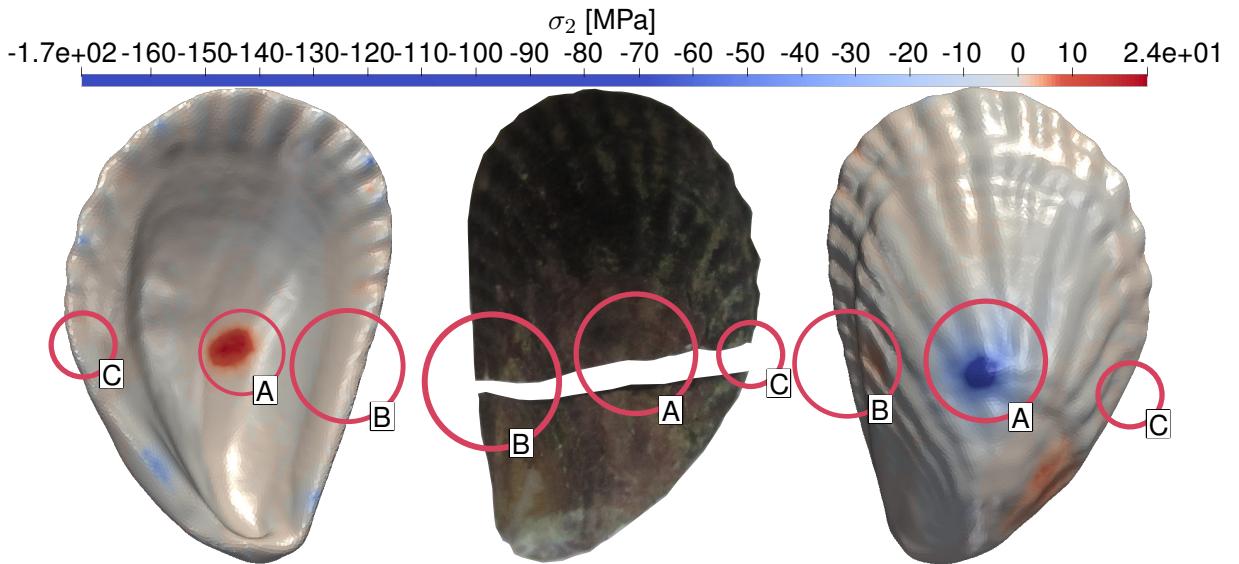


Figura 5.45. Campo del esfuerzo principal 2 (σ_2). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 2

En la figura 5.44 y 5.45 se observa como las zonas de concentración de esfuerzo A y B son equivalentes para ambos esfuerzos principales, siendo los valores de esfuerzo a tracción máximos para σ_1 y σ_2 de 39 y 24 [MPa] en la zona A (zona cóncava), respectivamente. Los valores de esfuerzo a compresión máximos σ_1 y σ_2 son de 150 y 170 [MPa] en la zona A (zona convexa). Ambos esfuerzos máximos, en tracción y compresión, se concentran en el

sector A, presentando compresión la superficie que realiza el contacto directo con el punzón (zona convexa), mientras que por reacción a la compresión del punzón, la zona interna es sometida a tracción (zona cóncava). La zona B destaca al presentar el siguiente valor más alto a tracción y ser la zona en que la valva sufre la rotura del material. Esto indica que la simulación logra captar las zonas críticas de la valva a partir de las solicitudes del ensayo.

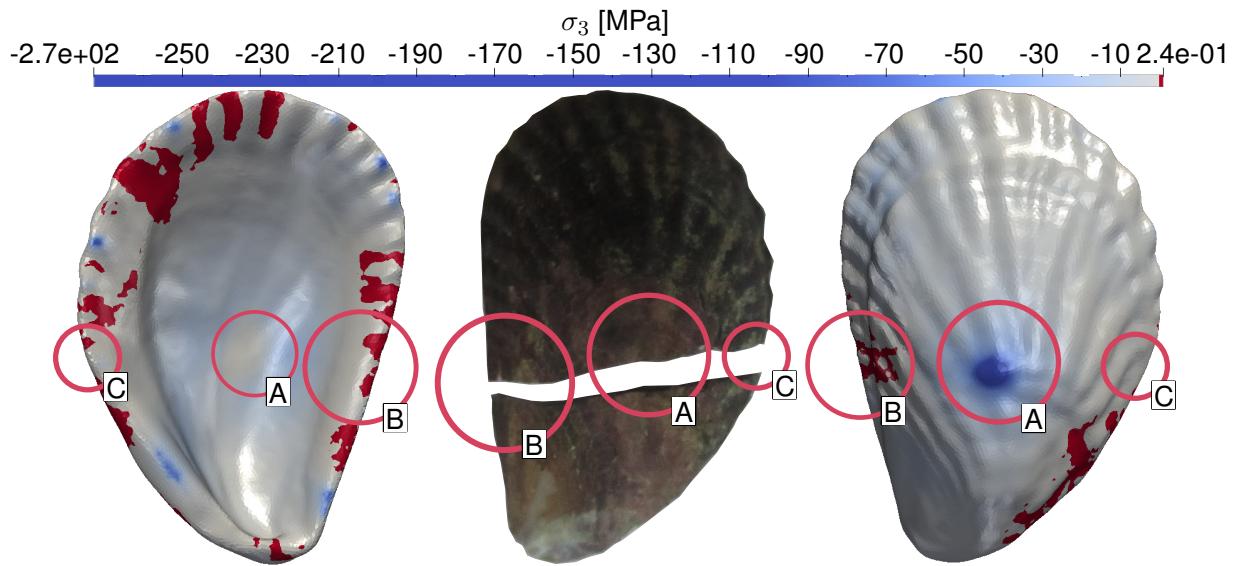


Figura 5.46. Campo del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 2

La figura 5.46 indica que para σ_3 la magnitud del efecto de tracción es insignificante, al contrario de la compresión, el cual ocupa la totalidad de la valva. Esto deja a los sectores B y C sin efectos de esfuerzo significativo para compresión. La concentración de todo el esfuerzo de compresión se observa en el sector A (zona convexa) con 270 [MPa]. Considerando este análisis, la simulación indica que el sector A se encuentra con efecto de compresión significativos en 3 direcciones ortogonales entre sí (indicados mediante σ_1 , σ_2 y σ_3).

A continuación se realiza el análisis de dirección en que se ejerce el esfuerzo de tracción y compresión para la zona A. Además, se procede a detallar el esfuerzo máximo soportado por tal dirección utilizando la siguiente tabla:

Tabla 5.6. M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}). Tamaño 2

Tamaño	Dirección	E [MPa]	σ_{max} [MPa]	ε_{max} [mm/mm]
2	d_e	$607,5 \pm 79,6$	$78,4 \pm 28,3$	$0,121 \pm 0,036$
	d_r	$2905,7 \pm 245,4$	$91,8 \pm 18,1$	$0,032 \pm 0,004$
	d_t	$2449,8 \pm 247,8$	$111,5 \pm 26,3$	$0,045 \pm 0,007$

5.6.2.2. Tamaño 2: simulación con roce. Dirección de esfuerzos principales

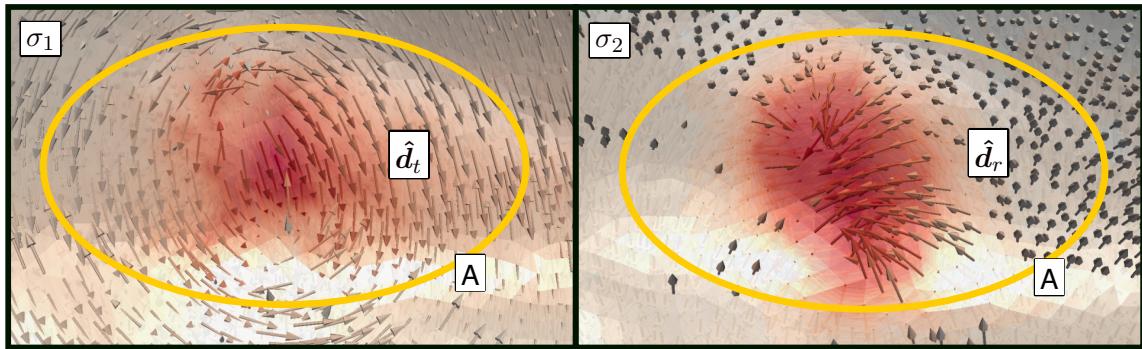


Figura 5.47. Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona A a tracción. Software *ParaView*. Tamaño 2

En la figura 5.47 se observa que la zona A presenta dos esfuerzos de tracción a direcciones ortogonales entre sí, con valores de 39 y 24 [MPa] aproximadamente. Las direcciones de ambos esfuerzos principales (σ_1 y σ_2) son coincidentes con las direcciones ortótropas del material; tangencial (\hat{d}_t) y radial (\hat{d}_r) respectivamente. Este mismo efecto se presenta en el análisis de esfuerzos del tamaño 1 (sección 5.6.1.2).

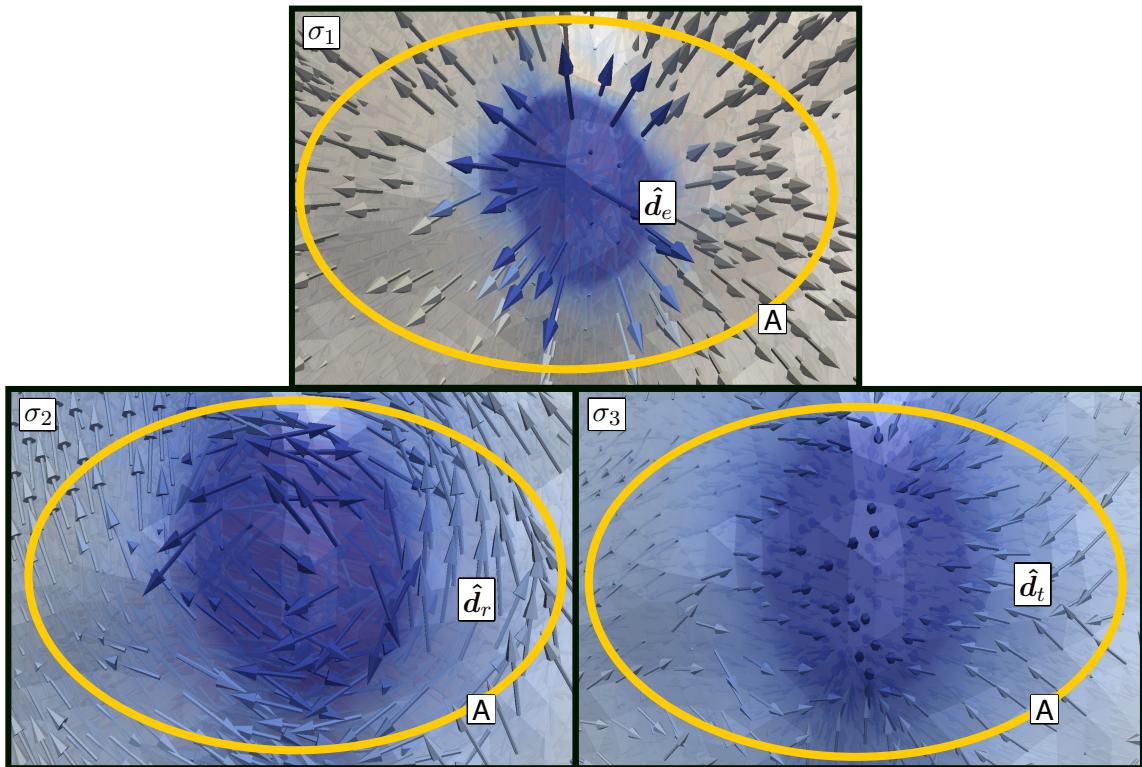


Figura 5.48. Concentración de esfuerzos: σ_1 , σ_2 y σ_3 para zona A a compresión. Software *ParaView*. Tamaño 2

En la figura 5.48 se observa que la zona de contacto del punzón presenta un estado compresión en tres direcciones normales entre sí, las cuales son coincidentes con las direcciones ortótropas del material al igual que en el análisis de esfuerzo del tamaño 1 (sección 5.6.1.2). La direcciones del espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) coinciden con los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3), cuyos valores corresponden a 150, 170 y 270 [MPa] respectivamente. Esto indica que los 3 esfuerzos principales alcanzan el esfuerzo máximo soportado por el material para las tres direcciones ortótropas (tabla 5.6), por lo que el punto crítico es la zona en que se realiza contacto con el punzón.

Realizando el seguimiento del esfuerzo de compresión en la zona A (zona convexa), se determina que el valor del esfuerzo máximo, en la dirección tangencial (\hat{d}_t), se alcanza cuando el punzón registra 10 [N], la dirección radial (\hat{d}_r) lo alcanza a los 15 [N] y, el valor máximo en la dirección del espesor (\hat{d}_e), a los 25 [N], el más cercano a los 43,5 [N] (fuerza F_{max} de ruptura experimental detallada en tabla 5.5).

Al igual que en el tamaño 1 (sección 5.6.1.2), esto puede ser debido a que la zona afectada por la compresión es muy pequeña comparada con la totalidad de la concha, por lo que la valva sufre roturas del material en un pequeño sector (zona A en la superficie convexa) a partir de los efectos de compresión, pero sin ser suficientes para romper la valva. Se observa en la figura 5.49 la distribución de los esfuerzos principales en el espesor de la valva, en contraste con la figura 5.48, con la distribución de estos esfuerzos en la superficie convexa.

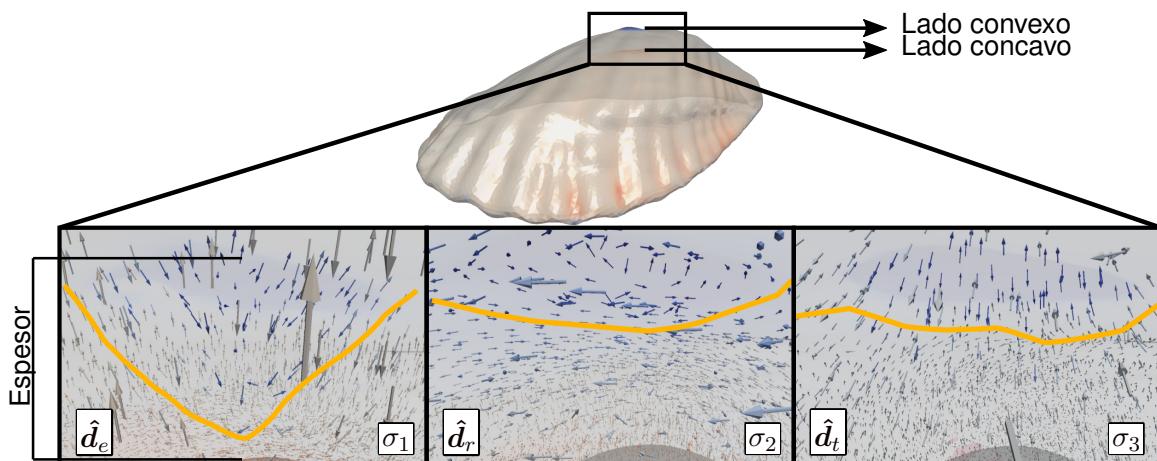


Figura 5.49. Concentración de esfuerzos: dirección espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) para zona A a compresión. Software *ParaView*. Tamaño 2

En la figura 5.48 se observa que, aunque el esfuerzo principal 1 (σ_1) en la dirección del espesor (\hat{d}_e) esté menos distribuido en la superficie que las demás direcciones, este se encuentra presente en casi la totalidad del grosor de la concha (fig. 5.49), al igual que en el tamaño 1 (sección 5.6.1.2). En la figura 5.50 se observa como las direcciones del esfuerzo principal 3 (σ_3) coinciden con las estrías de la valva.

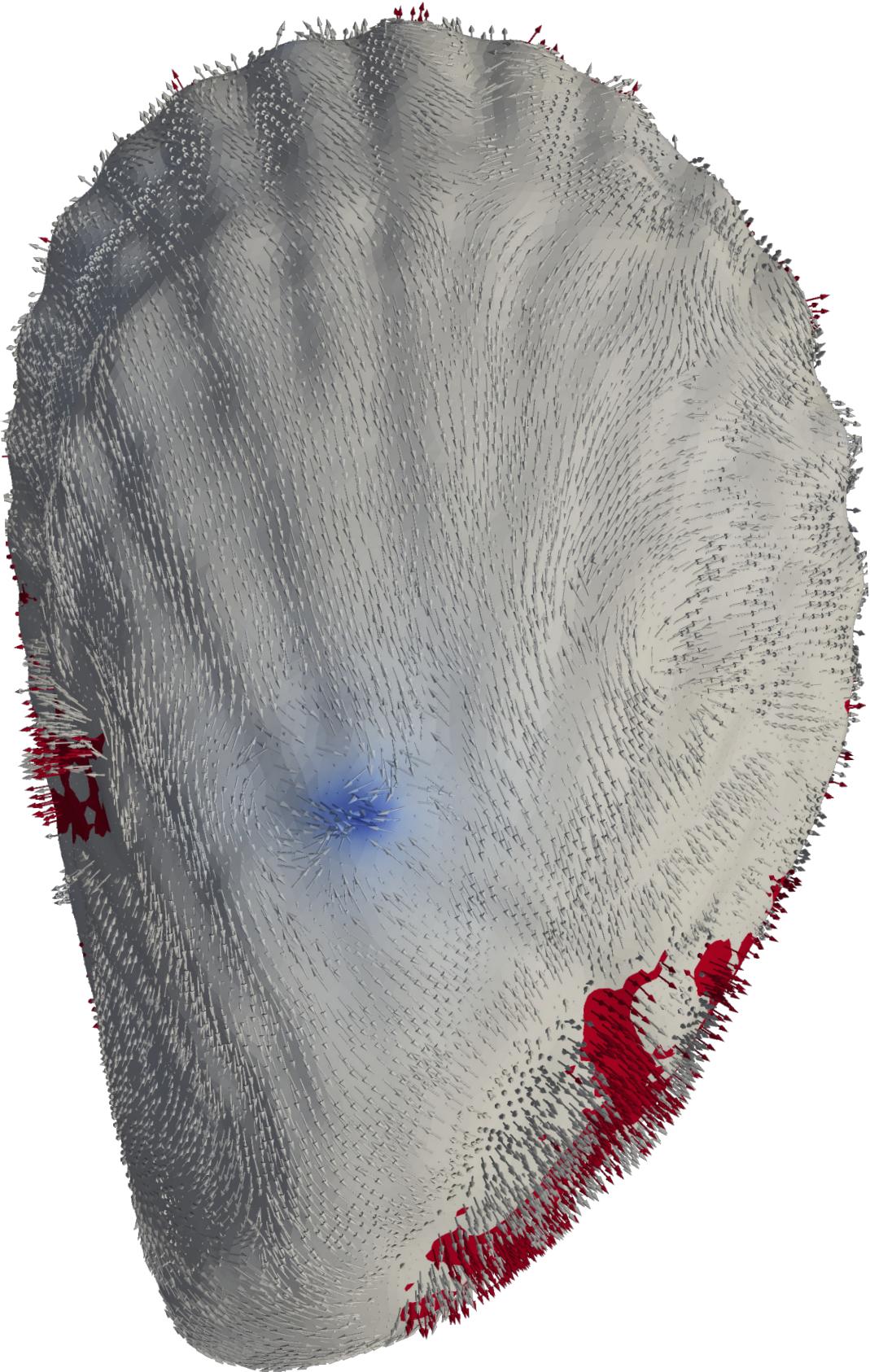


Figura 5.50. Dirección del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software *ParaView*. Tamaño 2

5.6.3. Resultados de simulación: Tamaño 3

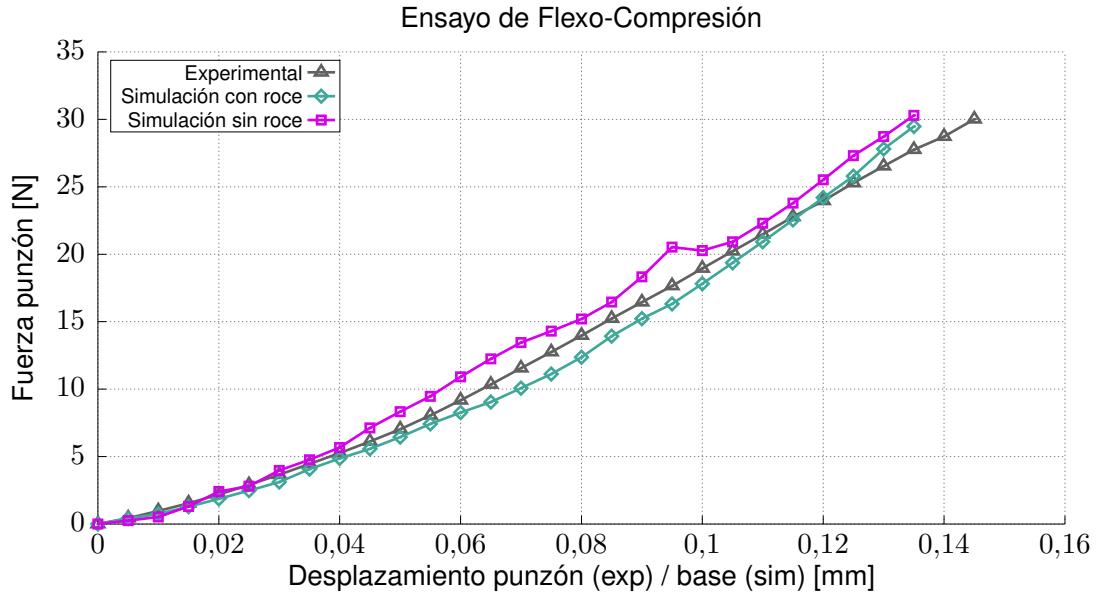


Figura 5.51. Simulación flexo-compresión para el tamaño 3

En la figura 5.51 se aprecia que ambas curvas de simulación, con y sin roce, presentan una bondad de ajuste muy alta (tabla 5.7). La curva experimental se encuentra entre ambas curvas de simulación, muy cercana a ambas.

Tabla 5.7. Fuerza de rotura (F_{max}), desplazamiento de rotura (d_{max}), bondad y error de ajuste de curva experimental y simulación con y sin roce. Tamaño 3

Condición	F_{max} [N]	d_{max} [mm]	r^2	NRMSD
Experimental	31	0,1495	-	-
Con roce	31	0,1399	0,9879	0,0303
Sin roce	31	0,1378	0,9740	0,0435

Según la tabla 5.7, la curva experimental y de simulación con roce al alcanzar la fuerza de rotura de 31 [N], presentan una diferencia de 6,4 % en el desplazamiento.

Al igual que en el tamaño 1 y 2 (sección 5.6.1 y 5.6.2), es posible observar que la curva con roce posee una bondad de ajuste mayor y error NRMSD menor a la sin roce, sin embargo ambas curvas se ajustan muy bien a la curva experimental según estos dos parámetros. Es necesario destacar que ambas curvas de simulación presentan una bondad de ajuste superior a 0,9, por lo que ambas simulaciones demuestran ser una buena interpretación del ensayo experimental.

