



Trabajo de titulación

Caracterización de la biomecánica del crecimiento y remodelación del *Perumytilus purpuratus* cultivados en condiciones de crecimiento natural

Estefano Matías Muñoz Moya

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.

Profesor guía: Claudio García Herrera
Profesores correctores:

- Alejandro Gutiérrez Silva
- Nelson Lagos Suárez
- Roberto Ortega Aguilera

e-mail: estefano.munoz@usach.cl
WebPage: <https://estefano23.github.io/>

22 de abril de 2021

Índice

- 1 Introducción
- 2 Objetivos
- 3 Ensayos Experimentales
 - Compresión Uniaxial
 - Flexo-Compresión
- 4 Resultados
 - Característica de falla
 - Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)
- 5 Simulaciones numéricas
 - Direcciones ortótropas
 - Condiciones y procedimiento de la simulación
 - Resultados de la simulación
- 6 Conclusiones
- 7 Principales líneas de trabajo futuras
- 8 Referencias

Índice

- 1 **Introducción**
- 2 **Objetivos**
- 3 **Ensayos Experimentales**
 - **Compresión Uniaxial**
 - **Flexo-Compresión**
- 4 **Resultados**
 - **Característica de falla**
 - **Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)**
- 5 **Simulaciones numéricas**
 - **Direcciones ortótropas**
 - **Condiciones y procedimiento de la simulación**
 - **Resultados de la simulación**
- 6 **Conclusiones**
- 7 **Principales líneas de trabajo futuras**
- 8 **Referencias**

Introducción

Producción industrial acuícola en Chile y los factores adversos a los que está sometida

- Dependencia del estado del ecosistema donde las especies a comercializar habitan.
- Emisiones de CO₂ alteran el pH del agua y su concentración de carbono
- Impacto negativo en la acuicultura Chilena y sustentabilidad socioeconómica del norte de Chile [1].

Funcionalidad de la concha de carbonato de calcio

- La concha de carbonato de los mejillones protege las partes blandas del cuerpo.
- Propiedades biomecánicas mantienen integridad y funcionalidad.
- El *Perumytilus purpuratus* está sometido a un relevante estrés mecánico [5, 6].
- Sus matrices constituyen un microhábitat para una gran variedad de organismos, promoviendo así efectos significativos sobre la biodiversidad costera en hábitats intermareales [3].

Motivación

Nuevas líneas de investigación que relacione:

- Biomecánica
- Industria acuícola y alertas tempranas
- Conservación de la especie y enfatizar en la simetría, homogeneidad y remodelación

Introducción

Producción industrial acuícola en Chile y los factores adversos a los que está sometida

- Dependencia del estado del ecosistema donde las especies a comercializar habitan.
- Emisiones de CO₂ alteran el pH del agua y su concentración de carbono
- Impacto negativo en la acuicultura Chilena y sustentabilidad socioeconómica del norte de Chile [1].

Funcionalidad de la concha de carbonato de calcio

- La concha de carbonato de los mejillones protege las partes blandas del cuerpo.
- Propiedades biomecánicas mantienen integridad y funcionalidad.
- El *Perumytilus purpuratus* está sometido a un relevante estrés mecánico [5, 6].
- Sus matrices constituyen un microhábitat para una gran variedad de organismos, promoviendo así efectos significativos sobre la biodiversidad costera en hábitats intermareales [3].

Motivación

Nuevas líneas de investigación que relacione:

- Biomecánica
- Industria acuícola y alertas tempranas
- Conservación de la especie y enfatizar en la simetría, homogeneidad y remodelación

Introducción

Producción industrial acuícola en Chile y los factores adversos a los que está sometida

- Dependencia del estado del ecosistema donde las especies a comercializar habitan.
- Emisiones de CO₂ alteran el pH del agua y su concentración de carbono
- Impacto negativo en la acuicultura Chilena y sustentabilidad socioeconómica del norte de Chile [1].

Funcionalidad de la concha de carbonato de calcio

- La concha de carbonato de los mejillones protege las partes blandas del cuerpo.
- Propiedades biomecánicas mantienen integridad y funcionalidad.
- El *Perumytilus purpuratus* está sometido a un relevante estrés mecánico [5, 6].
- Sus matrices constituyen un microhábitat para una gran variedad de organismos, promoviendo así efectos significativos sobre la biodiversidad costera en hábitats intermareales [3].