5.6.3.1. Tamaño 3: simulación con roce. Campo de esfuerzos principales $\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$

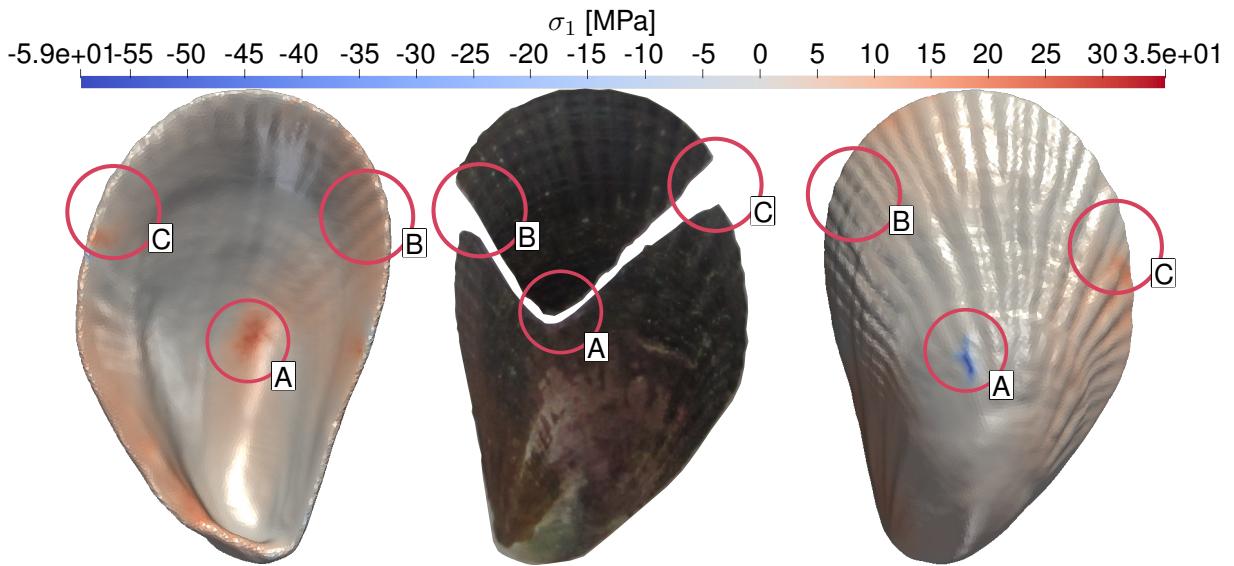


Figura 5.52. Campo del esfuerzo principal 1 (σ_1). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 3

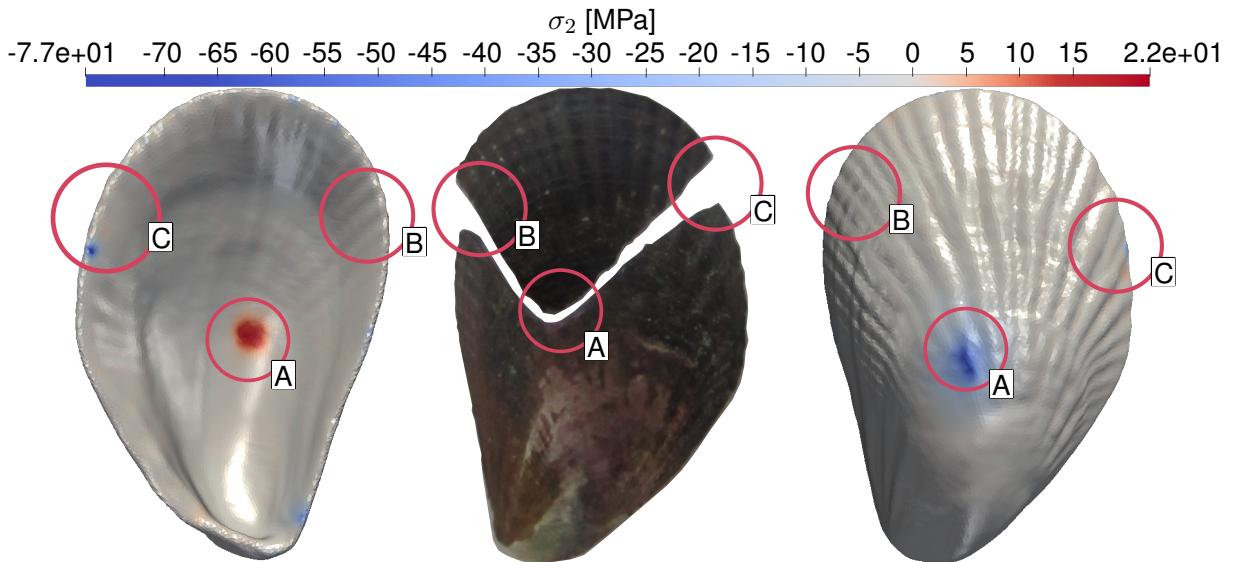


Figura 5.53. Campo del esfuerzo principal 2 (σ_2). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 3

En la figura 5.52 y 5.53 se observa como las zonas de concentración de esfuerzo A y C son equivalentes para ambos esfuerzos principales. Los valores de esfuerzo a tracción máxima para σ_1 y σ_2 son de 35 y 22 [MPa] en la zona A (zona cóncava), respectivamente. Los valores de esfuerzo a compresión máximos σ_1 y σ_2 son de 59 y 77 [MPa] en la zona A (zona convexa). Ambos esfuerzos máximos, en tracción y compresión, se concentran en el

sector A presentando compresión la superficie que realiza el contacto directo con el punzón (zona convexa), mientras que, por reacción a la compresión del punzón, la zona interna es sometida a tracción (zona cóncava). La zona C destaca al presentar el siguiente valor más alto a tracción y ser la zona en que la valva sufre la rotura del material. Esto indica que la simulación logra captar las zonas críticas de la valva a partir de las solicitudes del ensayo.

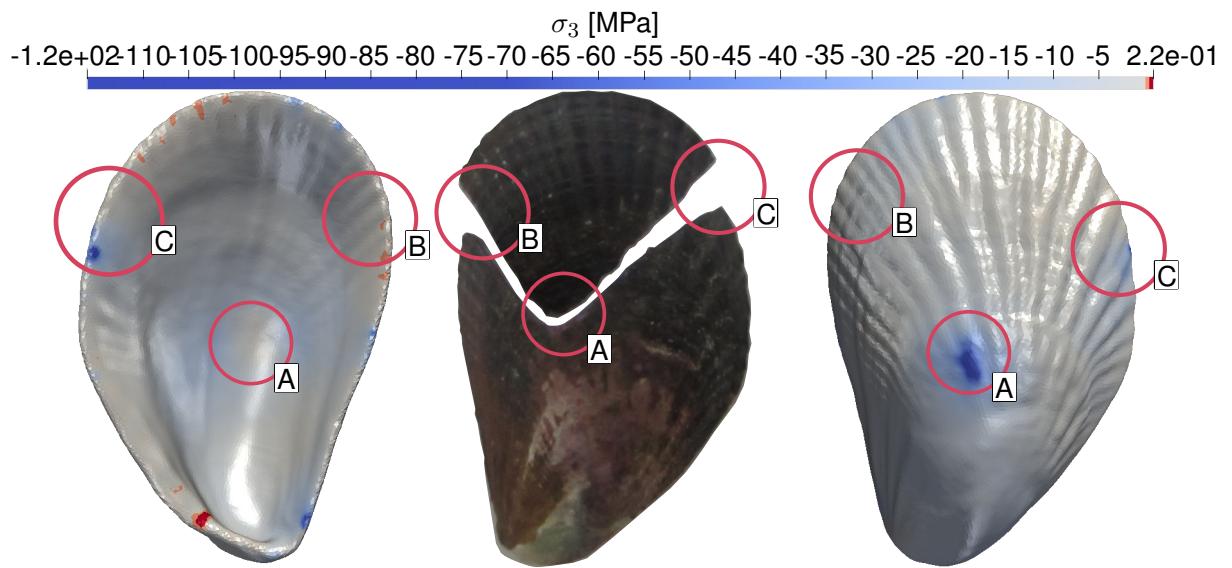


Figura 5.54. Campo del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 3

La figura 5.54 indica que para σ_3 la magnitud del efecto de tracción es insignificante, al contrario de la compresión, el cual ocupa la totalidad de la valva dejando al sector B sin efectos de esfuerzo significativo para compresión, no así para tracción. La concentración de todo el esfuerzo de compresión se observa en el sector A (zona convexa) con 120 [MPa]. Considerando este análisis, la simulación indica que el sector A se encuentra con efecto de compresión significativos en 3 direcciones ortogonales entre sí (indicados mediante σ_1 , σ_2 y σ_3).

A continuación se realiza el análisis de dirección en que se ejerce el esfuerzo de tracción y compresión para la zona A, B y C. Además, se procede a detallar el esfuerzo máximo soportado por tales direcciones utilizando la siguiente tabla:

Tabla 5.8. M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}). Tamaño 3

Tamaño	Dirección	E [MPa]	σ_{max} [MPa]	ε_{max} [mm/mm]
3	d_e	$889,6 \pm 46,6$	$127,8 \pm 14,9$	$0,143 \pm 0,01$
	d_r	$3168,1 \pm 213,1$	$87,1 \pm 22,2$	$0,027 \pm 0,005$
	d_t	$2709,1 \pm 398,6$	$72,4 \pm 16,8$	$0,027 \pm 0,002$

5.6.3.2. Tamaño 3: simulación con roce. Dirección de esfuerzos principales

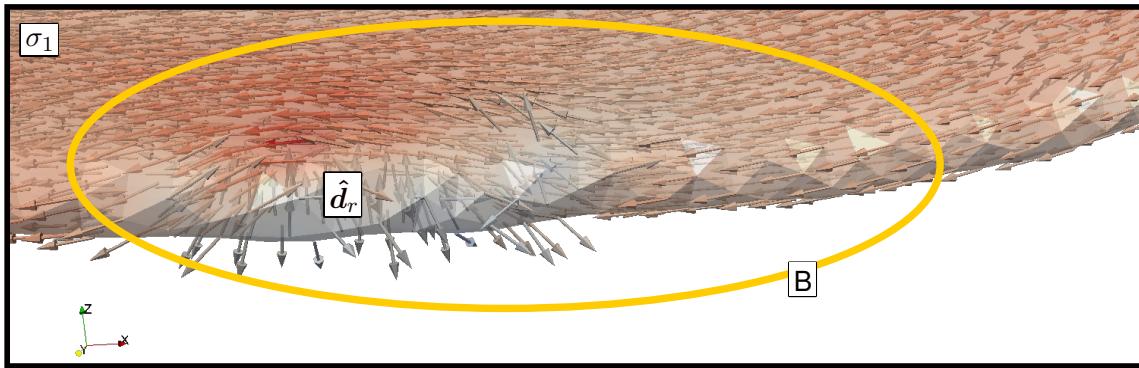


Figura 5.55. Concentración de esfuerzos: σ_1 para zona B. Software *ParaView*. Tamaño 3

En la figura 5.55 se observa que la zona B, mismo sector en que la valva sufrió la rotura del material, presenta una concentración de esfuerzo a tracción de 35 [MPa], mientras que en la figura 5.56 es posible apreciar una concentración de esfuerzo de tracción, de 41 y 24 [MPa] en las direcciones radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) respectivamente, es decir, la concentración de esfuerzos se distribuye en las mismas direcciones definidas para el material. Según la tabla 5.8 el esfuerzo presentado en ambas zonas (B y C) no sería suficiente para la rotura de la valva en alguna de las dos direcciones.

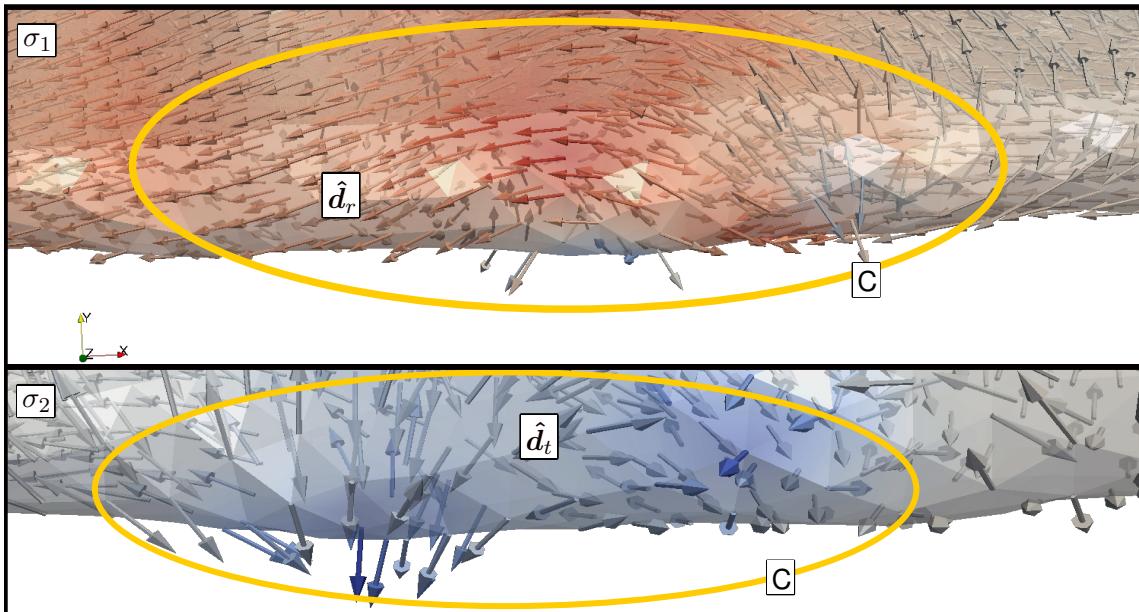


Figura 5.56. Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona C. Software *ParaView*. Tamaño 3

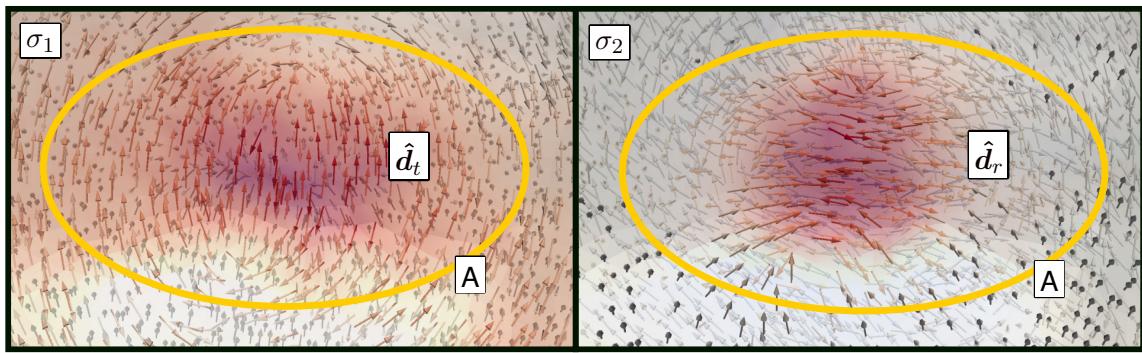


Figura 5.57. Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona A a tracción. Software *ParaView*. Tamaño 3

En la figura 5.57 se observa que la zona A presenta dos esfuerzos de tracción a direcciones ortogonales entre sí, con valores de 35 y 22 [MPa] aproximadamente. Las direcciones de ambos esfuerzos principales (σ_1 y σ_2) son coincidentes con las direcciones ortótropas del material; tangencial (\hat{d}_t) y radial (\hat{d}_r) respectivamente. Este mismo efecto se presenta en el análisis de esfuerzos del tamaño 1 y 2 (sección 5.6.1.2 y 5.6.2.2).

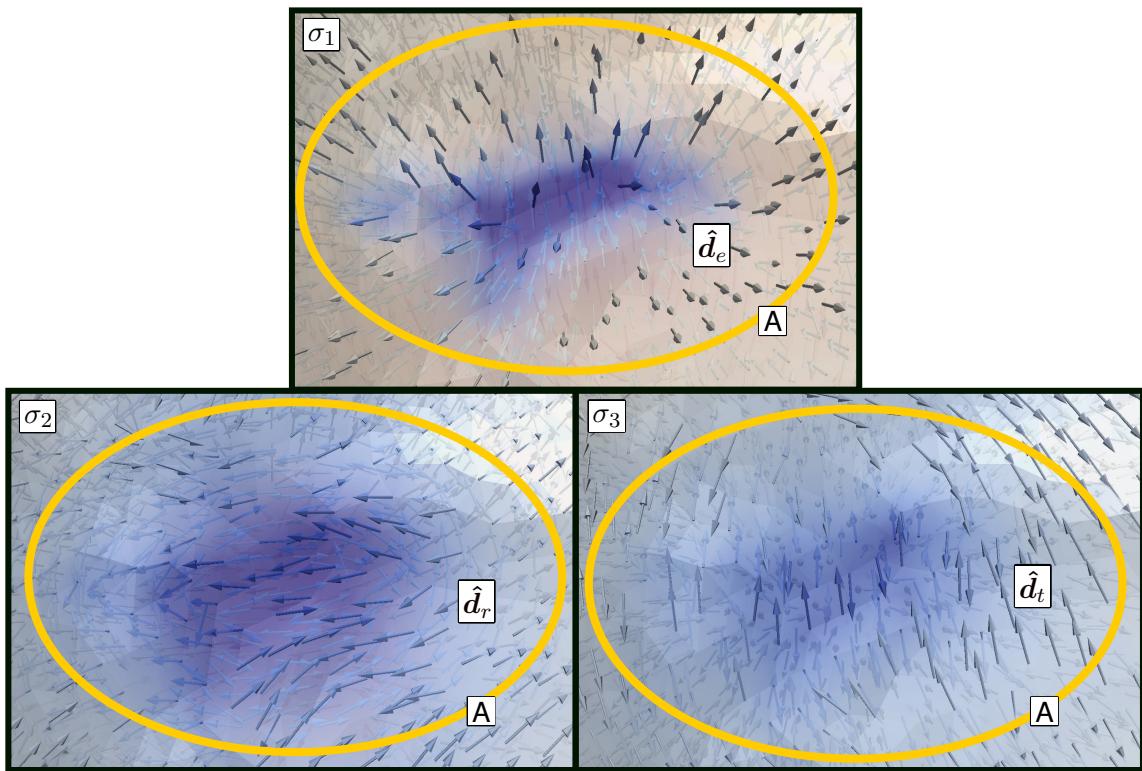


Figura 5.58. Concentración de esfuerzos: σ_1 , σ_2 y σ_3 para zona A a compresión. Software *ParaView*. Tamaño 3

En la figura 5.58 se observa que la zona de contacto del punzón presenta un estado compresión en tres direcciones normales entre sí, las cuales son coincidentes con las direc-

ciones ortótropas del material al igual que en el análisis de esfuerzo del tamaño 1 y 2 (sección 5.6.1.2 y 5.6.2.2). La direcciones del espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) coinciden con los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3), cuyos valores corresponden a 59, 77 y 120 [MPa] respectivamente. Esto indica que 2 de los 3 esfuerzos principales (σ_2 y σ_3) alcanzan el esfuerzo máximo soportado por el material para las tres direcciones ortótropas (tabla 5.8), por lo que el punto crítico es la zona en que se realiza contacto con el punzón.

Realizando el seguimiento del esfuerzo de compresión en la zona A (zona convexa) se determina que el valor del esfuerzo máximo, en la dirección tangencial (\hat{d}_t), se alcanza cuando el punzón registra 19 [N] y la dirección radial (\hat{d}_r) lo alcanza a los 25 [N]. El valor del esfuerzo máximo en la dirección del espesor (\hat{d}_e) no es alcanzado para este tamaño.

Al igual que en el tamaño 1 y 2 (sección 5.6.1.2 y 5.6.2.2), esto puede ser debido a que la zona afectada por la compresión es muy pequeña comparada con la totalidad de la concha, por lo que la valva sufre roturas del material en un pequeño sector (zona A en la superficie convexa) a partir de los efectos de compresión. Estos efectos pueden no ser suficientes para romper la valva, hasta que en la misma zona A se presenta el efecto de tracción en el lado concavo. Para comprobar esto se observa en la figura 5.59 la distribución de los esfuerzos principales en el espesor de la valva, en contraste con la figura 5.58, en la que se observa la distribución de estos esfuerzos en la superficie convexa.

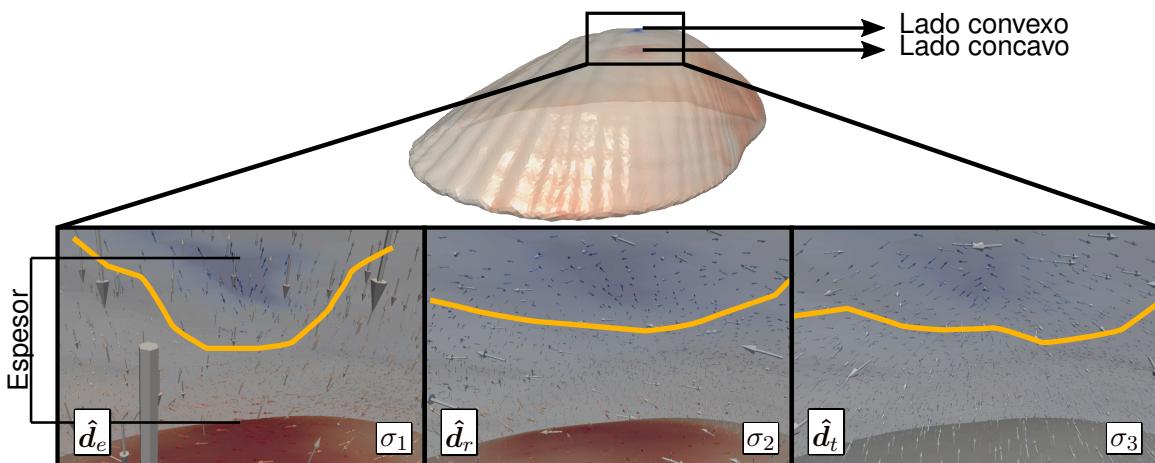


Figura 5.59. Concentración de esfuerzos: dirección espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) para zona A a compresión. Software *ParaView*. Tamaño 3

En la figura 5.58 se observa que, aunque el esfuerzo principal 1 (σ_1) en la dirección del espesor (\hat{d}_e) esté menos distribuido en la superficie que las demás direcciones, este se encuentra presente en casi la totalidad del grosor de la concha (fig. 5.59), al igual que en el tamaño 1 y 2 (sección 5.6.1.2 y 5.6.2.2).

En la figura 5.60 se puede observar como las direcciones del esfuerzo principal 3 (σ_3) coinciden con las estrías de la valva.

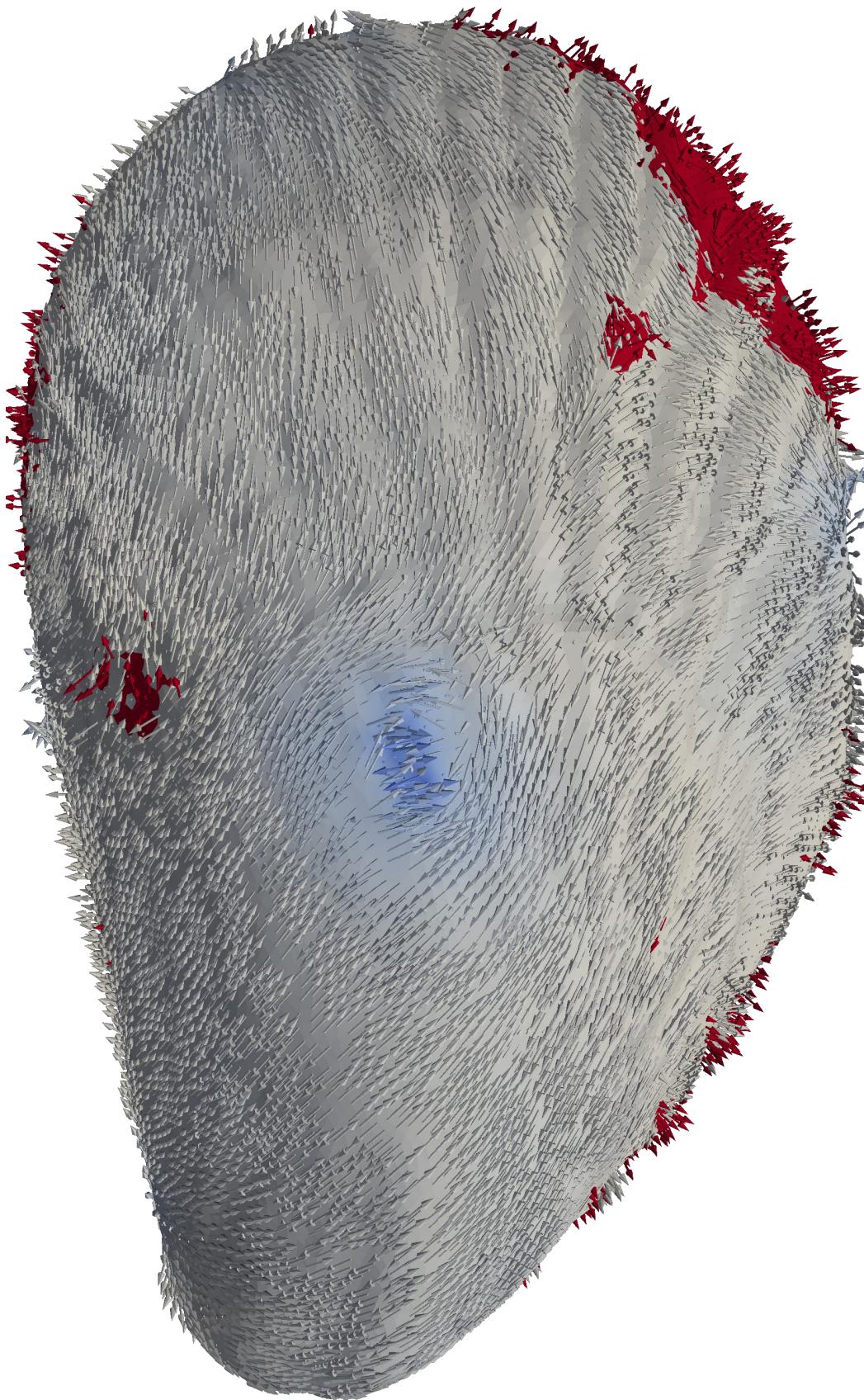


Figura 5.60. Dirección del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software *ParaView*. Tamaño 3

5.6.4. Resultados de simulación: Tamaño 4

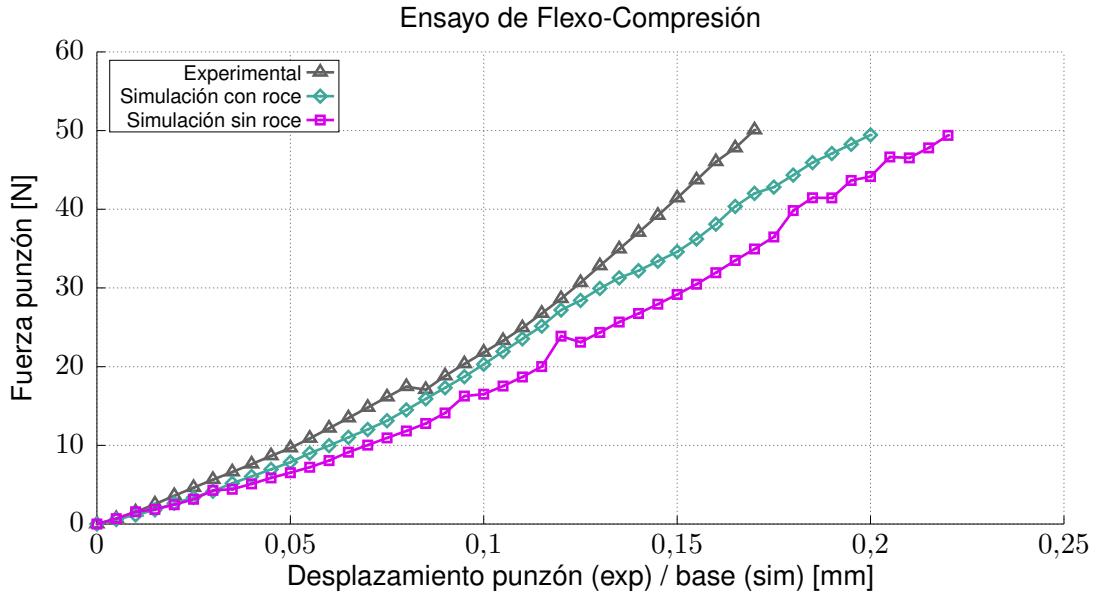


Figura 5.61. Simulación flexo-compresión para el tamaño 4

En la figura 5.61 se aprecia que ambas curvas de simulación, con y sin roce, se comienzan a alejar de la experimental a los 0,1 [mm] aproximadamente, aunque la simulación con roce es más cercana, y posee una mayor bondad de ajuste y menor error *NRMSD* que la curva sin roce.