Motivación

Nuevas líneas de investigación que relacione:

- Biomecánica
- Industria acuícola y alertas tempranas
- Conservación de la especie y enfatizar en la simetría, homogeneidad y remodelación

Introducción

Producción industrial acuícola en Chile y los factores adversos a los que está sometida

- Dependencia del estado del ecosistema donde las especies a comercializar habitan.
- Emisiones de CO₂ alteran el pH del agua y su concentración de carbono
- Impacto negativo en la acuicultura Chilena y sustentabilidad socioeconómica del norte de Chile [1].

Funcionalidad de la concha de carbonato de calcio

- La concha de carbonato de los mejillones protege las partes blandas del cuerpo.
- Propiedades biomecánicas mantienen integridad y funcionalidad.
- El *Perumytilus purpuratus* está sometido a un relevante estrés mecánico [5, 6].
- Sus matrices constituyen un microhábitat para una gran variedad de organismos, promoviendo así efectos significativos sobre la biodiversidad costera en hábitats intermareales [3].

Motivación

Nuevas líneas de investigación que relacione:

- Biomecánica
- Industria acuícola y alertas tempranas
- Conservación de la especie y enfatizar en la simetría, homogeneidad y remodelación

Índice

- 1 Introducción
- 2 **Objetivos**
- 3 Ensayos Experimentales
 - Compresión Uniaxial
 - Flexo-Compresión
- 4 Resultados
 - Característica de falla
 - Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)
- 5 Simulaciones numéricas
 - Direcciones ortótropas
 - Condiciones y procedimiento de la simulación
 - Resultados de la simulación
- 6 Conclusiones
- 7 Principales líneas de trabajo futuras
- 8 Referencias

Objetivos

Objetivo general

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

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización biomecánica del material y estructura de la concha del *P. purpuratus*.
- Analizar las propiedades mecánicas:
 - Simetría.
 - Homogeneidad.
 - Remodelación
- Evaluar la característica de falla del material.
- Corroborar el modelo propuesto del material mediante simulaciones numéricas.

Objetivos

Objetivo general

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

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización biomecánica del material y estructura de la concha del *P. purpuratus*.
- Analizar las propiedades mecánicas:
 - Simetría.
 - Homogeneidad.
 - Remodelación
- Evaluar la característica de falla del material.
- Corroborar el modelo propuesto del material mediante simulaciones numéricas.

Objetivos

Objetivo general

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

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización biomecánica del material y estructura de la concha del *P. purpuratus*.
- Analizar las propiedades mecánicas:
 - Simetría.
 - Homogeneidad.
 - Remodelación
- Evaluar la característica de falla del material.
- Corroborar el modelo propuesto del material mediante simulaciones numéricas.

Objetivos

Objetivo general

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

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización biomecánica del material y estructura de la concha del *P. purpuratus*.
- Analizar las propiedades mecánicas:
 - Simetría.
 - Homogeneidad.
 - Remodelación
- Evaluar la característica de falla del material.
- Corroborar el modelo propuesto del material mediante simulaciones numéricas.

Objetivos

Objetivo general

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

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización biomecánica del material y estructura de la concha del *P. purpuratus*.
- Analizar las propiedades mecánicas:
 - Simetría.
 - Homogeneidad.
 - Remodelación
- Evaluar la característica de falla del material.
- Corroborar el modelo propuesto del material mediante simulaciones numéricas.

Objetivos

Objetivo general

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

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización biomecánica del material y estructura de la concha del *P. purpuratus*.
- Analizar las propiedades mecánicas:
 - Simetría.
 - Homogeneidad.
 - Remodelación
- Evaluar la característica de falla del material.
- Corroborar el modelo propuesto del material mediante simulaciones numéricas.

Índice

- 1 Introducción
- 2 Objetivos
- 3 **Ensayos Experimentales**
 - Compresión Uniaxial
 - Flexo-Compresión
- 4 Resultados
 - Característica de falla
 - Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)
- 5 Simulaciones numéricas
 - Direcciones ortótropas
 - Condiciones y procedimiento de la simulación
 - Resultados de la simulación
- 6 Conclusiones
- 7 Principales líneas de trabajo futuras
- 8 Referencias

Simetría, homogeneidad y remodelación de la concha del *P. purpuratus*

- Estudios biomecánicos de valvas sin corroborar simetría, homogeneidad y remodelación [7, 8, 9, 10].
- Estudio material: Compresión uniaxial en tres ejes de ortotropía de microestructura nacarada [11].
- 15 individuos de *P. purpuratus* recolectados de Huasco, divididos en 5 grupos de tamaño distinto.
- 270 ensayos de compresión uniaxial.