Tabla 5.9. Fuerza de rotura (F_{max}), desplazamiento de rotura (d_{max}), bondad y error de ajuste de curva experimental y simulación con y sin roce. Tamaño 4

Condición	F_{max} [N]	d_{max} [mm]	r^2	<i>NRMSD</i>
Experimental	50	0,1701	-	-
Con roce	50	0,2022	0,9412	0,0693
Sin roce	50	0,2221	0,7589	0,1404

Según la tabla 5.9 la curva experimental y de simulación con roce, al alcanzar la fuerza de rotura de 50 [N], presentan una diferencia de 15,88 % en el desplazamiento.

Al igual que en el tamaño 1, 2 y 3 (sección 5.6.1, 5.6.2 y 5.6.3), es posible observar que la curva con roce posee una bondad de ajuste mayor, y el error *NRMSD* sigue siendo menor a la sin roce. Ambas simulaciones demuestran ser una buena interpretación del ensayo experimental, aunque la simulación con roce es la única que supera el valor 0,9 para bondad de ajuste.

5.6.4.1. Tamaño 4: simulación con roce. Campo de esfuerzos principales $\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$

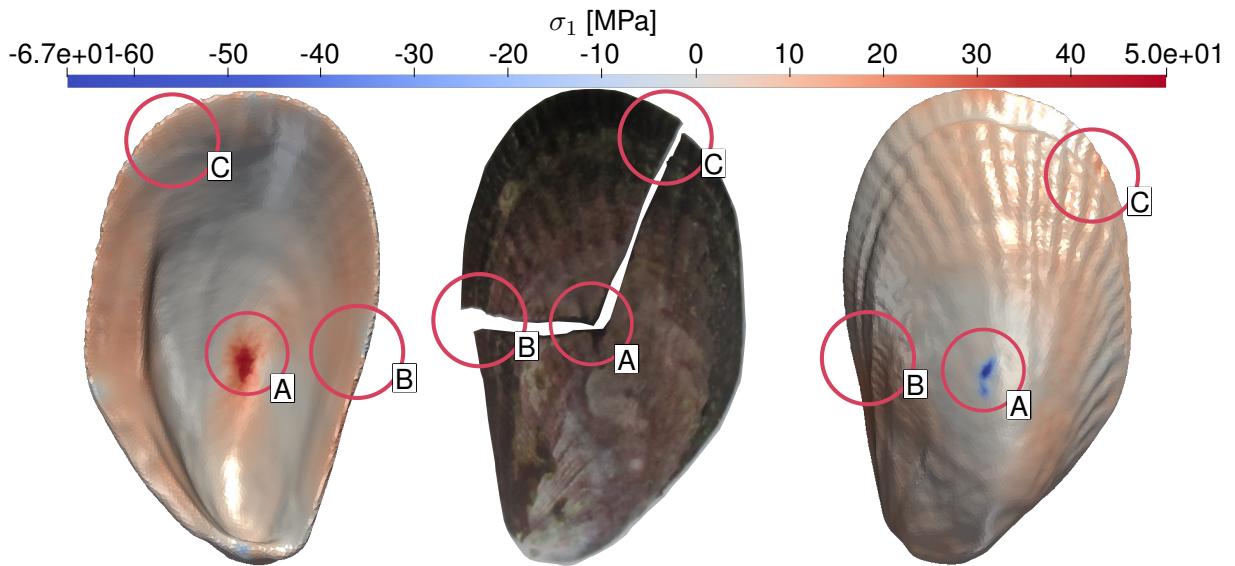


Figura 5.62. Campo del esfuerzo principal 1 (σ_1). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 4

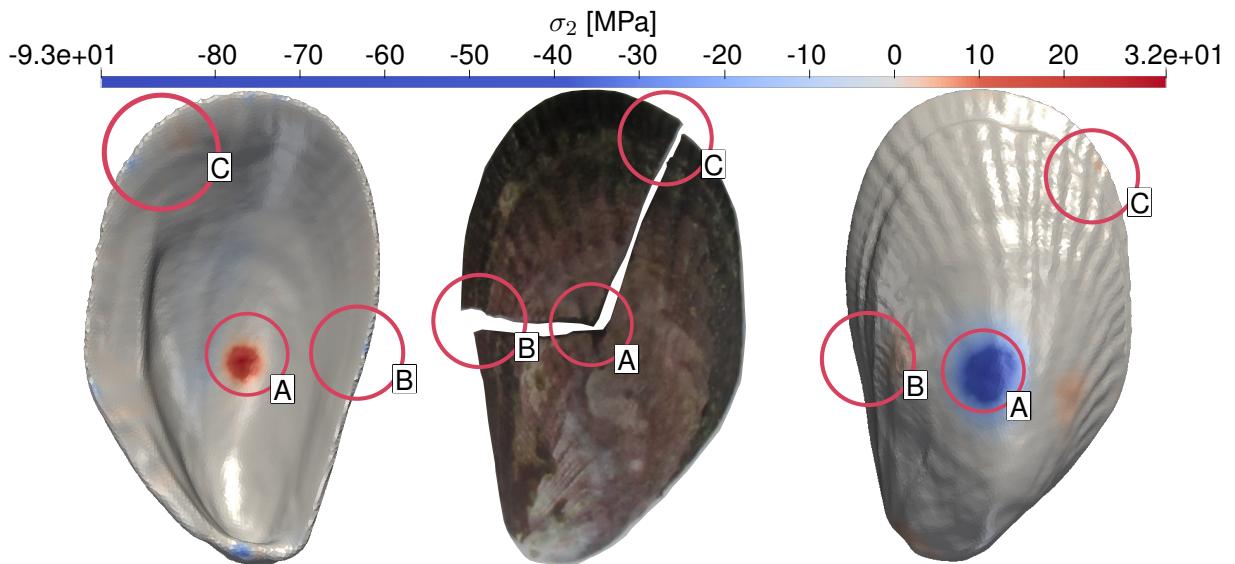


Figura 5.63. Campo del esfuerzo principal 2 (σ_2). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 4

En la figura 5.62 y 5.63 se observa como las zonas de concentración de esfuerzo A, B y C son equivalentes para ambos esfuerzos principales. Los valores de esfuerzo a tracción máxima para σ_1 y σ_2 son de 50 y 32 [MPa] en la zona A (zona cóncava) respectivamente. Los valores de esfuerzo a compresión máximos σ_1 y σ_2 son de 67 y 93 [MPa] en la zona A (zona convexa). Ambos esfuerzos máximos, en tracción y compresión, se concentran en el

sector A presentando compresión la superficie que realiza el contacto directo con el punzón (zona convexa), mientras que por reacción a la compresión del punzón, la zona interna es sometida a tracción (zona cóncava). La zona C destaca al presentar el siguiente valor más alto a tracción y ser la zona en que la valva sufre la rotura del material. Esto indica que la simulación logra captar las zonas críticas de la valva a partir de las solicitudes del ensayo.

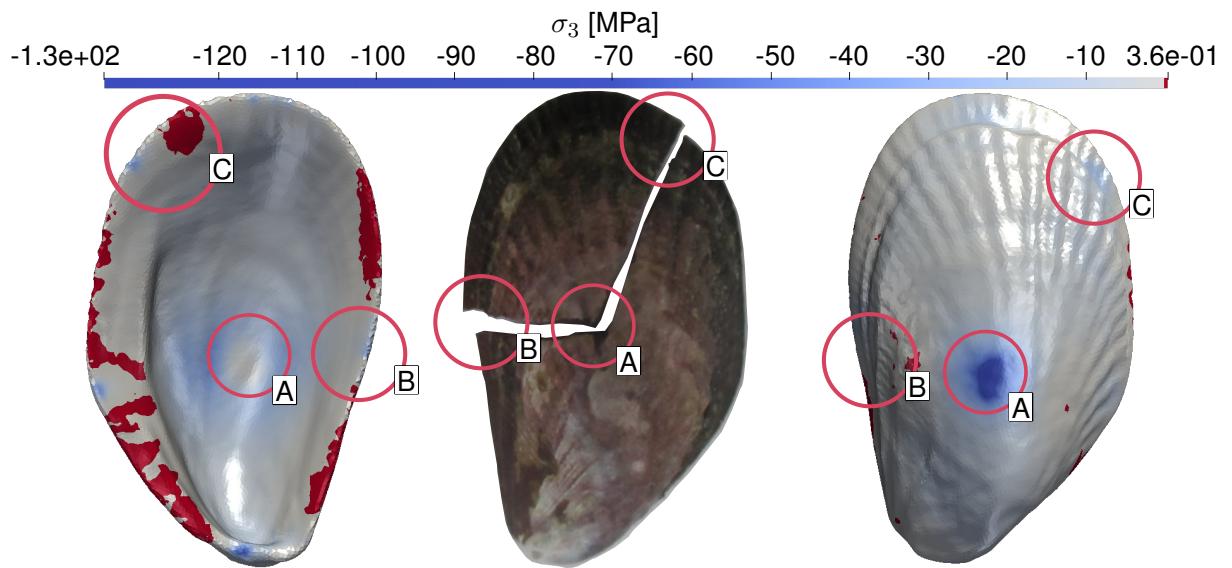


Figura 5.64. Campo del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 4

La figura 5.64 indica que para σ_3 la magnitud del efecto de tracción es insignificante, al contrario de la compresión, el cual ocupa la totalidad de la valva dejando al sector B sin efectos de esfuerzo significativo para tracción y compresión, no así para el sector C. La concentración de todo el esfuerzo de compresión se observa en el sector A (zona convexa) con 130 [MPa]. Considerando este análisis, la simulación indica que el sector A se encuentra con efecto de compresión significativos en 3 direcciones ortogonales entre sí (indicados mediante σ_1 , σ_2 y σ_3).

A continuación, se realiza el análisis de dirección en que se ejerce el esfuerzo de tracción y compresión para la zona A y C. Además, se procede a detallar el esfuerzo máximo soportado por tales direcciones utilizando la siguiente tabla:

Tabla 5.10. M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}). Tamaño 4

Tamaño	Dirección	E [MPa]	σ_{max} [MPa]	ε_{max} [mm/mm]
4	d_e	$685,1 \pm 22,5$	$132,4 \pm 23,9$	$0,193 \pm 0,034$
	d_r	$2853,4 \pm 366,2$	$93,7 \pm 16,1$	$0,033 \pm 0,002$
	d_t	$2487,8 \pm 32,1$	$105,6 \pm 35,8$	$0,043 \pm 0,014$

5.6.4.2. Tamaño 4: simulación con roce. Dirección de esfuerzos principales

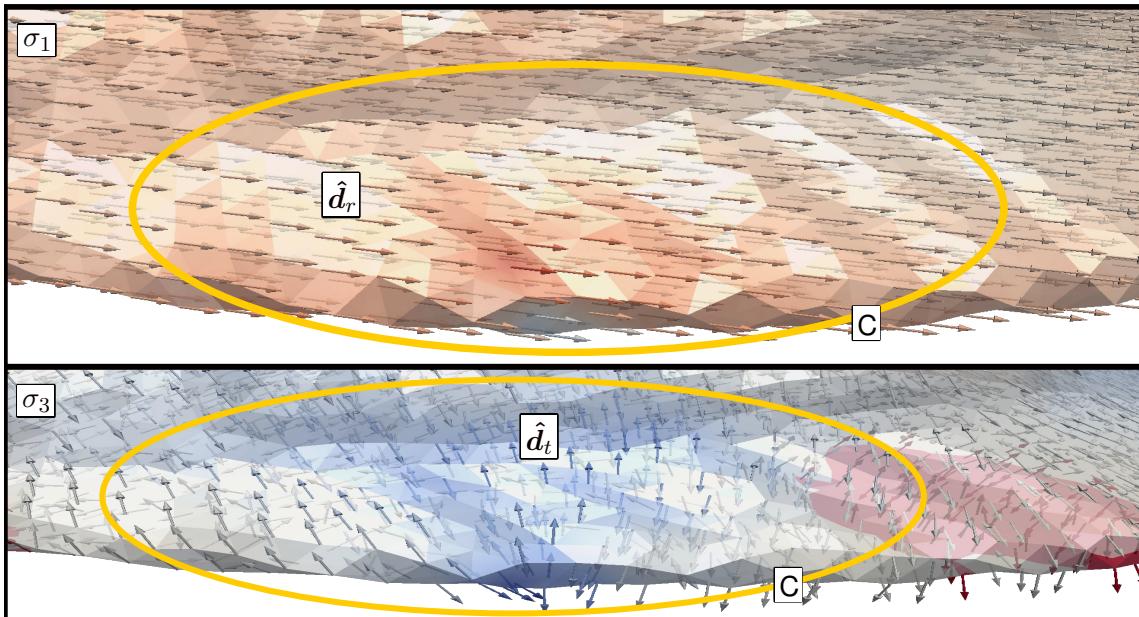


Figura 5.65. Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_3 para zona C. Software *ParaView*. Tamaño 4

En la figura 5.65 se observa que la zona C, mismo sector en que la valva sufrió la rotura del material, presenta una concentración de esfuerzo a tracción de 40 [MPa] en la dirección radial (\hat{d}_r), mientras que el esfuerzo principal 3 (σ_3) presenta una concentración de esfuerzo a compresión en la dirección tangencial (\hat{d}_t) de 60 [MPa] aproximadamente. Esto indica que la concentración de esfuerzos se distribuye en las mismas direcciones definidas para el material. Según la tabla 5.10, el esfuerzo presentado para la zona C no sería suficiente para la rotura de la valva en esa dirección.

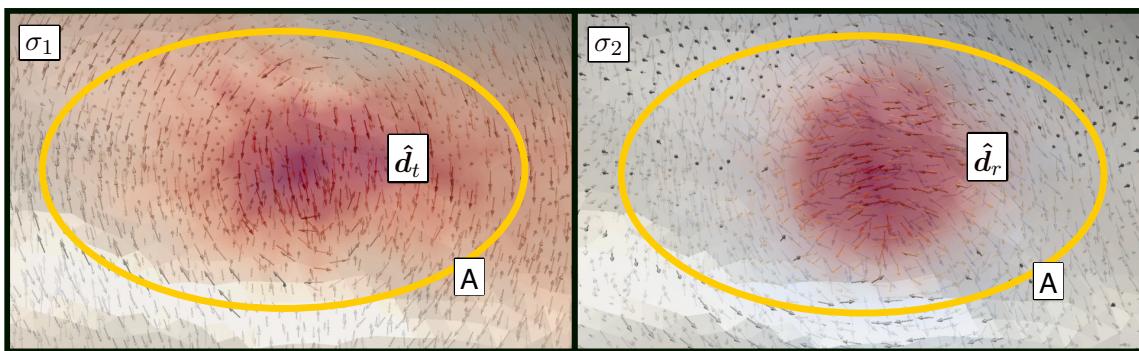


Figura 5.66. Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona A a tracción. Software *ParaView*. Tamaño 4

En la figura 5.66 se observa que la zona A presenta dos esfuerzos de tracción a direcciones ortogonales entre sí, con valores de 50 y 32 [MPa] aproximadamente. Las direcciones de ambos esfuerzos principales (σ_1 y σ_2) son coincidentes con las direcciones ortótropas del

material; tangencial (\hat{d}_t) y radial (\hat{d}_r) respectivamente. Este mismo efecto se presenta en el análisis de esfuerzos del tamaño 1, 2 y 3 (sección 5.6.1.2, 5.6.2.2 y 5.6.3.2).

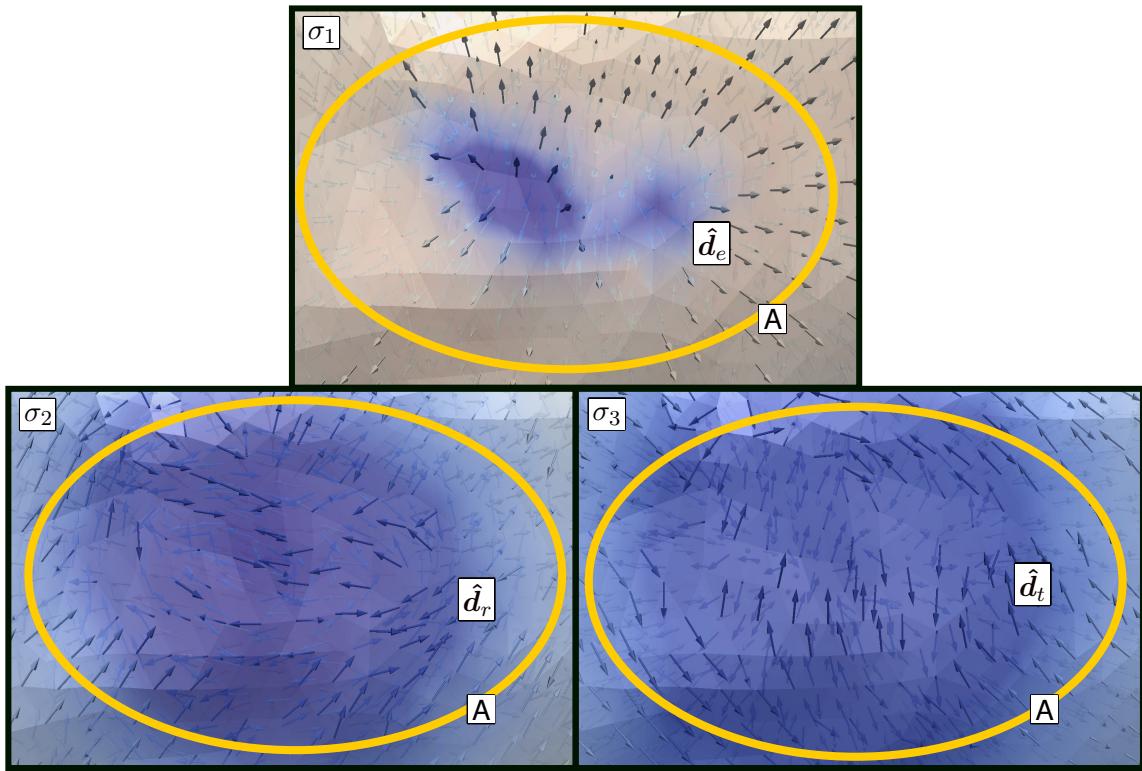


Figura 5.67. Concentración de esfuerzos: σ_1 , σ_2 y σ_3 para zona A a compresión. Software *ParaView*. Tamaño 4

En la figura 5.67 se observa que la zona de contacto del punzón presenta un estado compresión en tres direcciones normales entre sí, las cuales son coincidentes con las direcciones ortótropas del material al igual que en el análisis de esfuerzo del tamaño 1, 2 y 3 (sección 5.6.1.2, 5.6.2.2 y 5.6.3.2). Las direcciones del espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) coinciden con los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3), cuyos valores corresponden a 67, 93 y 130 [MPa] respectivamente. Esto indica que 2 de los 3 esfuerzos principales (σ_2 y σ_3) alcanzan el esfuerzo máximo soportado por el material para las tres direcciones ortótropas (tabla 5.10), por lo que el punto crítico es la zona en que se realiza contacto con el punzón.

Realizando el seguimiento del esfuerzo de compresión en la zona A (zona convexa), se determina que el valor del esfuerzo máximo, en la dirección tangencial (\hat{d}_t), se alcanza cuando el punzón registra 33 [N], la dirección radial (\hat{d}_r) lo alcanza a los 50 [N], es decir, en el mismo instante en que se produce la rotura de la valva a causa de la fuerza de rotura producida experimentalmente por el punzón (fuerza F_{max} de ruptura experimental detallada en tabla 5.9). El valor del esfuerzo máximo en la dirección del espesor (\hat{d}_e) no es alcanzado para este tamaño, al igual que en el análisis del tamaño 3 (sección 5.6.3.2).

Al igual que en el tamaño 1, 2 y 3 (sección 5.6.1.2, 5.6.2.2 y 5.6.3.2), esto puede ser debi-

do a que la zona afectada por la compresión es muy pequeña comparada con la totalidad de la concha, por lo que la valva sufre roturas del material en un pequeño sector (zona A en la superficie convexa) a partir de los efectos de compresión. Estos efectos pueden no ser suficientes para romper la valva, hasta que en la misma zona A se presenta el efecto de tracción en el lado cóncavo. Para comprobar esto, se observa en la figura 5.68 la distribución de los esfuerzos principales en el espesor de la valva, en contraste con la figura 5.67 en la que se observa la distribución de estos esfuerzos en la superficie convexa.

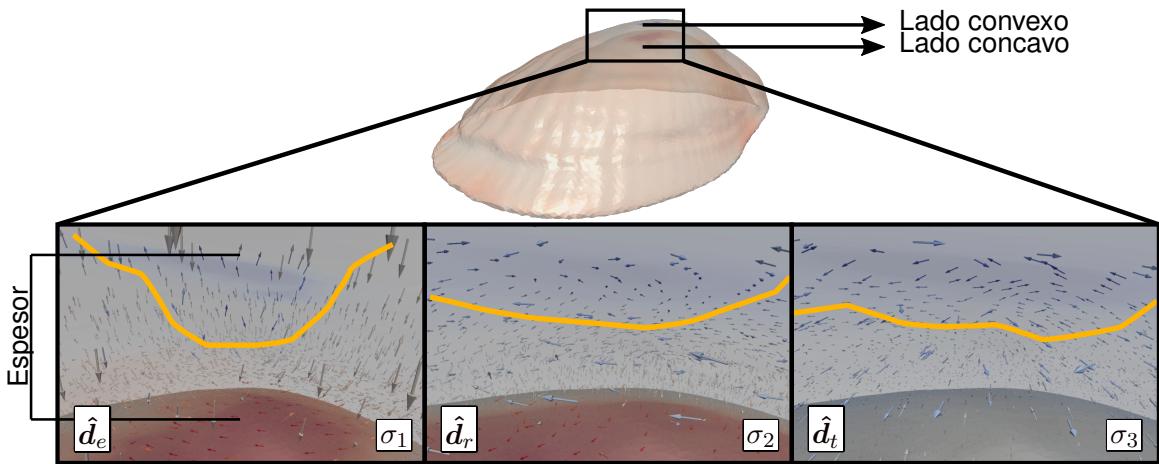


Figura 5.68. Concentración de esfuerzos: dirección espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) para zona A a compresión. Software *ParaView*. Tamaño 4

En la figura 5.67 se observa que, aunque el esfuerzo principal 1 (σ_1) en la dirección del espesor (\hat{d}_e) esté menos distribuido en la superficie que las demás direcciones, este se encuentra presente en casi la totalidad del grosor de la concha (fig. 5.68), al igual que en el tamaño 1, 2 y 3 (sección 5.6.1.2, 5.6.2.2 y 5.6.3.2).

Esto último, coincide con lo visto experimentalmente en el ensayo de flexo-compresión, cuyas valvas sometidas al ensayo sufrían una delaminación en la zona de contacto con el punzón (fig. 4.6), indicando que posiblemente se trate de una concentración de esfuerzos en las direcciones coincidentes a los esfuerzos principales 1 y 2 (σ_1 y σ_2), es decir, con las direcciones radial y tangencial (\hat{d}_r y \hat{d}_t), respectivamente.

Cabe destacar que las probetas prismáticas que sufrieron delaminación fueron las que se sometieron a la compresión uniaxial en estas mismas direcciones (fig. 4.1), pudiendo dar indicios que, bajo la solicitación de flexo-compresión, el material podría estar sufriendo una fractura tortuosa en la zona de contacto (explicado en la sección 4.2.2).

En la figura 5.69 se puede observar como las direcciones del esfuerzo principal 3 (σ_3) coinciden con las estrías de la valva.



Figura 5.69. Dirección del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software *ParaView*. Tamaño 4

5.6.5. Resultados de simulación: Tamaño 5

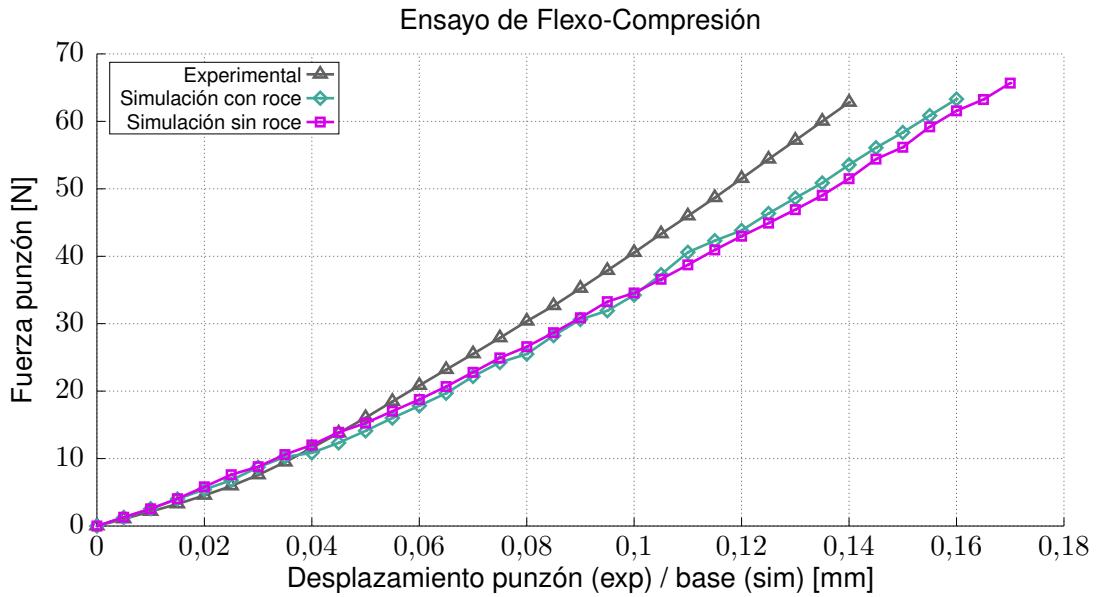


Figura 5.70. Simulación flexo-compresión para el tamaño 5

En la figura 5.70 se aprecia que ambas curvas de simulación, con y sin roce, se comienzan a alejar de la curva experimental a los 0,06 [mm] aproximadamente, aunque sigue existiendo un contraste entre ellas. La curva con roce presenta una mayor bondad de ajuste y un menor error *NRMSD* que la curva sin roce.

Tabla 5.11. Fuerza de rotura (F_{max}), desplazamiento de rotura (d_{max}), bondad y error de ajuste de curva experimental y simulación con y sin roce. Tamaño 5

Condición	F_{max} [N]	d_{max} [mm]	r^2	<i>NRMSD</i>
Experimental	63,3	0,1412	-	-
Con roce	63,3	0,1601	0,9364	0,0759
Sin roce	63,3	0,1748	0,9236	0,0832

Según la tabla 5.11 la curva experimental y de simulación con roce, al alcanzar la fuerza de rotura de 63,3 [N], presentan una diferencia de 11,8 % en el desplazamiento.

Al igual que en el tamaño 1, 2, 3 y 4 (sección 5.6.1, 5.6.2, 5.6.3 y 5.6.4), es posible inferir del análisis de curvas que el efecto de fricción aumenta la bondad de ajuste. Es necesario destacar que ambas curvas de simulación presentan una bondad de ajuste superior a 0,9, por lo que ambas simulaciones demuestran ser una buena interpretación del ensayo experimental.

5.6.5.1. Tamaño 5: simulación con roce. Campo de esfuerzos principales $\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$

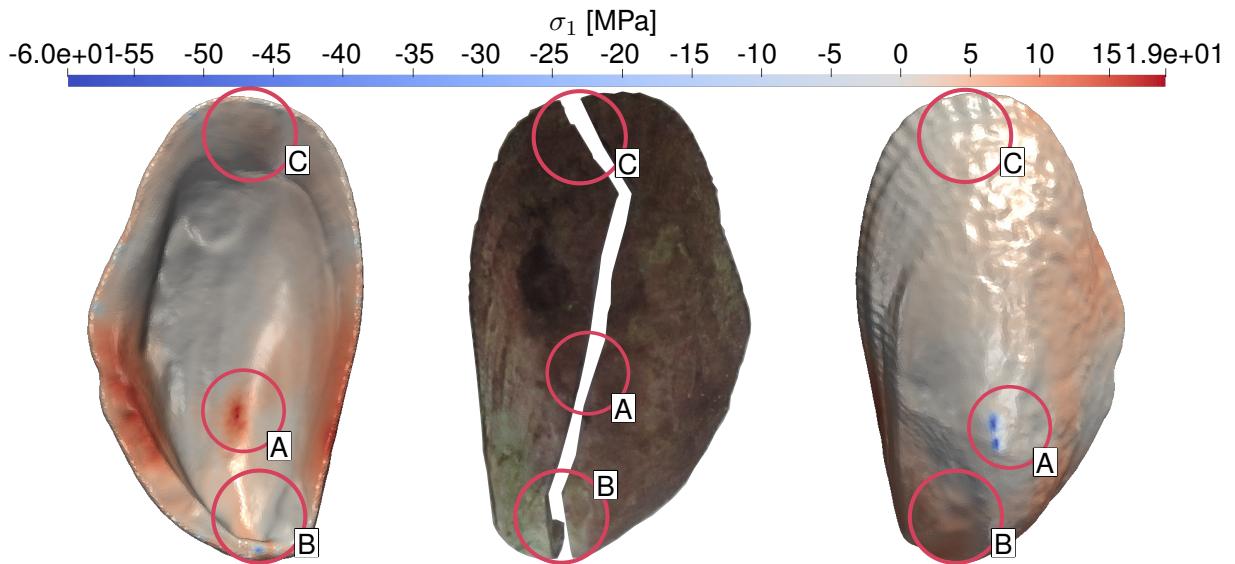


Figura 5.71. Campo del esfuerzo principal 1 (σ_1). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 5

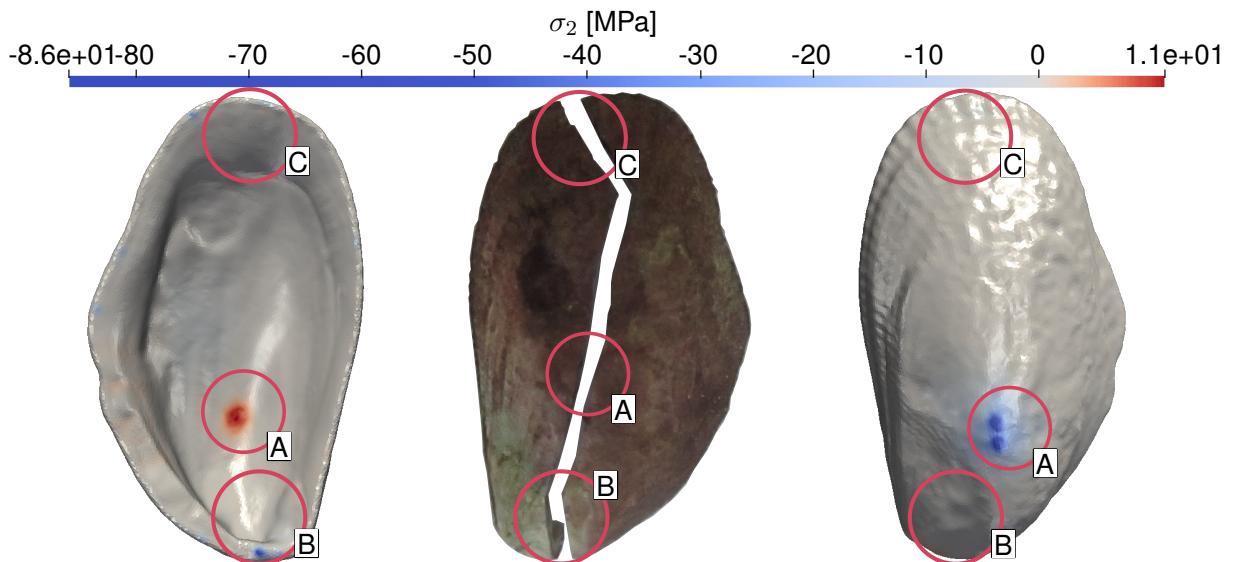


Figura 5.72. Campo del esfuerzo principal 2 (σ_2). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 5

En la figura 5.71 y 5.72 se observa como las zonas de concentración de esfuerzo A, B y C son equivalentes para ambos esfuerzos principales. Los valores de esfuerzo a tracción máximos para σ_1 y σ_2 son de 19 y 11 [MPa] en la zona A (zona cóncava) respectivamente. Los valores de esfuerzo a compresión máximos σ_1 y σ_2 son de 60 y 86 [MPa] en la zona A (zona convexa). Ambos esfuerzos máximos, en tracción y compresión, se concentran en el

sector A presentando compresión la superficie que realiza el contacto directo con el punzón (zona convexa), mientras que por reacción a la compresión del punzón, la zona interna es sometida a tracción (zona cóncava). La zona B destaca al presentar el siguiente valor más alto a compresión y ser la zona en que la valva sufre la rotura del material. Esto indica que la simulación logra captar las zonas críticas de la valva a partir de las solicitudes del ensayo.

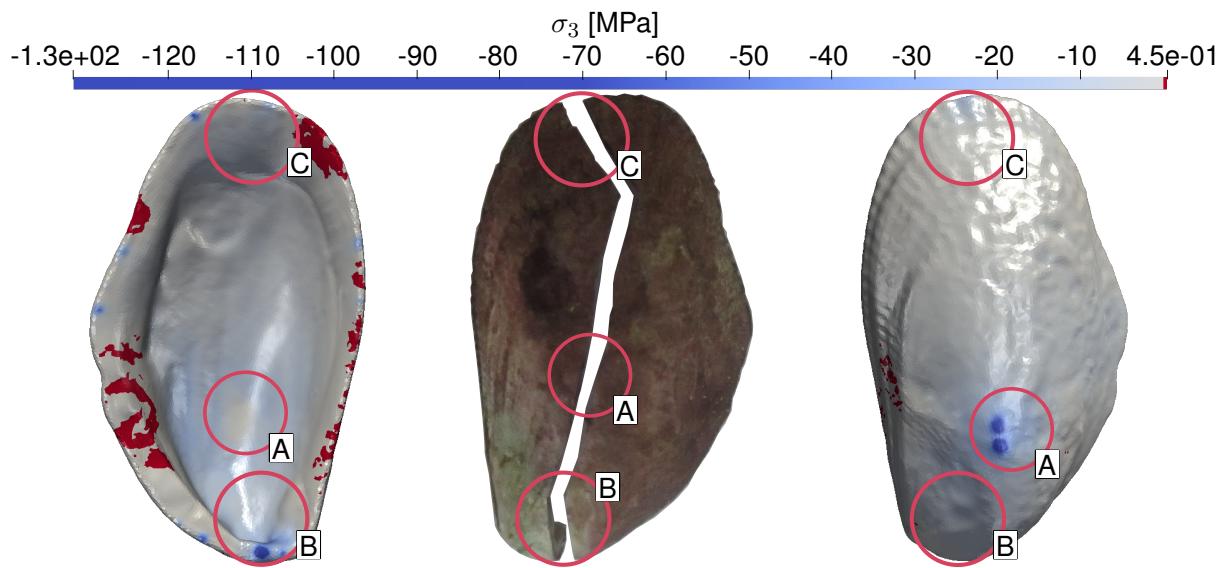


Figura 5.73. Campo del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software *ParaView*. Valva real en el centro. Tamaño 5

La figura 5.73 indica que para σ_3 la magnitud del efecto de tracción es insignificante, al contrario de la compresión, el cual ocupa la totalidad de la valva dejando al sector C sin efectos de esfuerzo significativo para tracción y compresión, no así para el sector B. La concentración de todo el esfuerzo de compresión se observa en el sector A (zona convexa) con 130 [MPa]. Considerando este análisis, la simulación indica que el sector A se encuentra con efectos de compresión significativos en 3 direcciones ortogonales entre sí (indicados mediante σ_1 , σ_2 y σ_3).

A continuación se realiza el análisis de dirección en que se ejerce el esfuerzo de tracción y compresión para la zona A y B. Además, se procede a detallar el esfuerzo máximo soportado por tales direcciones utilizando la siguiente tabla:

Tabla 5.12. M. elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}). Tamaño 5

Tamaño	Dirección	E [MPa]	σ_{max} [MPa]	ε_{max} [mm/mm]
5	d_e	$829,5 \pm 254,5$	$151,3 \pm 75,5$	$0,162 \pm 0,063$
	d_r	$2714,9 \pm 143,8$	$235,8 \pm 36,5$	$0,089 \pm 0,017$
	d_t	$2144,8 \pm 131,7$	$114,6 \pm 36,9$	$0,056 \pm 0,022$

5.6.5.2. Tamaño 5: simulación con roce. Dirección de esfuerzos principales

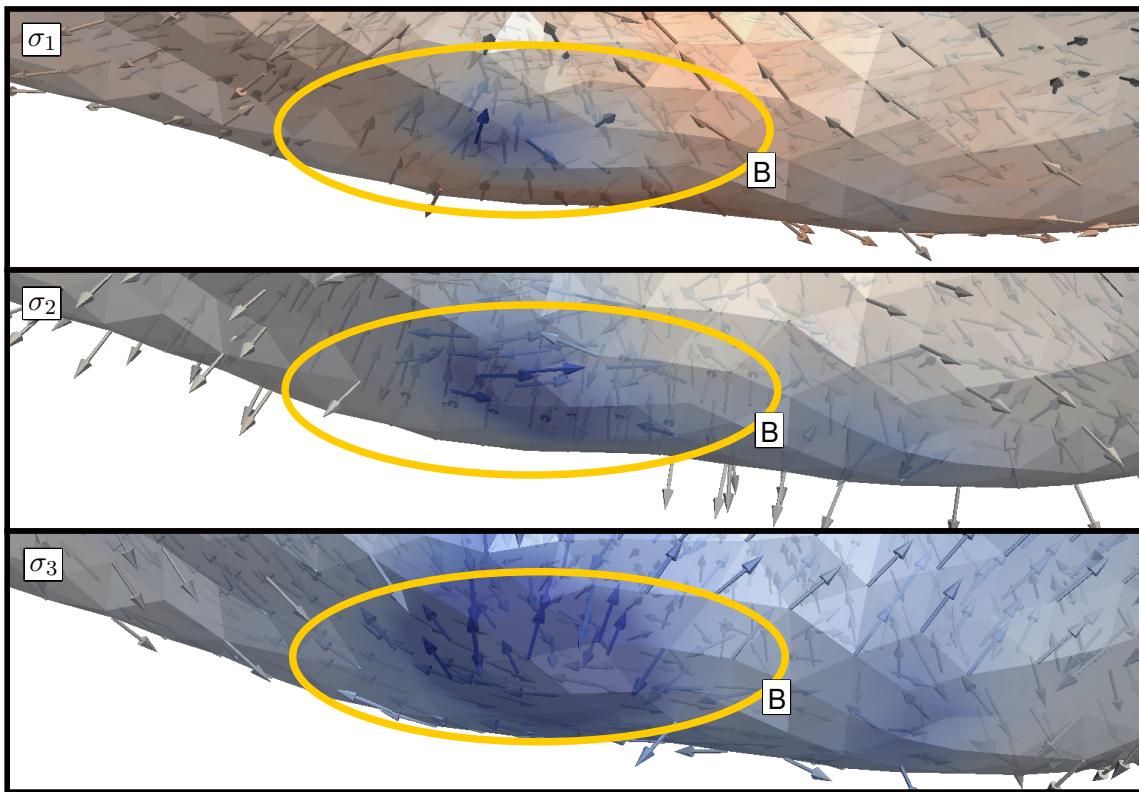


Figura 5.74. Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_3 para zona B. Software *ParaView*. Tamaño 5

En la figura 5.74 se observa que la zona B, mismo sector en que la valva sufrió la rotura del material, presenta una concentración de esfuerzo a compresión para los 3 esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3) de 50, 80 y 120 [MPa] aproximadamente. Esta concentración de esfuerzos, en este caso, no coincide con alguna de las direcciones ortótropas del material de forma apreciable, aunque los valores son lo suficientemente altos para romper el material de la valva en la dirección tangencial (tabla 5.12).

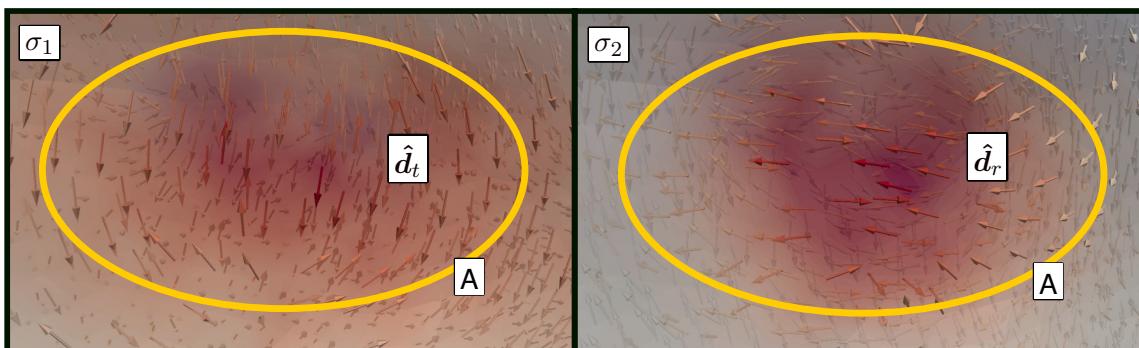


Figura 5.75. Concentración de esfuerzos: σ_1 y σ_2 para zona A a tracción. Software *ParaView*. Tamaño 5

En la figura 5.75 se observa que la zona A presenta dos esfuerzos de tracción a direcciones ortogonales entre sí, con valores de 19 y 11 [MPa] aproximadamente. Las direcciones de ambos esfuerzos principales (σ_1 y σ_2) son coincidentes con las direcciones ortótropas del material; tangencial (\hat{d}_t) y radial (\hat{d}_r) respectivamente. Este mismo efecto se presenta en el análisis de esfuerzos del tamaño 1, 2, 3 y 4 (sección 5.6.1.2, 5.6.2.2, 5.6.3.2 y 5.6.4.2).

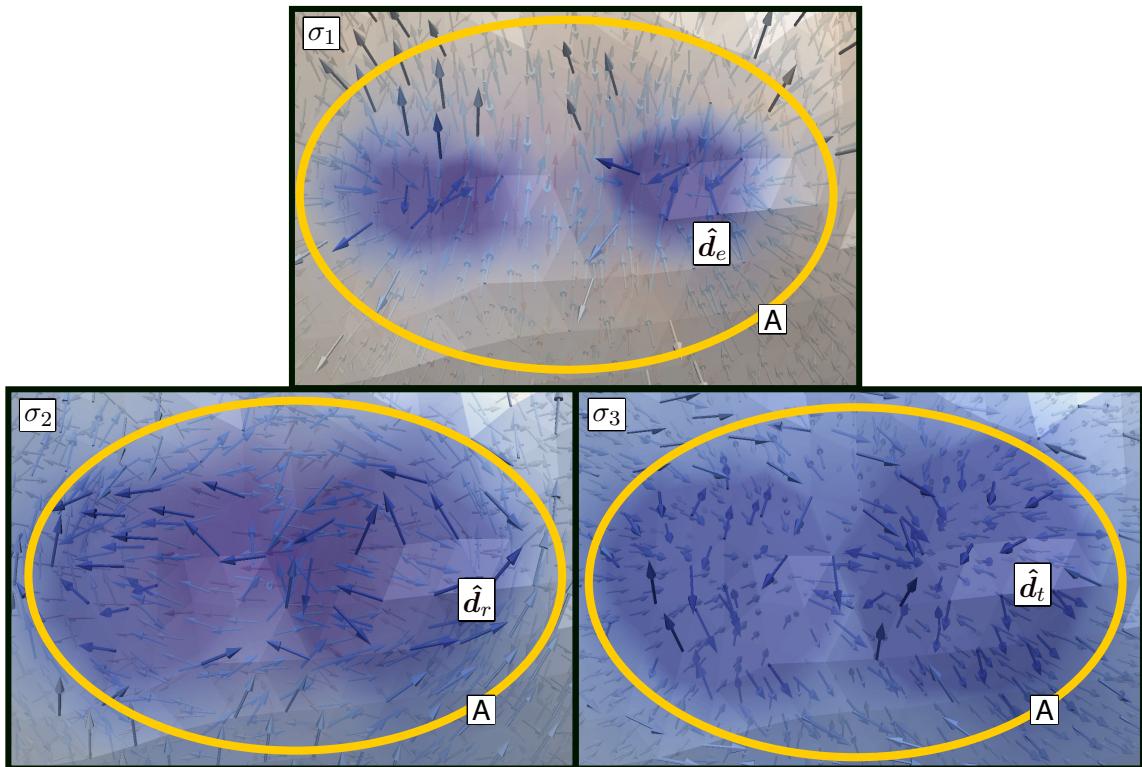


Figura 5.76. Concentración de esfuerzos: σ_1 , σ_2 y σ_3 para zona A a compresión. Software *ParaView*. Tamaño 5

En la figura 5.76 se observa que la zona de contacto del punzón presenta un estado compresión en tres direcciones normales entre sí, las cuales son coincidentes con las direcciones ortótropas del material al igual que en el análisis de esfuerzo del tamaño 1, 2, 3 y 4 (sección 5.6.1.2, 5.6.2.2, 5.6.3.2 y 5.6.4.2). Las direcciones del espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) coinciden con los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3), cuyos valores corresponden a 60, 86 y 130 [MPa] respectivamente. Esto indica que 1 de los 3 esfuerzos principales (σ_3) alcanza el esfuerzo máximo soportado por el material para las tres direcciones ortótropas (tabla 5.12), por lo que el punto crítico es la zona en que se realiza contacto con el punzón.

Realizando el seguimiento del esfuerzo de compresión en la zona A (zona convexa), se determina que el valor del esfuerzo máximo, en la dirección tangencial (\hat{d}_t), se alcanza cuando el punzón registra 44 [N]. El valor del esfuerzo máximo en la dirección del espesor (\hat{d}_e) y radial (\hat{d}_r) no es alcanzado para este tamaño. Al igual que en el análisis del tamaño 3 y 4 (sección 5.6.3.2 y 5.6.4.2), el esfuerzo necesario para romper el material de la concha en los esfuerzos

principales (σ_1 y σ_2) ya no es alcanzable a medida que la valva es más larga.

Al igual que en el tamaño 1, 2, 3 y 4 (sección 5.6.1.2, 5.6.2.2, 5.6.3.2 y 5.6.4.2), esto puede ser debido a que la zona afectada por la compresión es muy pequeña comparada con la totalidad de la concha, por lo que la valva sufre roturas del material en un pequeño sector (zona A en la superficie convexa) a partir de los efectos de compresión. Estos efectos pueden no ser suficientes para romper la valva, hasta que en la misma zona A se presenta el efecto de tracción en el lado cóncavo. Para comprobar esto, se observa en la figura 5.77 la distribución de los esfuerzos principales en el espesor de la valva, en contraste con la figura 5.76, en la que se observa la distribución de estos esfuerzos en la superficie convexa.