Cuadro 1: Valor de la media y error estándar muestral (SEM): largo, alto, ancho, espesor, peso valva izquierda y peso valva derecha.

Grupo	Largo [mm]	Alto [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Peso valva izquierda [g]	Peso valva derecha [g]
1	14,42 ± 0,30	6,55 ± 0,14	7,67 ± 0,40	0,40 ± 0,03	0,15 ± 0,01	0,15 ± 0,01
2	19,92 ± 0,44	10,55 ± 0,65	10,70 ± 0,44	0,47 ± 0,05	0,37 ± 0,03	0,38 ± 0,02
3	26,18 ± 0,64	11,77 ± 0,60	14,15 ± 0,80	0,59 ± 0,06	0,83 ± 0,11	0,82 ± 0,11
4	32,44 ± 1,30	15,13 ± 0,51	14,96 ± 0,23	0,79 ± 0,03	1,57 ± 0,15	1,60 ± 0,21
5	37,55 ± 1,61	18,46 ± 0,60	16,76 ± 0,32	0,72 ± 0,03	2,71 ± 0,02	2,77 ± 0,08

Simetría, homogeneidad y remodelación de la concha del *P. purpuratus*

- Estudios biomecánicos de valvas sin corroborar simetría, homogeneidad y remodelación [7, 8, 9, 10].
- Estudio material: Compresión uniaxial en tres ejes de ortotropía de microestructura nacarada [11].
- 15 individuos de *P. purpuratus* recolectados de Huasco, divididos en 5 grupos de tamaño distinto.
- 270 ensayos de compresión uniaxial.

Cuadro 1: Valor de la media y error estándar muestral (SEM): largo, alto, ancho, espesor, peso valva izquierda y peso valva derecha.

Grupo	Largo [mm]	Alto [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Peso valva izquierda [g]	Peso valva derecha [g]
1	14,42 ± 0,30	6,55 ± 0,14	7,67 ± 0,40	0,40 ± 0,03	0,15 ± 0,01	0,15 ± 0,01
2	19,92 ± 0,44	10,55 ± 0,65	10,70 ± 0,44	0,47 ± 0,05	0,37 ± 0,03	0,38 ± 0,02
3	26,18 ± 0,64	11,77 ± 0,60	14,15 ± 0,80	0,59 ± 0,06	0,83 ± 0,11	0,82 ± 0,11
4	32,44 ± 1,30	15,13 ± 0,51	14,96 ± 0,23	0,79 ± 0,03	1,57 ± 0,15	1,60 ± 0,21
5	37,55 ± 1,61	18,46 ± 0,60	16,76 ± 0,32	0,72 ± 0,03	2,71 ± 0,02	2,77 ± 0,08

Análisis del crecimiento de la concha del *P. purpuratus*

- Caracterización biomecánica material y estructural.
- Procedimiento de cultivo de *P. purpuratus* por tres meses en las costas de Quintay [12, 13, 14].
- 125 individuos de *P. purpuratus* divididos en 5 grupos de tamaño distinto; se utiliza la valva derecha para el estudio material, y la izquierda para el estudio estructural.

Cuadro 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

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

Análisis del crecimiento de la concha del *P. purpuratus*

- Caracterización biomecánica material y estructural.
- Procedimiento de cultivo de *P. purpuratus* por tres meses en las costas de Quintay [12, 13, 14].
- 125 individuos de *P. purpuratus* divididos en 5 grupos de tamaño distinto; se utiliza la valva derecha para el estudio material, y la izquierda para el estudio estructural.

Cuadro 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

Grupo	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

Compresión Uniaxial

- Direcciones ortótropas del material: espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t).
- Se obtiene fuerza y desplazamiento
- Se calculan las propiedades mecánicas: módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}) y deformación máxima (ϵ_{max}).

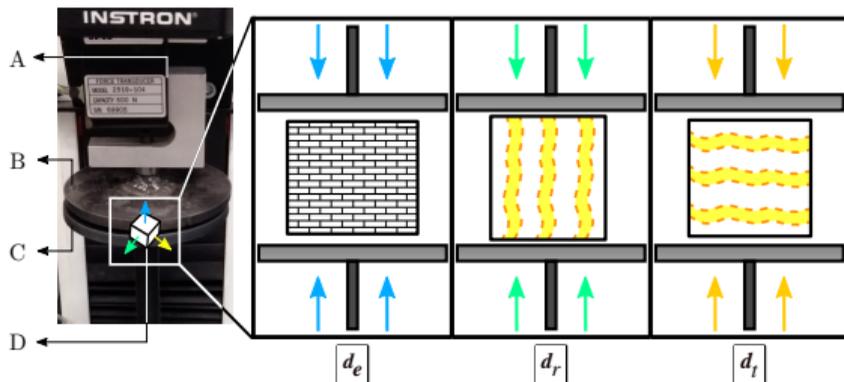


Figura 2: A: Celda de carga, B: Placa móvil, C: Placa fija, D: Probeta.