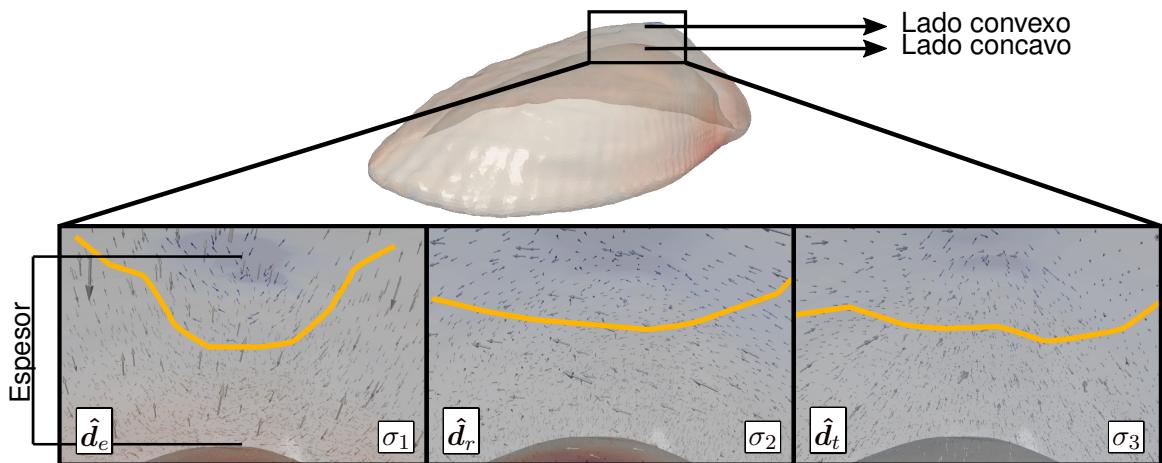


Figura 5.77. Concentración de esfuerzos: dirección espesor (\hat{d}_e), radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) para zona A a compresión. Software *ParaView*. Tamaño 5

En la figura 5.76 se observa que, aunque el esfuerzo en la dirección del espesor (\hat{d}_e) esté menos distribuido en la superficie que las demás direcciones, este se encuentra presente en casi la totalidad del grosor de la concha (fig. 5.77), al igual que en el tamaño 1, 2, 3 y 4 (sección 5.6.1.2, 5.6.2.2, 5.6.3.2 y 5.6.4.2).

Esto último, coincide con lo visto experimentalmente en el ensayo de flexo-compresión, cuyas valvas sometidas al ensayo sufrían una delaminación en la zona de contacto con el punzón (fig. 4.6), indicando que posiblemente se trate de una concentración de esfuerzos en las direcciones coincidentes a los esfuerzos principales 1 y 2 (σ_2 y σ_3), es decir, con las direcciones radial y tangencial (\hat{d}_r y \hat{d}_t), respectivamente.

Cabe destacar que las probetas prismáticas que sufrieron delaminación fueron las que se sometieron a la compresión uniaxial en estas mismas direcciones (fig. 4.1), pudiendo dar indicios que, bajo la solicitación de flexo-compresión, el material podría estar sufriendo una fractura tortuosa en la zona de contacto (explicado en la sección 4.2.2).

En la figura 5.78 se puede observar como las direcciones del esfuerzo principal 3 (σ_3) coinciden con las estrías de la valva.



Figura 5.78. Dirección del esfuerzo principal 3 (σ_3). Software *ParaView*. Tamaño 5

5.6.6. Análisis de las simulaciones

El resultado de las simulaciones para los 5 tamaños fue satisfactorio en cuanto al análisis de curvas de fuerza contra desplazamiento según los criterios de bondad de ajuste y error *NRMSD*, considerando que las simulaciones con roce de los tamaños 2, 3, 4 y 5 superan el valor de 0,9 para la bondad de ajuste con respecto a la curva experimental. Aunque se debe considerar mejorar el ensayo de flexo-compresión (sección 3.4.2) para evitar efectos de fricción con la base y paredes, los cuales impidieron que las simulaciones, sin consideración de roce del tamaño 1 y 4, alcanzaran el valor de 0,9 para la bondad de ajuste (tabla 5.3 y 5.9). Cabe destacar que a pesar que el efecto de fricción fuera un impedimento, todas las curvas sin roce presentaron un buen comportamiento.

Del análisis de concentración de esfuerzos, a partir de los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3), fue posible captar las zonas en que la valva, experimentalmente, se había fracturado. Además, se identificaron puntos clave en la rotura de la concha, como la zona de contacto con el punzón, en la cual todos los tamaños coinciden en ser el punto con mayor concentración de esfuerzo a compresión (zona convexa) y tracción (zona cóncava). Con las zonas críticas identificadas se analizan la direcciones de distribución del esfuerzo en ese sector.

La dirección de los esfuerzos principales en la zonas críticas, identificadas a partir del análisis de concentración de esfuerzos, fue el recurso que mayor información entregó, como las direcciones en que se distribuye el esfuerzo principal 3 (σ_3), las cuales coinciden con las estrías de la valva cuando esta se encuentra en su totalidad a compresión (fig. 5.42, 5.50, 5.60, 5.69 y 5.78); lo que podría indicar una ventaja evolutiva del molusco. Otro efecto que caracterizó a cada una de las simulaciones es que todas distribuyen los esfuerzos principales, en la zona de contacto con el punzón, en las mismas direcciones de ortotropía del material de la concha. Estas direcciones varían dependiendo del efecto del esfuerzo; si la zona se encuentra a compresión (zona convexa), las direcciones de los esfuerzos principales serán: esfuerzo principal 1 (σ_1) coincide con la dirección del espesor (\hat{d}_e), esfuerzo principal 2 (σ_2) coincide con la dirección radial (\hat{d}_r), y el esfuerzo principal 3 (σ_3) coincide con la dirección tangencial (\hat{d}_t). Para los efectos de tracción (zona cóncava), las direcciones se invierte para los esfuerzos principales 1 y 3 (σ_1 y σ_3), como se observa en la tabla 5.13. Es necesario destacar que el efecto de tracción en la dirección del espesor fue despreciable para todos los tamaños en la zona de contacto del punzón (zona cóncava).

Tabla 5.13. Dirección del esfuerzo principal σ_1 , σ_2 y σ_3 a partir del efecto de compresión (zona convexa) y tracción (zona cóncava) en la zona de contacto con el punzón

Efecto	Esfuerzo principal σ_1 σ_2 σ_3		
Compresión	$\sigma_1 \rightarrow d_e$	$\sigma_2 \rightarrow d_r$	$\sigma_3 \rightarrow d_t$
Tracción	$\sigma_1 \rightarrow d_t$	$\sigma_2 \rightarrow d_r$	$\sigma_3 \rightarrow d_e$

La explicación de este efecto radica en la longitud y curvatura del largo y ancho de la valva. Para entender este fenómeno es necesario simplificar la geometría de la concha a partir de estas dos magnitudes, como se observa en la siguiente figura:

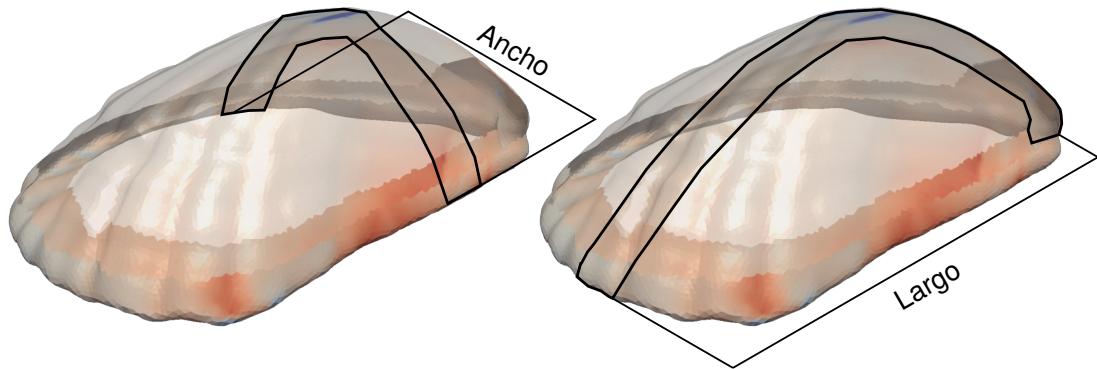


Figura 5.79. Curvatura del largo y ancho de la valva. Software *ParaView*

Con el fin de interpretar mediante una analogía simplificada las concentraciones de esfuerzo y sus direcciones, se plantea interpretar el problema como un análisis de dos vigas curvas sometidas a flexión y, aunque el problema se podría desarrollar como un casquete semi-elipsoidal, este no daría una síntesis necesaria para un entendimiento rápido, siendo un problema muy similar a la concha, sin generar un aporte a reducir el tiempo de entendimiento del problema. Es necesario mencionar que esta simplificación es sólo de forma explicativa, ya que no es posible simplificar el problema real a una solución analítica debido a la geometría de la concha, por lo tanto, el análisis de vigas curvas se utiliza para comprender la dirección de la distribución de los esfuerzos principales. La figura 5.80 representa la simplificación del ancho de la valva, mientras que la figura 5.81 representa la simplificación en el largo, como si de una viga bajo la solicitud de una fuerza F se tratara.

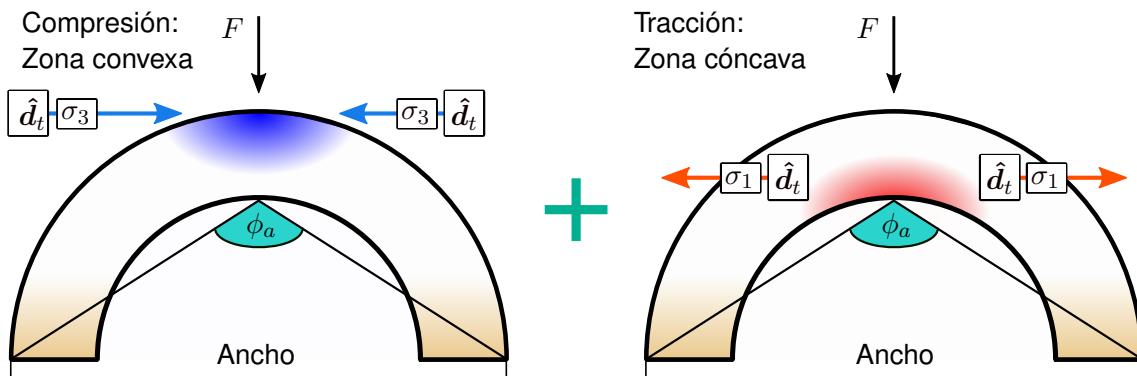


Figura 5.80. Simplificación de la curvatura del ancho de la valva mediante una viga curva

Se observa que la concentración de esfuerzos en la zona convexa, para la viga representativa del ancho (5.80), se concentra el mayor esfuerzo a compresión (σ_3), y el mayor esfuerzo a tracción (σ_1) en la zona cóncava. En cambio, la viga representativa del largo (fig.

5.81) presenta el segundo mayor esfuerzo a tracción y compresión (σ_2). Además, los ángulo de apertura de la viga del ancho y largo (ϕ_a y ϕ_l) difieren en magnitud, siendo $\phi_a < \phi_l$ debido a la longitud del ancho y largo respectivamente.

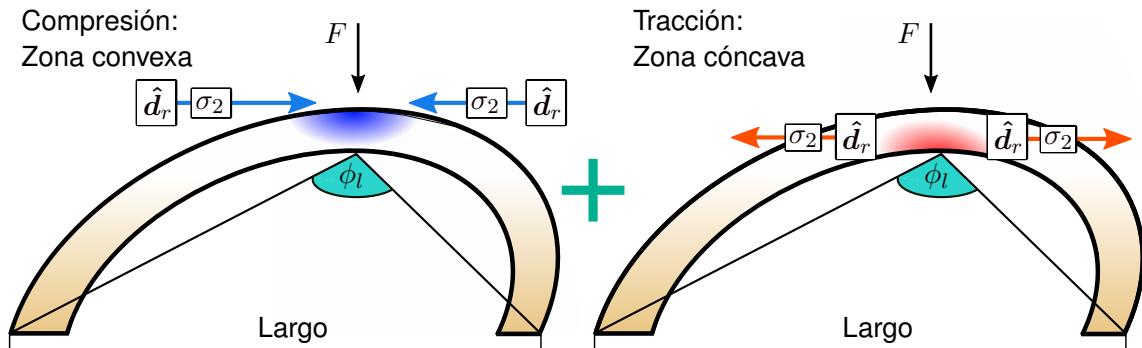


Figura 5.81. Simplificación de la curvatura del largo de la valva mediante una viga curva

La figura 5.82 muestra los esfuerzos de tracción y compresión en el espesor cuando la concha es sometida a la fuerza del punzón (F). Cabe recordar que el efecto de tracción en la dirección del espesor resultó despreciable (≈ 0), por lo que no se realizó un análisis de esfuerzos principales a efectos de tracción para la dirección del espesor (\hat{d}_e).

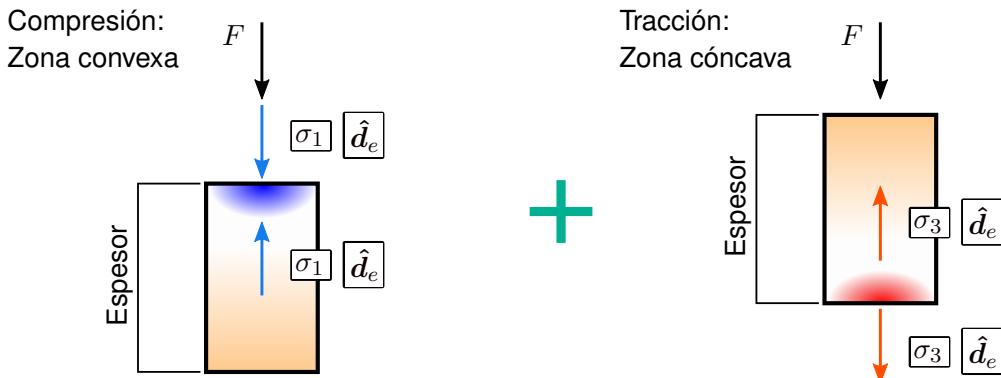


Figura 5.82. Esfuerzos de compresión y tracción en el espesor

Considerando la sección del largo y ancho como vigas, se observa que debido a la geometría de la concha es que el mayor efecto de compresión se genera en el ancho de la valva (fig. 5.80), específicamente en la dirección tangencial (\hat{d}_t), puesto que el ángulo de apertura del arco del ancho (ϕ_a) es menor al ángulo de apertura el arco del largo (ϕ_l), lo que viene dado por las longitudes de las vigas, de la forma $Ancho < Largo \rightarrow \phi_a < \phi_l$. Debido a esto es que lo descrito en la tabla 5.13 se cumple para todos los tamaños, puesto que, aunque la concha sea pequeña, el largo siempre es mayor que el ancho.

A partir del análisis de direcciones para los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3), también se observó que la distribución de esfuerzos para las direcciones radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) es en gran medida superficial, por lo tanto, a través del grosor de la concha su efecto es imperceptible. En cambio, la distribución de esfuerzos en la dirección del espesor (\hat{d}_e) abarca

casi la totalidad del grosor de la valva. Esto puede observarse gráficamente en la figura 5.83, que describe los efectos observados en la sección 5.6.

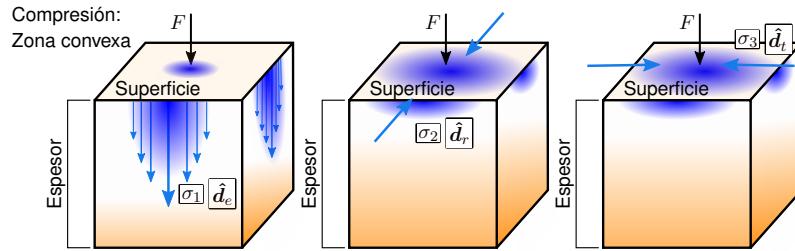


Figura 5.83. Efecto de compresión y tracción en el espesor

Otro efecto que se observó fue, que para los tamaños 1 y 2, los 3 esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3) alcanzaban los esfuerzos máximos (σ_{max}) para cada una de sus direcciones en la zona convexa de contacto con el punzón, indicadas en la tabla 5.13. Pero desde el tamaño 3 este efecto cambia, no logrando alcanzar el esfuerzo máximo (σ_{max}) para los esfuerzos principales 1 y 2 (σ_1 y σ_2), y sólo alcanzando el esfuerzo de rotura para el esfuerzo principal 3 (σ_3), en compresión y en la dirección tangencial (\hat{d}_t).

Esto se debe a que el único efecto considerable es de compresión ($\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$ para efectos de compresión y $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ para efectos de tracción), y a medida que el molusco envejece aumenta la longitud del largo de la concha (el largo aumenta en mayor magnitud que el ancho), por lo tanto, el ángulo de apertura del arco del largo (ϕ_l) también aumenta, disipando el esfuerzo en la dirección radial (\hat{d}_r), el cual considera el esfuerzo principal 2 (σ_2). De esta forma, para las solicitudes del ensayo de flexo-compresión, a medida que el molusco crece el único efecto considerable es el de compresión en la zona de contacto del punzón, específicamente en la distribución del esfuerzo principal 3 (σ_3) en la dirección tangencial (\hat{d}_t).

Resumiendo, para todos los tamaños existe un efecto combinado entre la curvatura del largo y ancho, y el efecto del contacto entre el punzón y la valva, razón por la cual el efecto de compresión es mayor al de tracción. Según la teoría de viga curva [152], el efecto de tracción debería ser mayor en una solicitud de flexión, pero el efecto del contacto provoca una concentración del esfuerzo localizado en ese punto a compresión, por lo tanto, la compresión supera en magnitud a la tracción.

Al apreciar la ecuación del esfuerzo en una viga curva 5.7, se observa que, a medida que el individuo crece el ángulo de apertura del largo (ϕ_l) es mayor, perdiendo curvatura, resultando en que el centro de curvatura (el cual no es fijo, y varía dependiendo del sector que se evalúe debido a la propia geometría de la concha) se aleje de la viga, por lo que el radio del centro de la curvatura a la viga es mayor (r_i y r_o). Esto disminuye el esfuerzo interior (σ_i) de la viga (esfuerzo de tracción en la zona cóncava). Es por esto que en los tamaños más grandes disminuye la magnitud de los esfuerzo principales (σ_1 , σ_2 y σ_3), dejando sólo con efecto considerable al esfuerzo principal 3 (σ_3) en la dirección tangencial (\hat{d}_t), puesto que el individuo crece más en su largo que en el ancho. De todas formas, interpretar la curvatura

del ancho y largo como vigas no tiene un efecto práctico real debido a las limitaciones para entregar una respuesta analítica a una geometría compleja, pero es útil para comprender los sectores de concentración de esfuerzos y el por qué de sus magnitudes.

$$\sigma_i = \frac{Mc_i}{Aer_i} \quad \sigma_o = \frac{Mc_o}{Aer_o} \quad (5.7)$$

donde σ_i es el esfuerzo en la zona interna de la viga, σ_o es el esfuerzo en la zona externa de la viga, M es el momento flector, e es la distancia del eje centroidal hasta el eje neutro, c_i y c_o es la distancia desde el eje neutro hasta la zona interior y exterior de la viga, respectivamente, r_i y r_o son el radio que va desde el centro de curvatura hasta la zona interna y externa de la viga, respectivamente.

Gracias a las direcciones de los esfuerzos principales se observa que todos los tamaños logran alcanzar el esfuerzo máximo (σ_{max}) para la dirección tangencial (\hat{d}_t), y en los más pequeños se alcanza también en la dirección radial (\hat{d}_r). Indicando que los esfuerzos (σ_2 y σ_3), aunque ya haya superado el límite de ruptura para las direcciones radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t), estas no afectan a la valva a través de su espesor (fig. 5.83) y sólo provocan un efecto superficial de pérdida en el material nacarado (fig. 5.84), en la que se separa el material (por las plaquetas de la estructura nacarada) que contacta con el punzón mediante la compresión de las probetas en tales direcciones (fig. 4.1). Es posible hipotetizar que este efecto podría significar una ventaja evolutiva, de esta forma la estructura de la concha soportaría mayores cargas a las permitidas por el material antes de la rotura. Este efecto es sustentado mediante el análisis experimental de la flexo-compresión (sección 4.2.3), en la que se observa una aparente falla por delaminación (fig. 4.6). El análisis numérico avala la conclusión de este tipo de falla, puesto que es posible observar que existe una concentración de esfuerzos (σ_2 y σ_3) en las direcciones radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t) en el mismo sector localizado, siendo además un efecto superficial. Se concluye entonces que la condición preponderante ante un ataque por depredadores no son las propiedades del material, sino que la propia estructura de la concha del *Perumytilus purpuratus*.

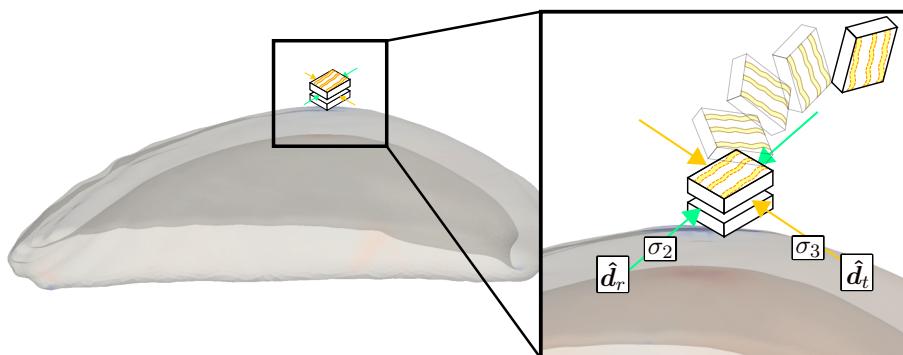


Figura 5.84. Pérdida de material debido a la concentración de esfuerzo en la zona A en las direcciones radial (\hat{d}_r) y tangencial (\hat{d}_t). Software *ParaView*

Capítulo 6

Conclusiones y perspectivas

En este capítulo se presentan las principales conclusiones obtenidas en el desarrollo de la investigación con las aportaciones y posibles líneas futuras de trabajo.

6.1. Conclusiones generales

Durante la investigación realizada se estudió y caracterizó el comportamiento biomecánico de valvas del mejillón *Perumytilus purpuratus* en condiciones de crecimiento natural (de las localidades de Huasco y Quintay) para su modelación numérica, cumpliendo a cabalidad el objetivo general.

En forma específica, se ha hecho una revisión extensa sobre la acidificación de los océanos y como estos afectan al individuo de estudio *P. purpuratus* en su morfología, periodo de vida, crecimiento, reproducción, toxicidad y depredación. Se ha realizado una recopilación bibliográfica sobre ensayos mecánicos en el material nacarado de diversos moluscos, investigaciones que han influenciado enormemente el desarrollo de la presente tesis, definiendo el modelo constitutivo de la concha a estudiar.

El estudio experimental ejecutado consistió en dos ensayos mecánicos cuasiestáticos, siendo un ensayo de flexocompresión, no estandarizado, y evaluando la respuesta estructural de la valva completa ante condiciones similares a depredación natural. Luego se realizó un ensayo de compresión uniaxial en pequeños fragmentos prismáticos de la valva. Los dos ensayos fueron realizados en distintas orientaciones y en estado seco.

Con las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos anteriores se caracterizó un modelo elástico lineal anisótropo del tipo ortótropo en el contexto del método de elementos finitos (**MEF**), validando los resultados experimentales del ensayo de compresión uniaxial en distintas orientaciones y, por lo tanto, el modelo constitutivo. Estas simulaciones numéricas se realizaron en *Vulcan*, implementando contacto superficial sobre las conchas procesadas por una microtomografía computacional (Micro-CT), de tal forma que la estructura digitalizada lograra captar las estrías y forma general de la valva sin perder detalles.

Con respecto a los resultados obtenidos de esta investigación, se puede concluir que:

- Se realizó una revisión bibliográfica sobre ensayos mecánicos y análisis experimental en moluscos con estructura nacarada. De esta forma, la presente investigación es la primera en la que se han realizado ensayos mecánicos cuasiestáticos en la especie *Perumytilus purpuratus*, desarrollando pruebas específicas para caracterizar el material y la estructura de la concha.
- A partir de la revisión bibliográfica se determinaron los factores ambientales que perjudican al molusco y el material de su concha, los depredadores más importantes y el modelo constitutivo del material elástico lineal frágil de carácter ortotropo. Del ensayo de compresión uniaxial se determinó que no existían diferencias significativas entre la valva izquierda y derecha o entre zonas de la concha, pero sí se observó un deterioro en las propiedades mecánicas del material en la dirección del espesor (d_e) mientras el individuo envejece. De las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t) no se observaron diferencias significativas en las propiedades mecánicas, aunque fue posible notar que todas las probetas fallan de una forma particular, dividiendo en dos el grosor en la misma dirección que las plaquetas del nácar.
- Del ensayo de flexo-compresión se observó el comportamiento bajo ataques de depredadores y el aumento de la resistencia bajo estas solicitudes a mayor edad del molusco. El aumento de la resistencia estructural a mayor longitud de su concha no resultó producto del material de la valva (considerando que se deteriora en el envejecimiento), sino por la propia estructura de la concha, disminuyendo la concentración de esfuerzos que someten a la valva a su rotura cuanto mayor es su longitud. Además, se observó una posible falla por delaminación en la zona de contacto punzón-valva, hipótesis que se sostiene a partir del tipo de falla en las probetas, es decir, al ser comprimidas en la dirección radial (d_r) y tangencial (d_t) en el ensayo de compresión uniaxial se produce una concentración de esfuerzo que separa las capas del nácar. El efecto de la falla fue localizado y muy concentrado sólo en la superficie.
- Se observaron diferencias desfavorables en las propiedades mecánicas en la dirección del espesor (d_e) cuando los individuos de menor tamaño presentaron una alta mortalidad (68 %), corroborando el título que ostenta el *Perumytilus purpuratus* de ser un bioindicador. Esto quiere decir que los efectos climáticos provocarían efectos perjudiciales en las propiedades mecánicas del material, aumentando la lista de factores indicadores de calentamiento o acidificación oceánica que el mejillón es capaz de captar, en este ejemplo, la posible falta de alimentación (efecto de menor tasa de crecimiento observado por [Cancino et al. \[21\]](#)) causante del deterioro material. Esta conclusión se debe a que el material utilizado en la compresión es el que se agregó en el margen de crecimiento, por lo tanto es material nuevo añadido en los tres meses. En cambio, en los demás

tamaños este efecto no fue notorio debido a que los más viejos tienden a crecer mucho menos, por lo que el material comprimido corresponde al que ya estaba anterior a los tres meses, por lo que los efectos adversos no se vieron reflejados en sus propiedades mecánicas.

- Se logró modelar la estructura de la concha (para cinco tamaños distintos) sometida a las solicitudes de la flexo-compresión con gran exactitud en simulaciones por **MEF**. A partir de este estudio se corroboraron los hallazgos presentes en los ensayos experimentales. Se determinó que a mayor largo de la concha, la concentración de esfuerzos a compresión disminuye en el ensayo de flexo-compresión. La concentración de esfuerzos (a partir de los esfuerzos principales) en la zona de contacto punzón-valva, fue en las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t), observando un comportamiento localizado y concentrado en la superficie. Por lo tanto, el tipo de falla en la concha da indicios, mediante simulación numérica y ambos ensayos experimentales, que se produce por una delaminación del material nacarado (separación de plaquetas) en la zona de contacto.
- Las simulaciones numéricas resultaron de gran calidad debido al uso de la microtomografía computarizada (Micro-CT), la cual entregó la estructura digitalizada con gran cantidad de detalle para su uso en la simulación por **MEF**. Además, la librería *PCL* [141] y el método *GSA* [145] resultaron indispensables en la creación del método para entregar ortotropía al material de la valva.
- Se comprobó, mediante ensayos experimentales y simulación numérica, que el modelo constitutivo elástico lineal frágil con comportamiento ortotropo es capaz de representar con buena aproximación las solicitudes a las que fue sometida la concha.

6.2. Principales aportes

Del presente trabajo se pueden destacar las siguientes contribuciones:

- Se utilizaron los diseños fabricados por [Abarca](#), dispositivos que permiten cuantificar propiedades mecánicas en el material de valvas de moluscos en ensayos cuasiestáticos [99]. Así es como se pueden implementar los ensayos de flexocompresión y compresión uniaxial en otras especies siguiendo los métodos explicados y detallados en el presente trabajo y en el de [Abarca](#).
- Se comprobó una simetría en el comportamiento mecánico de las valvas izquierda y derecha, lo que permite utilizar alguna de las valvas para obtener propiedades mecánicas y la otra para ser ensayada y observar su comportamiento estructural, realizar simulaciones numéricas o cualquier otro estudio pertinente.

- Se observó que la geometría de la concha resulta más significativo que las propiedades del material bajo la solicitud de flexo-compresión, considerando el deterioro del material de la concha mientras el individuo envejece y su concha crece, y que a mayor tamaño el individuo es capaz de soportar mayores cargas disipando el esfuerzo que provoca la falla estructural.
- Se creó un método capaz de otorgar direcciones ortótropas a esta estructura en particular, la cual puede ser extrapolada a otros moluscos o biomateriales con gran complejidad en sus geometrías en que este problema no resulte trivial, por ejemplo, arterías cuya simplificación ya no tenga que ser necesariamente una tubería, sino que, mediante este nuevo método, sea posible caracterizar la estructura de arterías y vasos sanguíneos con gran precisión. También es posible evaluar este método a componentes estructurales de construcción o minería.
- Se creó un método muy detallado para realizar simulaciones numéricas de la estructura de la concha mediante **MEF**, el cual puede ser extrapolado a otros moluscos o solicitudes de distintos ensayos mecánicos.
- Se obtuvo evidencia que la simulación numérica es capaz de describir el tipo de falla de la estructura del *Perumytilus purpuratus*.
- Se observó por primera vez la microestructura del *P. purpuratus* mediante imágenes **MEB**, además se analizó el tipo de falla por delaminación.

6.3. Líneas futuras de investigación

El trabajo realizado posee ciertos alcances o limitaciones que a su vez abren futuras líneas de investigación, planteando desafíos desde el punto de vista experimental como en el ámbito de la simulación numérica:

- En trabajos futuros se estudiará el comportamiento biomecánico de valvas frescas, es decir, con su material proteico aún activo. Se espera comportamiento plástico del material, además de mayor esfuerzo y deformación de fluencia en comparación al material pasivo estudiado en la presente tesis.
- Explorar y estudiar el comportamiento biomecánico de otros moluscos, comparando el material y su composición con el fin de buscar nuevos usos del mismo. Actualmente se está estudiando la fabricación de ladrillos con material reciclado y partículas de carbonato de calcio extraídas de valvas de moluscos.
- Estudiar los efectos ambientales en el comportamiento biomecánico del *Perumytilus purpuratus*, siendo un desafío el análisis de éstos bajo condiciones naturales de crecimiento, es decir, extraídos directamente desde su ecosistema.

- Crear un ensayo que permita obtener las propiedades mecánicas bajo solicitudes de tracción para este tipo de conchas tan pequeñas.
- Mejorar el ensayo de flexo-compresión, para evitar el efecto de fricción con la base.
- Mejorar las simulaciones numéricas del ensayo de flexo-compresión, implementando un modelo elástico lineal anisótropo bimodular, es decir, que permita diferencias de propiedades entre tracción y compresión. También implementar un mejor modelo para los elementos de contacto, como el del *Lagrangiano Aumentado*, en el software *Vulcan*.
- Procesar muestras de flexo-compresión en una microscopía electrónica de barrido (**MEB**), al igual que como se hizo en la compresión uniaxial y comprobar la microestructura dañada debido al posible fallo por delaminación del material nacarado.
- Extender el modelo de la simulación numérica a otros moluscos y así evaluar el efecto de las estrías, por ejemplo en el *Nautilus*, cuya concha se ajusta con precisión a la sucesión de **Fibonacci**.
- Implementar la simulación utilizando elementos Shell con espesor variable (espesor que podría ser modulado por el método de la superficie paramétrica), de tal forma que se minimice el tiempo de cálculo.
- Implementar otros estudios para cuantificar puntualmente las propiedades mecánicas de la valva. Utilizar las imágenes obtenidas por el Micro-CT para evaluar la densidad de la concha, con el fin de establecer un modelo que determine el módulo elástico a partir de su campo de densidad. Esta técnica se ha usado ampliamente en huesos, donde se han postulado relaciones entre densidad puntual con propiedades elásticas de cada nodo, pudiendo simular numéricamente el tejido duro sin haberlo sometido experimentalmente a esfuerzos mecánicos. Como trabajo futuro se plantea postular relaciones en base a las propiedades mecánicas expuestas en la presente tesis con densidad relativa de la valva usando tecnología Micro-CT. Con un modelo de ese estilo se podría estimar el comportamiento mecánico de fósiles, ya que se contaría con las piezas de museos para ser procesadas por el Micro-CT y, de esa forma, comprender los procesos evolutivos de especies extintas.
- Realizar estudios de fractura tanto experimental como en simulación numérica.
- Extrapolar el modelo de la simulación numérica bajo solicitudes presentes fuera del equilibrio biológico, es decir, bajo efectos del cambio climático (calentamiento global y acidificación oceánica).

Bibliografía

1. **PRADO, Luis y CASTILLA, Juan Carlos.** The bioengineer *Perumytilus purpuratus* (Mollusca: Bivalvia) in central Chile: Biodiversity, habitat structural complexity and environmental heterogeneity. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. 2006, vol. 86, n.º 2, págs. 417-421. ISSN 00253154.
2. **ACEVEDO, Jesús, ORELLANA, Fernanda I y GUIÑEZ, Ricardo.** Experimental evaluation of the in situ copper toxicity on associated fauna of *Perumytilus purpuratus* (Bivalvia: Mytiliidae), an ecosystem bioengineer. *Revista de biología marina y oceanografía*. 2010, vol. 45, n.º 3, págs. 497-505. ISSN 0718-1957. Disponible en: http://www.bcn.cl/carpeta_temas/temas_portada.2005-12-27.4449440028/.
3. **JONES, Clive G, LAWTON, John H y SHACHAK, Moshe.** Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*. 1994, vol. 69, n.º 3, págs. 373-386.
4. **BRIONES, Carolina et al.** Genetic connectivity of the ecosystem engineer *Perumytilus purpuratus* north to the 32°S southeast Pacific ecological discontinuity. *Marine Biology*. 2013, vol. 160, n.º 12, págs. 3143-3156. ISSN 00253162.
5. **ALVARADO, Jorge L. y CASTILLA, Juan C.** *Marine Ecology Progress Series*. Vol. 133, Tridimensional matrices of mussels *Perumytilus purpuratus* on intertidal platforms with varying wave forces in central Chile. *Marine Ecology Progress Series*, 1996. N.º 1-3. ISSN 01718630.
6. **BARTON, Alan et al.** The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, shows negative correlation to naturally elevated carbon dioxide levels: Implications for near-term ocean acidification effects. *Limnology and Oceanography*. 2012, vol. 57, n.º 3, págs. 698-710. ISSN 00243590.
7. **K., Caldeira y E., Wickett Michael.** 425365a. *Nature*. 2003, vol. 425, n.º September, págs. 2003.
8. **CALDEIRA, Ken y WICKETT, Michael.** Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*. 2005, vol. 110, n.º 9, págs. 1-12. ISSN 01480227.
9. **SABINE, Christopher L. et al.** The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*. 2004, vol. 305, n.º 5682, págs. 367-371. ISSN 00368075.
10. **CURREY, J.D.** Three analogies to explain the mechanical properties of bone. *Biorheology*. 2017, vol. 2, n.º 1, págs. 1-10. ISSN 0006355X.
11. **TAYLOR, J.D. y LAYMAN, M.** The mechanical properties of bivalve (Mollusca) shell structure. *Paleontology*. 1972, vol. 15, n.º 7, págs. 73-87.

12. ACEVEDO, Roberto et al. Microstructure of calcite and aragonite in some Chilean gastropods and bivalves molluscs. *Asian Journal of Spectroscopy*. 2010, vol. 14, n.º 3-4, págs. 63-76. ISSN 09719237.
13. AVILA, M. et al. Corfo-Ifop. Estado de situación y perspectiva de la Acuicultura en Chile. Instituto de Fomento Pesquero, 1994.
14. GÓMEZ-ESPINOSA, Catalina, GÍO-ARGÁEZ, Raúl y VEGA, Miriam Carreño de la. Estado del conocimiento de la durofagia en el registro fósil: interacción depredador-presa en moluscos marinos (Clases Gastropoda y Bivalvia). *Tip*. 2015, vol. 18, n.º 1, págs. 61-70. ISSN 1405888X.
15. SAAVEDRA, Luisa M. et al. Local Habitat Influences on Feeding and Respiration of the Intertidal Mussels *Perumytilus purpuratus* Exposed to Increased pCO₂ Levels. *Estuaries and Coasts*. 2018, vol. 41, n.º 4, págs. 1118-1129. ISSN 15592731.
16. BARTHELAT, F. et al. On the mechanics of mother-of-pearl: A key feature in the material hierarchical structure. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2007, vol. 55, n.º 2, págs. 306-337. ISSN 00225096.
17. BARTHELAT, F., RIM, J.E. y ESPINOSA, H.D. A Review on the Structure and Mechanical Properties of Mollusk Shells à Perspectives on Synthetic Biomimetic Materials. *Applied Scanning Probe Methods XIII*. 2008, págs. 17-44.
18. BEZARES, Jiddu et al. Macromolecular structure and viscoelastic response of the organic framework of nacre in *Haliotis rufescens*: A perspective and overview. *Theoretical and Applied Mechanics Teorijska i primenjena mehanika*. 2011, vol. 38, n.º 2, págs. 75-106. ISSN 1450-5584.
19. RAMAJO, Laura et al. Plasticity and trade-offs in physiological traits of intertidal mussels subjected to freshwater-induced environmental variation. *Marine Ecology Progress Series*. 2016, vol. 553, págs. 93-109. ISSN 01718630.
20. OSORES, Sebastián J.A. et al. Plasticity and inter-population variability in physiological and life-history traits of the mussel *Mytilus chilensis*: A reciprocal transplant experiment. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2017, vol. 490, págs. 1-12. ISSN 00220981.
21. CANCINO, J y ROJAS, M. Evaluación del potencial de crecimiento de *Perumytilus purpuratus* a distintas alturas en el intermareal de Chile central. *Medio Ambiente*. 1986, vol. 8, n.º May, págs. 27-32.
22. CABANAS, Pablo Oyarzún et al. Análisis comparativo del ciclo gametogénico de *Perumytilus purpuratus* (Bivalvia : Mytilidae), en las localidades de Taltal y Huasco , norte de Chile Introducción Material y métodos. *Revista de biología marina y oceanografía*. 2010, vol. 45, n.º 1, págs. 43-58.
23. VALDIVIA, Nelson y THIEL, Martin. Effects of point-source nutrient addition and mussel removal on epibiotic assemblages in *Perumytilus purpuratus* beds. *Journal of Sea Research*. 2006, vol. 56, n.º 4, págs. 271-283. ISSN 13851101.
24. OSORIO, C y BAHAMONDE, N. *Biología Pesquera*. Vol. 3, Moluscos bivalvos en pesquerías chilenas. Biología Pesquera, 1968.

25. **MONTENEGRO VILLALOBOS, Diana, OLIVARES PAZ, Alberto y GONZÁLEZ, María Teresa.** Hermaphroditism in Marine Mussel *Perumytilus purpuratus* (Lamarck, 1819), (Mollusca: Mytilidae). *International Journal of Morphology*. 2010, vol. 28, n.º 2, págs. 569-573. ISSN 0717-9502.
26. **GUIÑEZ.** Dinámica poblacional del chorito maico, *Perumytilus purpuratus* (Lamarck, 1819) (Bivalvia: Mytilidae), en gradientes de exposición al oleaje. 1996.
27. **KELAHER, Brendan P., CASTILLA, Juan Carlos y PRADO, Luis.** Is there redundancy in bioengineering for molluscan assemblages on the rocky shores of central Chile? *Revista Chilena de Historia Natural*. 2007, vol. 80, n.º 2, págs. 173-186. ISSN 07176317.
28. **OSORIO, C.** Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. Moluscos Marinos en Chile. Especies de importancia económica. Guía para su identificación. 2002.
29. **LOZADA, Eliana y REYES, Patricia.** Reproductive Biology of a Population of *Perumytilus purpuratus* at El Tabo, Chile (Mollusca: Bivalvia: Mytilidae). *The Veliger*. 1981, vol. 24, págs. 147-154.
30. **RUDRARAJU, Shiva et al.** A computational framework for the morpho-elastic development of molluskan shells by surface and volume growth. *PLoS Computational Biology*. 2019, vol. 15, n.º 7. ISSN 15537358. Disponible desde arXiv: [1901.00497](https://arxiv.org/abs/1901.00497).
31. **BOUCHET, Philippe y ROCROI, Jean-Pierre.** *Malacologia*. Vol. 47, Classification and Nomenclator of Gastropod Families. 2004. N.º 1-2. Disponible en: <http://biostor.org/reference/14735>.
32. **JONES, M.B.** The marine fauna of the British Isles and north-west Europe. Volume 1: Introduction and protozoans to arthropods. Volume 2: Molluscs to chordates. En: *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 1992, vol. 158, págs. 146-148. N.º 1. ISSN 00220981. Disponible en: <http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=sourcedetails&id=1>.
33. **RAVEN, Peter H., MARGULIS, Lynn y SCHWARTZ, Karlene V.** Five Kingdoms: An Illustrated Guide to the Phyla of Life on Earth. En: *The Bryologist*. 1988, vol. 91, pág. 382. N.º 4. ISSN 00072745. Disponible en: <http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=sourcedetails&id=3>.
34. **WIETERS, Evie A. et al.** Scales of dispersal and the biogeography of marine predator-prey interactions. *American Naturalist*. 2008, vol. 171, n.º 3, págs. 405-417. ISSN 00030147.
35. **GORDILLO, S.** Predation signs by *Acanthina Fischer Von Waldheim, 1807* (Gasteropoda: Muricidae) on Bivalvia. *Ameghiniana*. 2001, vol. 38, n.º 1, págs. 55-60.
36. **MANRÍQUEZ, Patricio H. et al.** Effects of predation risk on survival, behaviour and morphological traits of small juveniles of concholepas concholepas (loco). *Marine Ecology Progress Series*. 2013, vol. 472, págs. 169-183. ISSN 01718630.
37. **SOTO, Rubén E., CASTILLA, Juan C. y BOZINOVIC, Francisco.** Conducta de frrajeo del gastrópodo *Acanthina monodon* Pallas, 1774 (Gastropoda: Muricidae) en el intermareal rocoso de Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural*. 2004, vol. 77, n.º 1, págs. 157-175. ISSN 0716078X.
38. **MUSEUM, National y NATURAL, O F.** Comparative Anatomy of Four Primitive Muricacean Gastropods : Implications for Trophonine Phylogeny. *Natural History*. 1984, vol. 3, n.º 1, págs. 11-26.

39. **LIMA, Ana Valêscia P. y MARTINS, Inês X.** Histomorfologia do órgão acessório de perfuração de Thais haemastoma (Mollusca, Gastropoda). *Iheringia. Série Zoologia*. 2009, vol. 99, n.º 2, págs. 149-152.
40. **MANRÍQUEZ, Patricio H et al.** Science of the Total Environment The combined effects of ocean acidification and warming on a habitat-forming shell-crushing predatory crab. *Science of the Total Environment*. 2020, n.º xxxx, págs. 143587. ISSN 0048-9697. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143587>.
41. **DONEY, Scott C. et al.** Climate change impacts on marine ecosystems. *Annual Review of Marine Science*. 2012, vol. 4, n.º 1, págs. 11-37. ISSN 19411405.
42. **CAO, Long et al.** Sensitivity of ocean acidification and oxygen to the uncertainty in climate change. *Environmental Research Letters*. 2014, vol. 9, n.º 6. ISSN 17489326.
43. **SALISBURY, J et al.** And on top of all that... Coping with ocean acidification in the midst of many stressors. *Oceanography*. 2015, vol. 28, n.º 2, págs. 48-61.
44. **GATTUSO, J. P. et al.** Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *Science*. 2015, vol. 349, n.º 6243. ISSN 10959203.
45. **MAGNAN, Alexandre K. et al.** Implications of the Paris agreement for the ocean. *Nature Climate Change*. 2016, vol. 6, n.º 8, págs. 732-735. ISSN 17586798. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3038>.
46. **HARALDSSON, Conny et al.** Rapid, high-precision potentiometric titration of alkalinity in ocean and sediment pore waters. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1997, vol. 44, n.º 12, págs. 2031-2044. ISSN 09670637.
47. **FRANCISCO, José et al.** (Mesogastropoda : Strombidae). 2017, vol. 65, n.º June, págs. 505-515.
48. **IPCC.** Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambio climático 2014: Informe de Síntesis. 2014.
49. **KLEYPAS, Joan A.** Impacts of ocean acidification on marine biodiversity. *Biodiversity and Climate Change: Transforming the Biosphere*. 2019, n.º Dic, págs. 185-195.
50. **KROEKER, Kristy J. et al.** Impacts of ocean acidification on marine organisms: Quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biology*. 2013, vol. 19, n.º 6, págs. 1884-1896. ISSN 13541013.
51. **KROEKER, Kristy J. et al.** Meta-analysis reveals negative yet variable effects of ocean acidification on marine organisms. *Ecology Letters*. 2010, vol. 13, n.º 11, págs. 1419-1434. ISSN 1461023X.
52. **BERGE, John Arthur et al.** Effects of increased sea water concentrations of CO₂ on growth of the bivalve *Mytilus edulis* L. *Chemosphere*. 2006, vol. 62, n.º 4, págs. 681-687. ISSN 00456535.
53. **BENIASCH, Elia et al.** Elevated level of carbon dioxide affects metabolism and shell formation in oysters *Crassostrea virginica*. *Marine Ecology Progress Series*. 2010, vol. 419, n.º August 2014, págs. 95-108. ISSN 01718630.
54. **DUARTE, C. et al.** Combined effects of temperature and ocean acidification on the juvenile individuals of the mussel *Mytilus chilensis*. *Journal of Sea Research*. 2014, vol. 85, págs. 308-314. ISSN 13851101. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seares.2013.06.002>.

55. **RAMAJO, Laura et al.** Biominerization changes with food supply confer juvenile scallops (*Argopecten purpuratus*) resistance to ocean acidification. *Global Change Biology*. 2016, vol. 22, n.º 6, págs. 2025-2037. ISSN 13652486.
56. **PÉREZ, Claudia A. et al.** Riverine discharges impact physiological traits and carbon sources for shell carbonate in the marine intertidal mussel *Perumytilus purpuratus*. *Limnology and Oceanography*. 2016, vol. 61, n.º 3, págs. 969-983. ISSN 19395590.
57. **ACEVEDO, Jesús, ORELLANA, Fernanda I. y GUIÑEZ, Ricardo.** Evaluación experimental de la toxicidad de cobre in situ sobre la fauna asociada a *Perumytilus purpuratus* (Bivalvia: Mytilidae), un ingeniero ecosistémico. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. 2010, vol. 45, n.º 3, págs. 497-505. ISSN 07181957.
58. **OYARZÚN, Pablo A. et al.** Reproductive patterns of mussel *Perumytilus purpuratus* (Bivalvia: Mytilidae), along the Chilean coast: Effects caused by climate change? *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. 2018, vol. 98, n.º 2, págs. 375-385. ISSN 14697769.
59. **MANRÍQUEZ, Patricio H. et al.** Ocean acidification affects predator avoidance behaviour but not prey detection in the early ontogeny of a keystone species. *Marine Ecology Progress Series*. 2014, vol. 502, págs. 157-167. ISSN 01718630.
60. **BROWN, G et al.** Manejo de la Biodiversidad del suelo en los ecosistemas agrícolas. *Manejo de la Biodiversidad en los Ecosistemas Agrícolas*. 2007, págs. 234-282.
61. **LAGOS, Nelson A. et al.** Effects of temperature and ocean acidification on shell characteristics of *Argopecten purpuratus*: Implications for scallop aquaculture in an upwelling-influenced area. *Aquaculture Environment Interactions*. 2016, vol. 8, n.º 1pcc 2014, págs. 357-370. ISSN 18697534.
62. **NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION - U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE.** *What is upwelling?* 2017. Disponible en: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/upwelling.html>.
63. **SERNAPESCA.** *Anuarios Estadísticos de Pesca y Acuicultura / Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura*. 2017. Disponible en: <http://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura>.
64. **WOLF-GLADROW, Dieter A. et al.** Direct effects of CO₂ concentration on growth and isotopic composition of marine plankton. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*. 1999, vol. 51, n.º 2, págs. 461-476. ISSN 02806509.
65. **WGLEY, T. M.L., RICHELST, R. y EDMONDS, J. A.** Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations. *Climate Change*. 2017, vol. 379, págs. 291-294.
66. **HENDRIKS, I. E., DUARTE, C. M. y ÁLVAREZ, M.** Vulnerability of marine biodiversity to ocean acidification: A meta-analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2010, vol. 86, n.º 2, págs. 157-164. ISSN 02727714.
67. **KROEKER, Kristy J. et al.** Impacts of ocean acidification on marine organisms: Quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biology*. 2013, vol. 19, n.º 6, págs. 1884-1896. ISSN 13541013.
68. **TORRES, Rodrigo y AMPUERO, Patricio.** Strong CO₂ outgassing from high nutrient low chlorophyll coastal waters off central Chile (30°S): The role of dissolved iron. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2009, vol. 83, n.º 2, págs. 126-132. ISSN 02727714.

69. **FEELY, Richard A. et al.** Evidence for upwelling of corrosive "acidified" water onto the continental shelf. *Science*. 2008, vol. 320, n.º 5882, págs. 1490-1492. ISSN 00368075.
70. **GRUBER, Nicolas et al.** Rapid progression of ocean acidification in the California Current System. *Science*. 2012, vol. 337, n.º 6091, págs. 220-223. ISSN 10959203.
71. **CAMACHO, H H.** *Invertebrados fósiles*. EUDEBA, 1966. Manuales de EUDEBA.: Ciencias naturales. Disponible en: <https://books.google.com.bo/books?id=bxE5AAAAIAAJ>.
72. **JIAO, D. et al.** Anisotropic mechanical behaviors and their structural dependences of crossed-lamellar structure in a bivalve shell. *Materials Science and Engineering C*. 2016, vol. 59, págs. 828-837. ISSN 09284931.
73. **BARTHELAT, Francois y ZHU, Deju.** A novel biomimetic material duplicating the structure and mechanics of natural nacre. *Journal of Materials Research*. 2011, vol. 26, n.º 10, págs. 1203-1215. ISSN 08842914.
74. **ZAREMBA, Charlotte M. et al.** Critical transitions in the biofabrication of abalone shells and flat pearls. *Chemistry of Materials*. 1996, vol. 8, n.º 3, págs. 679-690. ISSN 08974756.
75. **CARTWRIGHT, Julian H.E. et al.** Spiral and target patterns in bivalve nacre manifest a natural excitable medium from layer growth of a biological liquid crystal. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2009, vol. 106, n.º 26, págs. 10499-10504. ISSN 00278424.
76. **LOPES-LIMA, Manuel et al.** Microstructural characterization of inner shell layers in the freshwater bivalve *Anodonta cygnea* Manuel Lopes-Lima, António Rocha, Fernando Goncalves, José Andrade, Jorge Machado.
77. **WANG, R. Z. AND SUO, Z. AND EVANS, A. G. AND YAO, N. AND AKSAY, I. A.** Deformation mechanisms in nacre. *Journal of Materials Research*. 2001, vol. 16, n.º iii, págs. 2485-2493.
78. **BARTHELAT, Francois.** Biomimetics for next generation materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2007, vol. 365, n.º 1861, págs. 2907-2919. ISSN 1364503X.
79. **DUBEY, Devendra K. y TOMAR, Vikas.** Role of molecular level interfacial forces in hard biomaterial mechanics: A review. *Annals of Biomedical Engineering*. 2010, vol. 38, n.º 6, págs. 2040-2055. ISSN 00906964.
80. **YOURDKHANI, Mostafa, PASINI, Damiano y BARTHELAT, Francois.** Multiscale mechanics and optimization of gastropod shells. *Journal of Bionic Engineering*. 2011, vol. 8, n.º 4, págs. 357-368. ISSN 16726529. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/S1672-6529\(11\)60041-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1672-6529(11)60041-3).
81. **MEYERS, Marc André et al.** Mechanical strength of abalone nacre: Role of the soft organic layer. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2008, vol. 1, n.º 1, págs. 76-85. ISSN 17516161.
82. **BARTHELAT, François et al.** Mechanical properties of nacre constituents and their impact on mechanical performance. *Journal of Materials Research*. 2006, vol. 21, n.º 8, págs. 1977-1986. ISSN 08842914.
83. **MEYERS, Marc André et al.** Biological materials: Structure and mechanical properties. *Progress in Materials Science*. 2008, vol. 53, n.º 1, págs. 1-206. ISSN 00796425.
84. **S., Kalpana, R., Dinesh y MOHANTY, Bedabibhas.** Biomimetic Lessons Learnt from Nacre. *Biomimetics Learning from Nature*. 2010, n.º Abelson 1954.

85. **BARTHELAT, Francois.** Nacre from mollusk shells: A model for high-performance structural materials. *Bioinspiration and Biomimetics*. 2010, vol. 5, n.º 3, págs. 1-8. ISSN 17483182.
86. **MEYERS, Marc A. et al.** Biological materials: A materials science approach. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2011, vol. 4, n.º 5, págs. 626-657. ISSN 17516161. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2010.08.005>.
87. **BHUSHAN, Bharat.** Biomimetics: Lessons from Nature - an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2009, vol. 367, n.º 1893, págs. 1445-1486. ISSN 1364503X.
88. **EVANS, A. G. et al.** Model for the robust mechanical behavior of nacre. *Journal of Materials Research*. 2001, vol. 16, n.º 9, págs. 2475-2482. ISSN 08842914.
89. **BAZE, Wallace B et al.** UC San Diego UC San Diego Electronic Theses and Dissertations by. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2012, vol. 290, n.º 44, págs. 1280-1287. ISSN 00278424.
90. **VERMA, Devendra, KATTI, Kalpana y KATTI, Dinesh.** Photoacoustic FTIR spectroscopic study of undisturbed nacre from red abalone. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2006, vol. 64, n.º 4, págs. 1051-1057. ISSN 13861425.
91. **FRANCIS, Julian y VINCENT, Vincent.** The mechanical design of nacre. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*. 1988, vol. 234, n.º 1277, págs. 415-440. ISSN 0080-4649.
92. **SARIKAYA, M. et al.** Mechanical Property-Microstructural Relationships in Abalone Shell. *MRS Proceedings*. 1989, vol. 174, págs. 109-116. ISSN 0272-9172.
93. **YASREBI, M. et al.** Biomimetic Processing of Ceramics and Ceramic-Metal Composites. *MRS Proceedings*. 1990, vol. 180, págs. 625-635. ISSN 0272-9172.
94. **GUNNISON, Katie E. et al.** Structure-Mechanical Property Relationships In A Biological Ceramic-Polymer Composite: Nacre. *MRS Proceedings*. 1991, vol. 255, págs. 171-183. ISSN 0272-9172.
95. **SUN, Ji yu y TONG, Jin.** Fracture Toughness Properties of Three Different Biomaterials Measured by Nanoindentation. *Journal of Bionic Engineering*. 2007, vol. 4, n.º 1, págs. 11-17. ISSN 16726529.
96. **SUN, Jiyu y BHUSHAN, Bharat.** Hierarchical structure and mechanical properties of nacre: A review. *RSC Advances*. 2012, vol. 2, n.º 20, págs. 7617-7632. ISSN 20462069.
97. **CARTWRIGHT, Julyan H.E. y CHECA, Antonio G.** The dynamics of nacre self-assembly. *Journal of the Royal Society Interface*. 2007, vol. 4, n.º 14, págs. 491-504. ISSN 17425662.
98. **TANG, Zhiyong et al.** Nanostructured artificial nacre. *Nature Materials*. 2003, vol. 2, n.º 6, págs. 413-418. ISSN 14761122.

99. **ABARCA, Aldo.** *Estudio mecánico estructural sobre valvas de ostiones (Argopecten Purpuratus) sometidas a escenarios de cambios climáticos.* 2018. Disponible en: http://repositorio.usach.cl/R/FHS2AQ8HEXA7HA3F2X4I19IE7UG7RA365HGUYLQPVMSYYAB5L-01751?func=results-jump-full&set_entry=000004&set_number=000165&base=GEN01. Tesis Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Mecánica : Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, Santiago, 2019.
100. **BRUET, B. J.F. et al.** Nanoscale morphology and indentation of individual nacre tablets from the gastropod mollusc *Trochus niloticus*. *Journal of Materials Research*. 2005, vol. 20, n.º 9, págs. 2400-2419. ISSN 08842914.
101. **KATTI, Kalpana S., MOHANTY, Bedabibhas y KATTI, Dinesh R.** Nanomechanical properties of nacre. *Journal of Materials Research*. 2006, vol. 21, n.º 5, págs. 1237-1242. ISSN 08842914.
102. **MOHANTY, Bedabibhas et al.** Dynamic nanomechanical response of nacre. *Journal of Materials Research*. 2006, vol. 21, n.º 8, págs. 2045-2051. ISSN 08842914.
103. **TIWARY, Chandra Sekhar et al.** Morphogenesis and mechanostabilization of complex natural and 3D printed shapes. *Science Advances*. 2015, vol. 1, n.º 4, págs. 18-21. ISSN 23752548.
104. **CURREY, John.** Measurement of the mechanical properties of bone: A recent history. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2009, vol. 467, n.º 8, págs. 1948-1954. ISSN 15281132.
105. **WOLFF, J.** Concerning the interrelationship between form and function of the individual parts of the organism. By Julius Wolff, 1900. *Clinical orthopaedics and related research*. 1988, vol. 228, págs. 2-11.
106. **VELÁZQUEZ AMEIJIDE, Juan.** Modelo constitutivo para tejido óseo humano: Propiedades mecánicas del hueso cortical de costilla. *Universitat Politècnica de Catalunya*. 2015, págs. 213.
107. **TEJEDOR, Francisco Javier.** *Analisis de Varianza - Cuadernos de Estadistica*. La Muralla, 2000.
108. **BROWN, Morton B. y FORSYTHE, Alan B.** Robust tests for the equality of variances. *Journal of the American Statistical Association*. 1974, vol. 69, n.º 346, págs. 364-367. ISSN 1537274X. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/2285659>.
109. **TUKEY, John W.** Comparing Individual Means in the Analysis of Variance. *Biometrics*. 1949, vol. 5, n.º 2, págs. 99. ISSN 0006341X. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/3001913>.
110. **SONG, F. y BAI, Y. L.** Effects of nanostructures on the fracture strength of the interfaces in nacre. *Journal of Materials Research*. 2003, vol. 18, n.º 8, págs. 1741-1744. ISSN 08842914.
111. **CHEN, Guowei et al.** Vertically oriented structure and its fracture behavior of the Indonesia white-pearl oyster. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2017, vol. 66, págs. 211-223. ISSN 18780180. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.11.002>.

112. **LI, Xiaodong, XU, Zhi Hui y WANG, Rizhi.** In situ observation of nanograin rotation and deformation in nacre. *Nano Letters*. 2006, vol. 6, n.º 10, págs. 2301-2304. ISSN 15306984.
113. **ORTIZ, Christine y BOYCE, Mary C.** Materials science: Bioinspired structural materials. *Science*. 2008, vol. 319, n.º 5866, págs. 1053-1054. ISSN 00368075.
114. **MELZNER, Frank et al.** Food supply and seawater pCO₂ impact calcification and internal shell dissolution in the blue mussel *Mytilus edulis*. *PLoS ONE*. 2011, vol. 6, n.º 9. ISSN 19326203.
115. **WILKERSON, Ryan P. et al.** A Novel Approach to Developing Biomimetic (âNacre-Likeâ) Metal-Compliant-Phase (NickelâAlumina) Ceramics through Coextrusion. *Advanced Materials*. 2016, vol. 28, n.º 45, págs. 10061-10067. ISSN 15214095.
116. **SONG, Jingru et al.** Crack deflection occurs by constrained microcracking in nacre. *Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao*. 2018, vol. 34, n.º 1, págs. 143-150. ISSN 16143116.
117. **ABID, Najmul, PRO, J. William y BARTHELAT, Francois.** Fracture mechanics of nacre-like materials using discrete-element models: Effects of microstructure, interfaces and randomness. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2019, vol. 124, págs. 350-365. ISSN 00225096. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.10.012>.
118. **SARIKAYA, Mehmet.** An introduction to biomimetics: A structural viewpoint. *Microscopy Research and Technique*. 1994, vol. 27, n.º 5, págs. 360-375. ISSN 10970029.
119. **MENIG, R. et al.** Quasi-static and dynamic mechanical response of *Haliotis rufescens* (abalone) shells. *Acta Materialia*. 2000, vol. 48, n.º 9, págs. 2383-2398. ISSN 13596454.
120. **WEGST, Ulrike G.K. et al.** Bioinspired structural materials. *Nature Materials*. 2015, vol. 14, n.º 1, págs. 23-36. ISSN 14764660.
121. **JIAO, Da et al.** Intrinsic hierarchical structural imperfections in a natural ceramic of bivalve shell with distinctly graded properties. *Scientific Reports*. 2015, vol. 5, n.º June, págs. 1-13. ISSN 20452322. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/srep12418>.
122. **LI, Ling, WEAVER, James C. y ORTIZ, Christine.** Hierarchical structural design for fracture resistance in the shell of the pteropod *Clio pyramidata*. *Nature Communications*. 2015, vol. 6, págs. 6216. ISSN 20411723.
123. **YUAN, Quan et al.** New Insight into the Toughening Mechanisms of Seashell: From Arch Shape to Multilayer Structure. *Journal of Nanomaterials*. 2016, vol. 2016. ISSN 16874129.
124. **RODRÍGUEZ-GARCÍA, Verónica et al.** Automatically processed bioinspired hierarchical carbon fiber composites. *ICCM International Conferences on Composite Materials*. 2019, vol. 2019-Augus, n.º August.
125. **DHANASEKAR, M., PAGE, A. W. y KLEEMAN, P. W.** Failure of Brick Masonry Under Biaxial Stresses. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers (London)*. 1985, vol. 79, n.º pt 2, págs. 295-313. ISSN 00203262.
126. **LUCCIONI, Bibiana y ROUGIER, Viviana C.** In-plane retrofitting of masonry panels with fibre reinforced composite materials. *Construction and Building Materials*. 2011, vol. 25, n.º 4, págs. 1772-1788. ISSN 09500618. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.088>.

127. **LISHAK, Vadim I., YAGUST, Vladimir I. y YANKELEVSKY, David Z.** 2-D Orthotropic failure criteria for masonry. *Engineering Structures*. 2012, vol. 36, págs. 360-371. ISSN 01410296. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.11.033>.
128. **D'ALTRI, Antonio Maria et al.** *Archives of Computational Methods in Engineering*. Vol. 27, Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification. Springer Netherlands, 2020. N.º 4. ISSN 18861784. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09351-x>.
129. **THAMBOO, J. A. y DHANASEKAR, M.** Nonlinear finite element modelling of high bond thin-layer mortared concrete masonry. *International Journal of Masonry Research and Innovation*. 2016, vol. 1, n.º 1, págs. 5-26. ISSN 20569467.
130. **BRIONES, Carolina et al.** Geographical variation of shell thickness in the mussel *perumytilus purpuratus* along the southeast pacific coast. *Biological Bulletin*. 2014, vol. 227, n.º 3, págs. 221-231. ISSN 00063185.
131. **ALIN, Aylin.** Minitab. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 2010, vol. 2, n.º 6, págs. 723-727. ISSN 19395108. Disponible en: <https://www.minitab.com/>.
132. **RIISGÅRD, Hans Ulrik, BØTTIGER, Line y PLEISSNER, Daniel.** Effect of Salinity on Growth of Mussels, *Mytilus edulis* with Special Reference to Great Belt (Denmark). *Open Journal of Marine Science*. 2012, vol. 02, n.º 04, págs. 167-176. ISSN 2161-7384.
133. **CELENTANO, Diego, OLLER, Sergio y OÑATE, Eugenio.** A coupled thermomechanical model for the solidification of cast metals. *International Journal of Solids and Structures*. 1996, vol. 33, n.º 5, págs. 647-673. ISSN 00207683.
134. **BRUKER-MIKRO-CT, Company.** The user ' s guide - ALLE. *The Hand*. 2010, págs. 1-112.
135. **CAMILO, A. A. et al.** INVESALIUS: Medical image edition. *1st International Conference on Design and Processes for Medical Devices*. 2012, n.º January, págs. 279-282. Disponible en: <https://invesalius.github.io>.
136. **CIGNONI, P. et al.** MeshLab: An open-source mesh processing tool. En: *6th Eurographics Italian Chapter Conference 2008 - Proceedings*. 2008, págs. 129-136. Disponible en: <https://www.meshlab.net>.
137. **SCHMIDT, Ryan y SINGH, Karan.** Meshmixer: An interface for rapid mesh composition. En: *ACM SIGGRAPH 2010 Talks, SIGGRAPH '10*. 2010. Disponible en: <https://www.meshmixer.com>.
138. **MELENDO, A et al.** *Gid*. 2018. Disponible en: <https://www.gidhome.com>.
139. **LABELLE, F.** Tetrahedral Mesh Generation with Good Dihedral Angles Using Point Lattices. 2007, págs. 99.
140. **LO, S. H.** Optimization of tetrahedral meshes based on element shape measures. *Computers and Structures*. 1997, vol. 63, n.º 5, págs. 951-961. ISSN 00457949.
141. **RUSU, Radu Bogdan y COUSINS, Steve.** 3D is here: Point Cloud Library (PCL). *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2011, págs. 1-4. ISSN 10504729. Disponible en: <https://pointclouds.org>.

142. **TEFAS, Anastasios y PITAS, Ioannis.** Principal component analysis. En: *Intelligent Systems*. Ed. por LOVRIC, Miodrag. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, págs. 1094-1096. ISSN 00401706. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_455.
143. **MA, Ying Liang y HEWITT, W. T.** Point inversion and projection for NURBS curve and surface: Control polygon approach. *Computer Aided Geometric Design*. 2003, vol. 20, n.º 2, págs. 79-99. ISSN 01678396.
144. **MORTENSON, Michael E.** *Geometric Modeling (2nd Ed.)* USA: John Wiley Sons, Inc., 1997.
145. **LI, Xiaowu et al.** A Geometric Strategy Algorithm for Orthogonal Projection onto a Parametric Surface. *Journal of Computer Science and Technology*. 2019, vol. 34, n.º 6, págs. 1279-1293. ISSN 18604749.
146. **CAÑAS, Daniel et al.** Mechanical characterization of arteries affected by fetal growth restriction in guinea pigs (*Cavia porcellus*). *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2018, vol. 88, págs. 92-101. ISSN 18780180. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.08.010>.
147. **DAVIS, Joseph R.** *Metals Handbook Desk Edition*. Metals Handbook Desk Edition. ASM International, 2018. Disponible en: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.mhde2.9781627081993>.
148. **STEMPFLÉ, Ph et al.** Mechanical properties of the elemental nanocomponents of nacre structure. *Materials Science and Engineering C*. 2010, vol. 30, n.º 5, págs. 715-721. ISSN 09284931.
149. **HUBER, M T.** Die Theorie des kreuzweise bewehrten Eisenbetonplatten. *Der Bauingenieur*. 1923, vol. 4, págs. 354-392.
150. **PANC, Vladimir.** *Theories of elastic plates*. Theories of elastic plates. 2.^a ed. Springer Netherlands, 1975.
151. **BINGOL, Onur Rauf y KRISHNAMURTHY, Adarsh.** NURBS-Python: An open-source object-oriented NURBS modeling framework in Python. *SoftwareX*. 2019, vol. 9, págs. 85-94. ISSN 23527110.
152. **EDITION, Eighth y EDITION, Eighth.** *Mechanical Engineering*. Vol. 8, Shigley's Mechanical Engineering Design. 9th. McGraw-Hill Education, 2012. Disponible en: <https://books.google.cl/books?id=eT1DPgAACAAJ>.

APÉNDICES

Apéndice A

Curvas de ensayos mecánicos

A.1. Compresión uniaxial

En la sección 4.2.1 se presentan los resultados generales del ensayo de compresión uniaxial (otros detalles en la sección 3.4.1). En este apartado se explica la forma en que se modifica la curva entregada por la máquina de ensayos universales Instron 3342 después de haber dividido la fuerza captada por la celda de carga entre el área transversal de la probeta utilizada (fig. 3.6). Esto se realiza con el fin de obtener las propiedades mecánicas del material: módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}). Además, considerando la gran cantidad de ensayos (capítulo 3), sólo se presenta una curva representativa del proceso.

La máquina Instron 3342 posee una celda de carga (fig. ??) con la capacidad de captar la fuerza ejercida por la placa superior móvil. Por lo tanto, este instrumento otorga una curva representativa de fuerza contra desplazamiento de la placa móvil (fig. A.1).

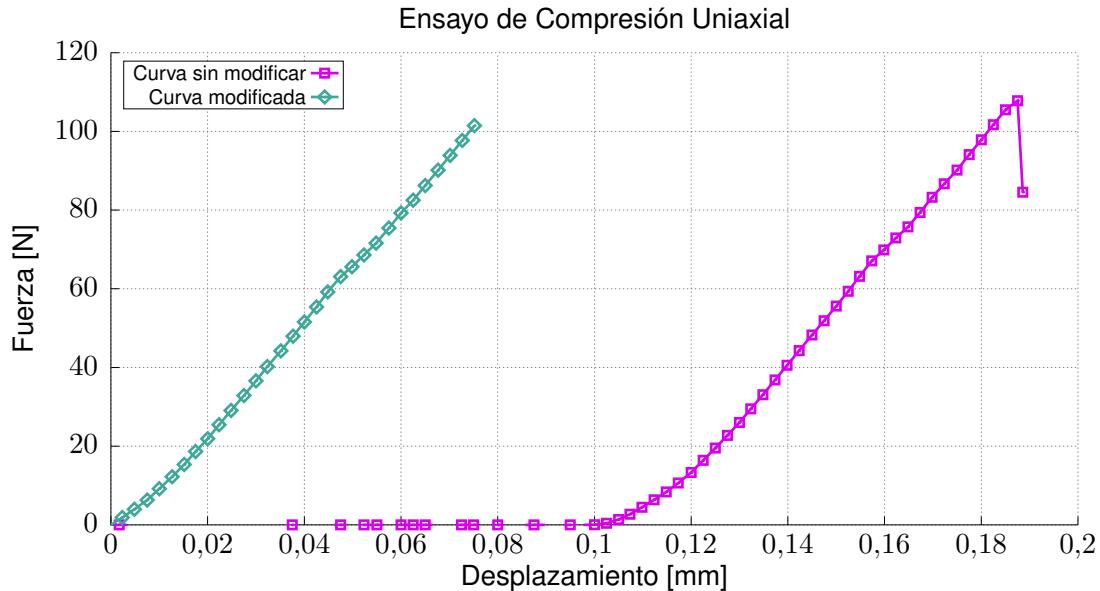


Figura A.1. Curva de compresión uniaxial sin modificar (otorgada por la máquina de ensayos universales Instron 334) y con modificaciones. Esta última con el fin de obtener las propiedades mecánicas del material desecharando datos innecesarios

Se observa en la figura A.1 que la curva sin modificar presenta una zona en que la fuerza posee un valor nulo, esto es debido a que el ensayo de compresión se realiza sin un contacto inicial con la probeta, con el fin de evitar datos erróneos por un ajuste anterior. Esto se soluciona restando el desplazamiento y fuerza de todos los valores siguientes al punto en que se capta una fuerza no nula, obteniendo una curva que inicie en el origen. Además, no se presenta plastificación en su comportamiento, por lo que en el último tramo de la curva sin modificar se observa una caída en el valor de la fuerza, efecto representativo en los materiales frágiles, justamente el mismo que se definió para este material (sección 2.8).

El valor puntual de la fuerza captada es dividido entre el área transversal (A) de cada probeta ($\sigma = F/A$). Para la deformación se considera la diferencia instantánea del largo (ΔL) de la probeta dividida por el largo inicial (L_0) de ésta ($\varepsilon = \Delta L/L_0$). De esta forma se obtiene la curva representativa del esfuerzo y deformación ingenieril (fig. A.2).

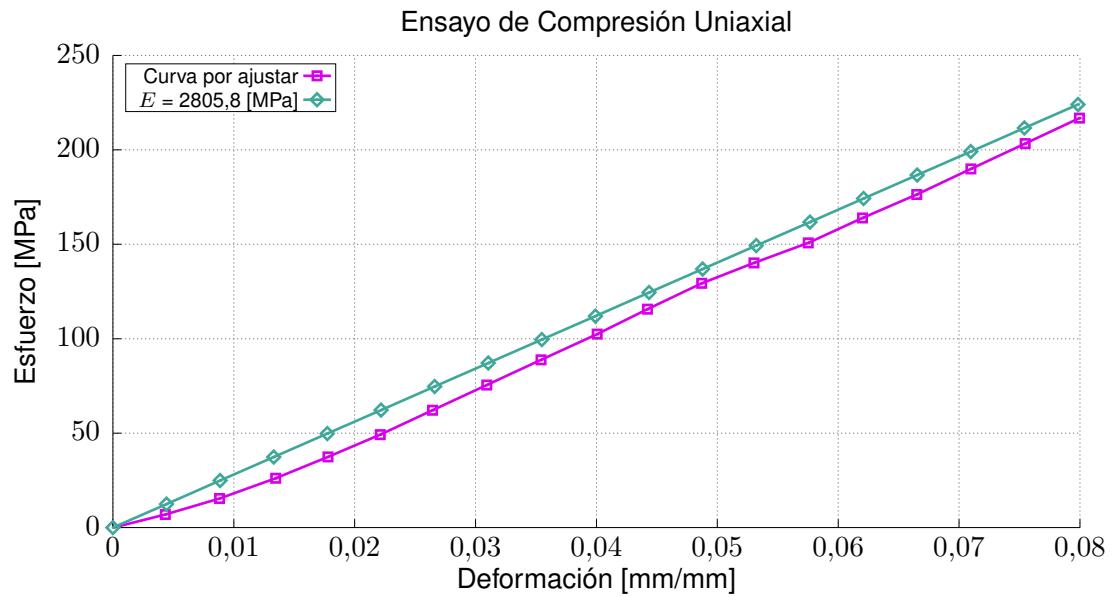


Figura A.2. Curva de esfuerzo contra deformación ingenieril del ensayo de compresión uniaxial junto a su ajuste lineal

Considerando el material con comportamiento frágil, es posible indicar que el esfuerzo más alto hasta la fractura sin plastificar es el esfuerzo último, por lo que los valores últimos en este trabajo se denominan esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ε_{max}).

Finalmente, se obtiene el módulo elástico ($E = 2805,8$ [MPa] para este caso en particular) mediante una regresión lineal simple (fig. A.2).

A.2. Flexo-compresión

En la sección 4.2.3 se presentan los resultados generales del ensayo de flexo-compresión (otros detalles en la sección 3.4.2). En este apartado se explica la forma en que se modifica la curva entregada por la máquina de ensayos universales Instron 3342. Esto se realiza con el fin de obtener las propiedades estructurales de la valva: Rigidez bajo la solicitación de flexo-compresión (K), Fuerza máxima soportada por la valva antes de la fractura (F_{max}) y desplazamiento máximo de la zona más alta de la concha antes de la fractura (d_{max}). Además, considerando la gran cantidad de ensayos (capítulo 3), sólo se presenta una curva representativa del proceso.

La máquina Instron 3342 posee una celda de carga (fig. ??) con la capacidad de captar la fuerza ejercida por el punzón. Por lo tanto, este instrumento otorga una curva representativa de fuerza contra desplazamiento del punzón (fig. A.3).

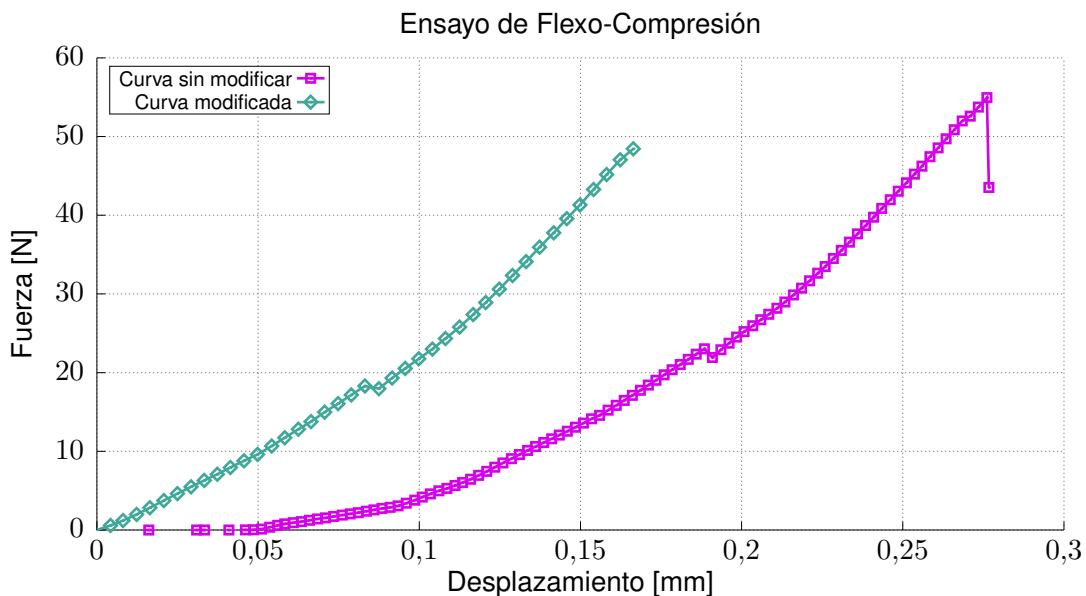


Figura A.3. Curva de flexo-compresión sin modificar (otorgada por la máquina de ensayos universales Instron 334) y con modificaciones. Esta última con el fin de obtener las propiedades estructurales del material desecharando datos innecesarios

Se observa en la figura A.3 que la curva sin modificar presenta una zona en que la fuerza posee un valor nulo, esto es debido a que el ensayo de flexo-compresión se realiza sin un contacto inicial con la concha, con el fin de evitar datos erróneos por un ajuste anterior. Esto se soluciona restando el desplazamiento y fuerza de todos los valores siguientes al punto en que se capta una fuerza no nula, obteniendo una curva que inicie en el origen. Además se observa que, al contrario del ensayo de compresión uniaxial (apéndice A.1), la curvatura persiste aunque la fuerza ya no sea nula. Esto es debido a que, a pesar que la concha posee un material elástico lineal, una gran cantidad de ensayos presentan una curvatura en su inicio provocado por un acomodamiento de la valva, es decir, la base utilizada para la flexo-compresión no logra frenar el efecto de fricción de forma rigurosa. Este efecto es llamado **acomodamiento en compresión** en el presente trabajo. Además, considerando que el material de la valva es frágil, se observa una caída en el valor de la fuerza en el último tramo de la curva sin modificar, el cual indica el momento en que el ensayo ha terminado.

Finalmente, mediante una regresión lineal simple (fig. A.4), se obtiene la rigidez de la valva bajo las solicitudes del ensayo ($K = 287,7$ [N/mm] para este caso en particular), junto a la fuerza máxima y desplazamiento máximo soportado antes de la fractura (F_{max} y d_{max}) de la concha. Esto es considerado en en análisis de las simulaciones numéricas mediante **MEF** (sección 5.6), debido a que tales simulaciones se centran en este ensayo.

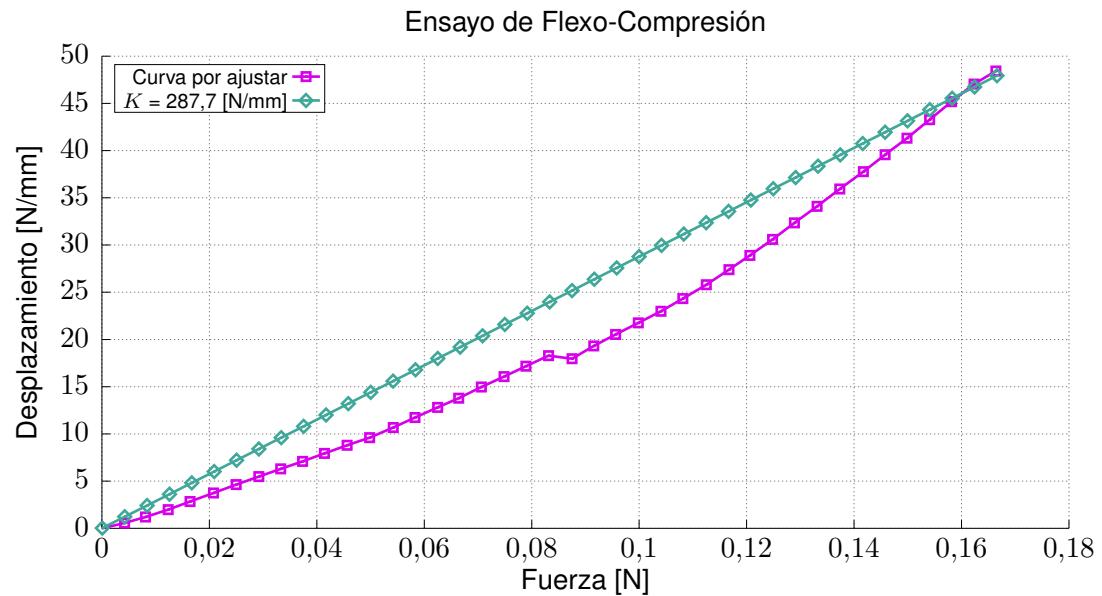


Figura A.4. Curva de fuerza contra desplazamiento del ensayo de flexo-compresión junto a su ajuste lineal

Apéndice B

Complementos de simulaciones numéricas

B.1. Superficies parametrizadas

En la sección 5.3.3.2 se detalla a cabalidad el proceso del ajuste de la superficie paramétrica $\Gamma : s(u, v)$ a una nube de puntos mediante la librería *PCL* [141]. A continuación se presentan las superficies ajustadas a cada una de las 5 valvas utilizadas en la simulación numérica mediante **MEF** (sección 5.2):

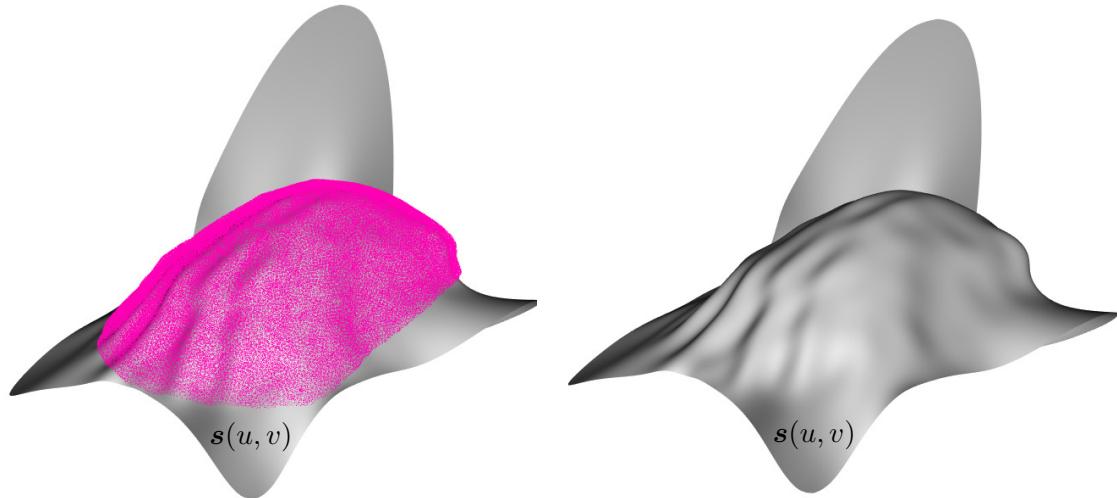


Figura B.1. Ajuste de la superficie paramétrica a los baricentros de la valva de tamaño 1

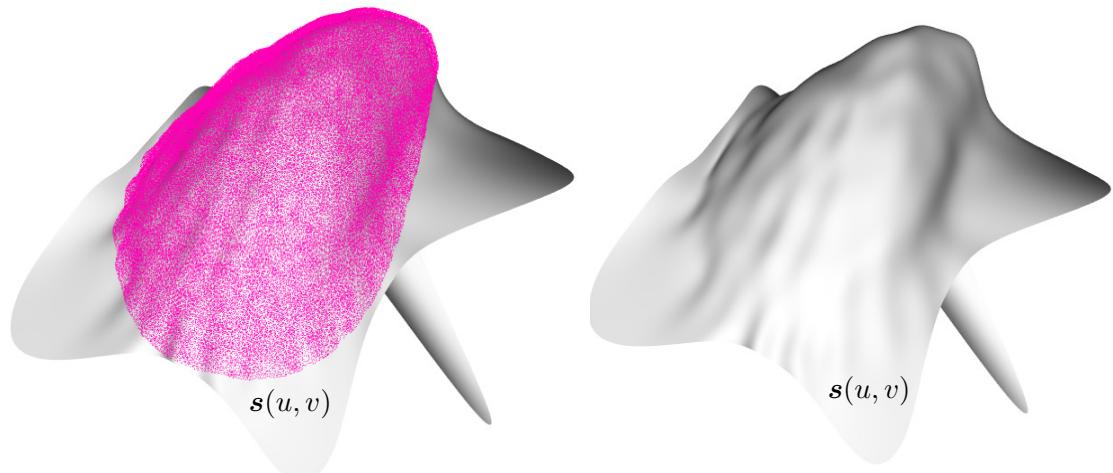


Figura B.2. Ajuste de la superficie paramétrica a los baricentros de la valva de tamaño 2

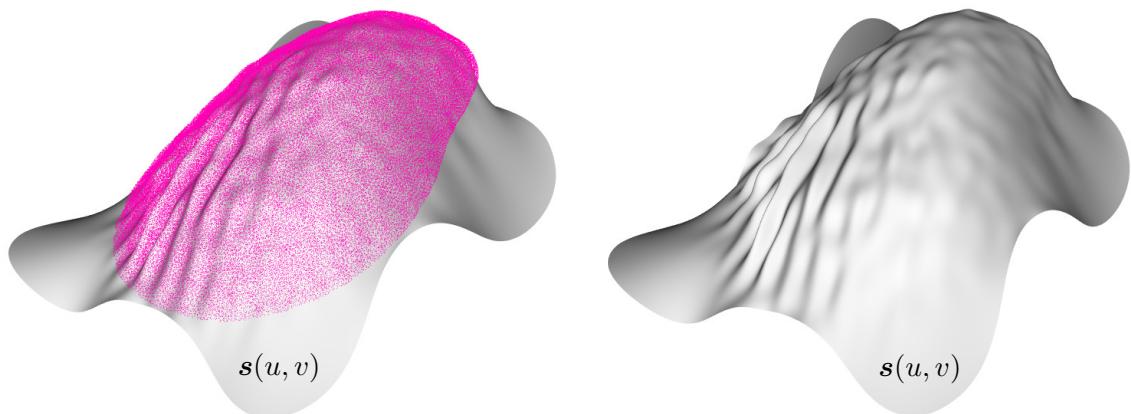


Figura B.3. Ajuste de la superficie paramétrica a los baricentros de la valva de tamaño 3

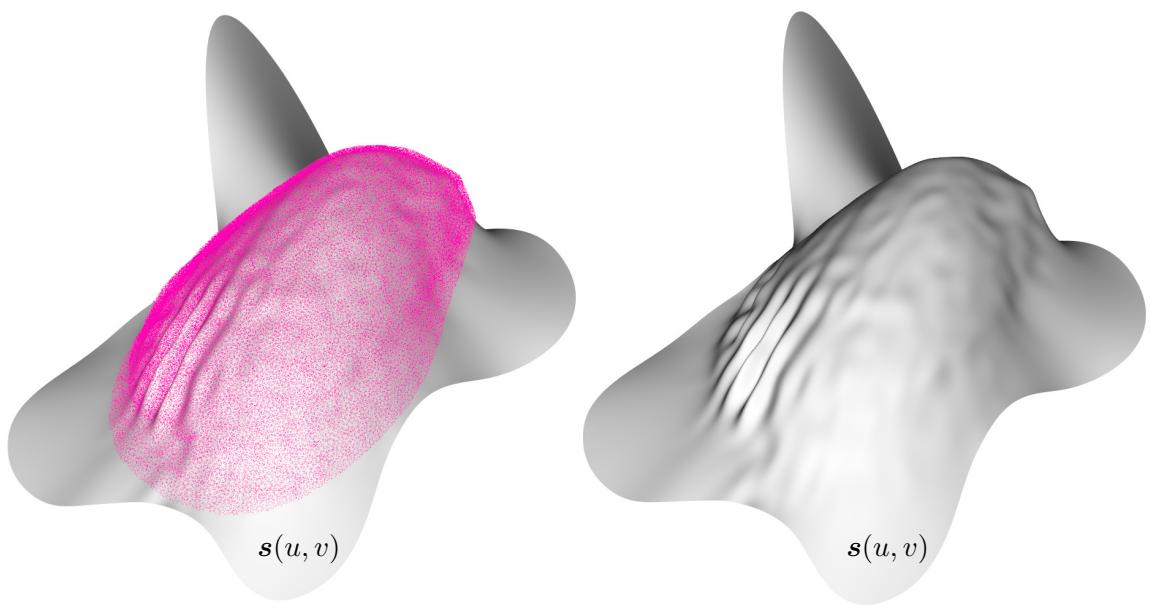


Figura B.4. Ajuste de la superficie paramétrica a los baricentros de la valva de tamaño 4

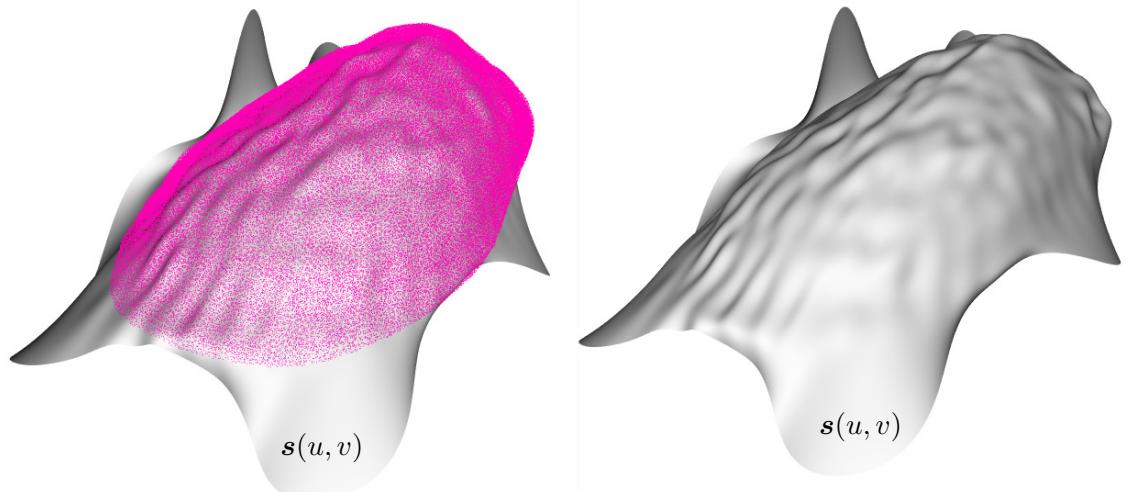


Figura B.5. Ajuste de la superficie paramétrica a los baricentros de la valva de tamaño 5

B.2. Valor del penalizador lineal para efectos de contacto

En la sección 5.5 se detalla el procedimiento de la simulación numérica, en el cual se presentan las 3 fases diseñadas para su funcionamiento. Este apartado se centra en la fase 3 (sección 5.5.3), en ella se utiliza un penalizador lineal de 100.000 [N/mm³] para cada una de las 5 simulaciones en los contactos valva-pared y valva-base. A continuación se presentan las curvas representativa de las iteraciones que fueron necesarias para seleccionar dicho valor mediante distintos valores del penalizador lineal. Cabe señalar que estas simulaciones se realizaron considerando el efecto de roce en paredes y base.

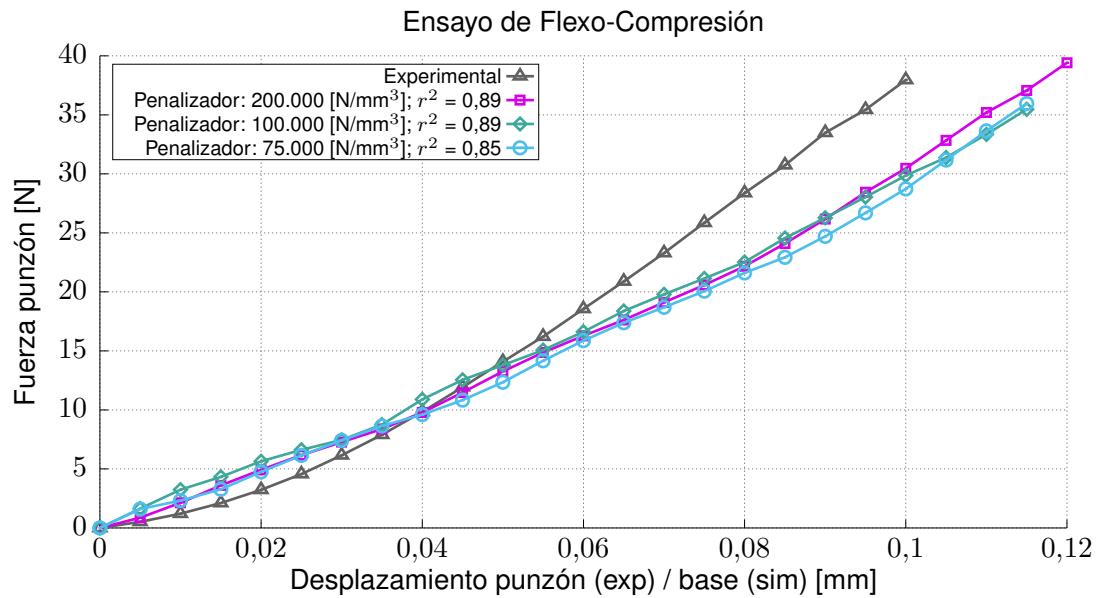


Figura B.6. Curvas con distintos valores de penalizador lineal para el tamaño 1

En la figura B.6 se observa que no existe variación del coeficiente de correlación (r^2) a partir del valor 100.000 [N/mm³] para el penalizador lineal.

B.3. Variación de curva de simulación con y sin roce con distintos coeficientes

En los resultados de las simulaciones (sección 5.6) se detalla que el coeficiente de fricción utilizado para cada una corresponde a 0,5. Para obtener tal resultado se realizaron 4 simulaciones con coeficientes de 0,3, 0,5, 0,7 y una simulación sin roce para el tamaño 2. Dado que no hubo diferencias entre 0,5 y 0,7 para el coeficiente de correlación (r^2), se decide por 0,5 para evitar fallos en la simulación (fig. B.7). Esto entonces se aplica para cada simulación numérica mediante **MEF**.

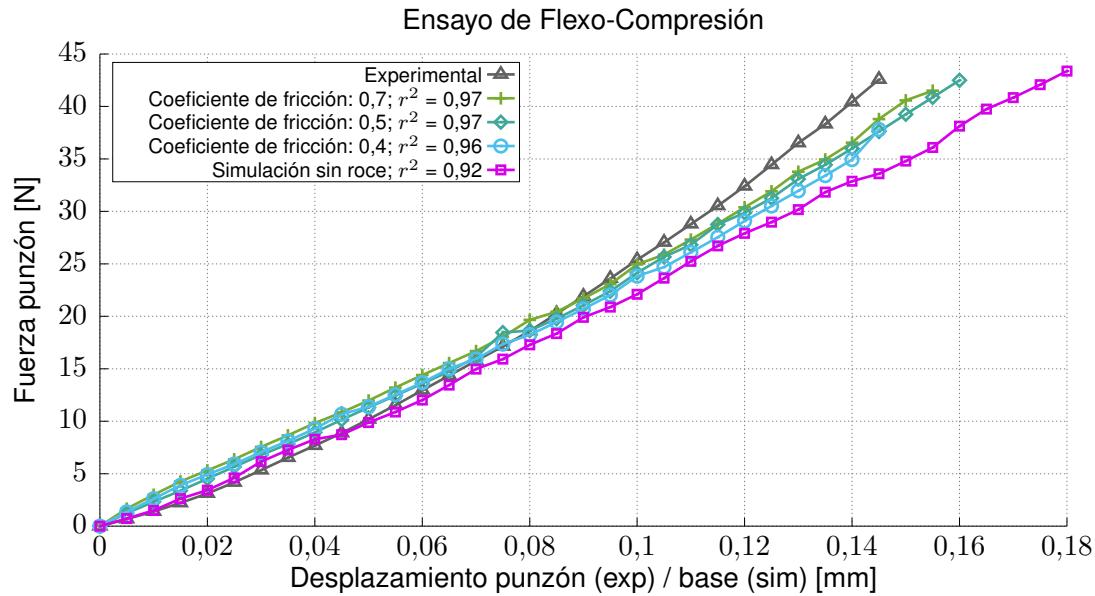


Figura B.7. Curvas con y sin roce en el punzón para el tamaño 2

Se observa que la mayor diferencia radica en considerar o no roce, ya que al aumentar su coeficiente la curva no presenta mayores ventajas.

B.4. Variación de curva de simulación con y sin roce en el contacto del punzón

En los resultados de las simulaciones (sección 5.6) se detalla que no hubo consideración de roce entre los contactos valva-punzón. Esto se debe a que al añadir la fricción en el objeto de contacto del punzón no se presentaron grandes diferencias en el coeficiente de correlación (r^2). Esto se observa en la figura B.8, en la cual se realizó una simulación con y sin roce para el tamaño 1 en el punzón, por lo que no se consideró este efecto para los demás tamaños para cada simulación numérica mediante MEF.

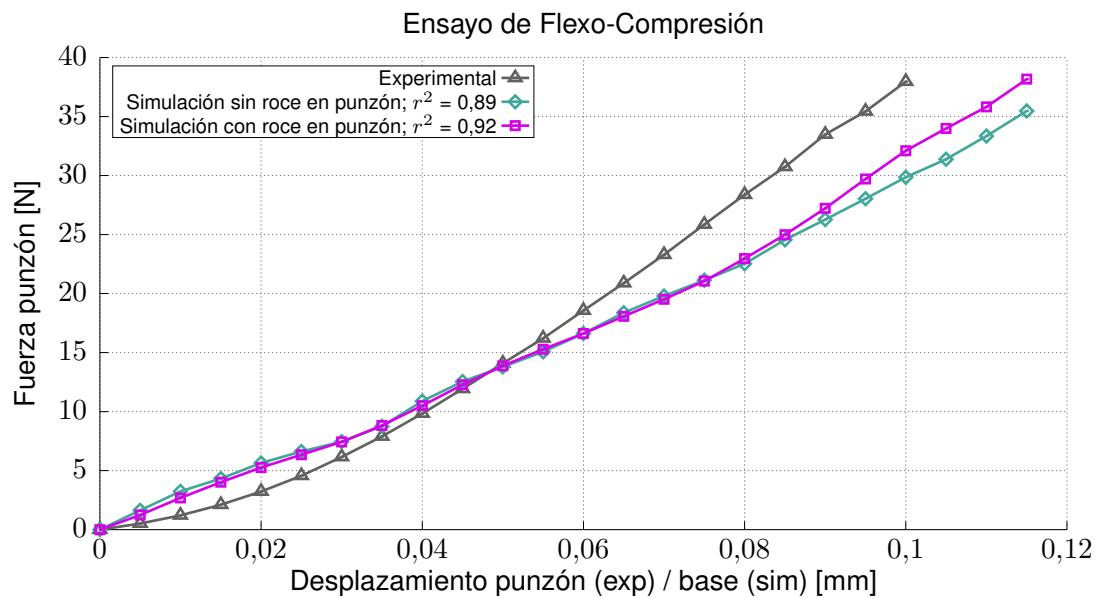


Figura B.8. Curvas con y sin roce en el punzón para el tamaño 1