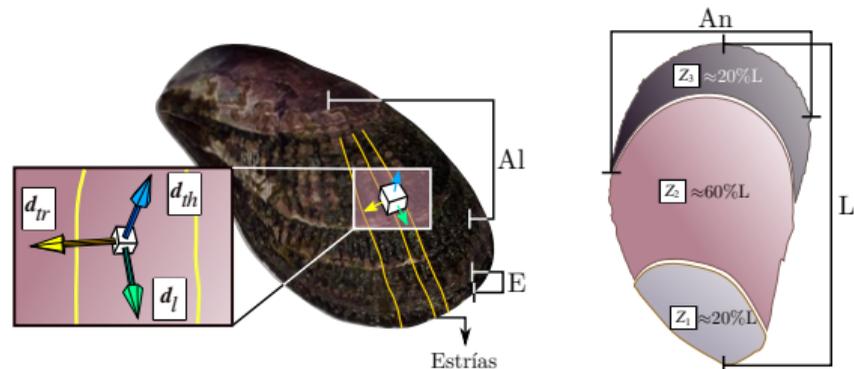


Figura 1: Zonas de valva derecha, zona 1 (Z_1), zona 2 (Z_2) y zona 3 (Z_1). An: Ancho, L: Largo, Al: Alto, E: Espesor.

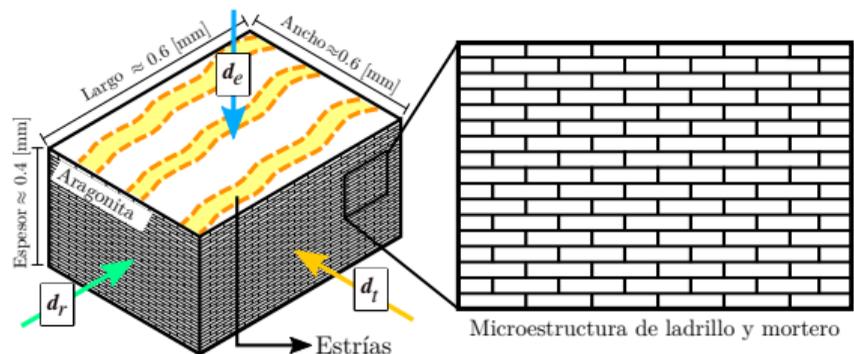


Figura 3: Probeta y direcciones de ortotropía del material: Dirección Espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t).

Flexo-Compresión

- Base diseñada y manufacturada por [Abarca](#) en su tesis de pre-grado [15].
- La concha se confina entre cuatro paredes.
- Fuerza máxima (F_{max}) y desplazamiento máximo (d_{max}) soportado por la concha, además de la rigidez bajo esta sollicitación (K).

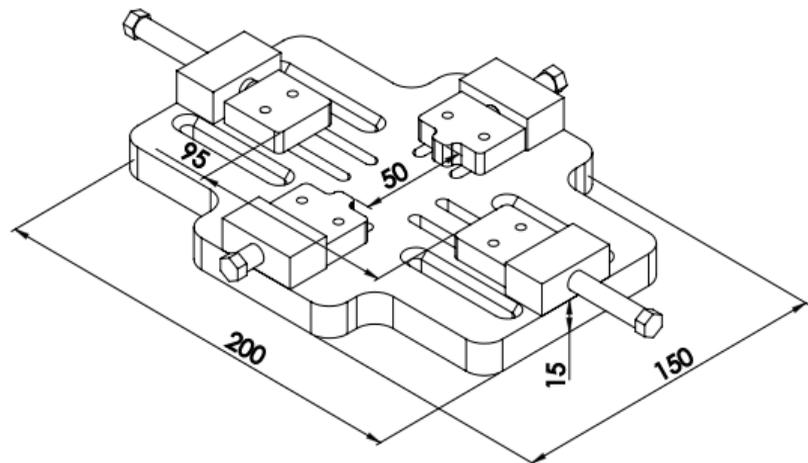


Figura 4: Base utilizada en el ensayo de flexo-compresión. Dimensiones en milímetros.

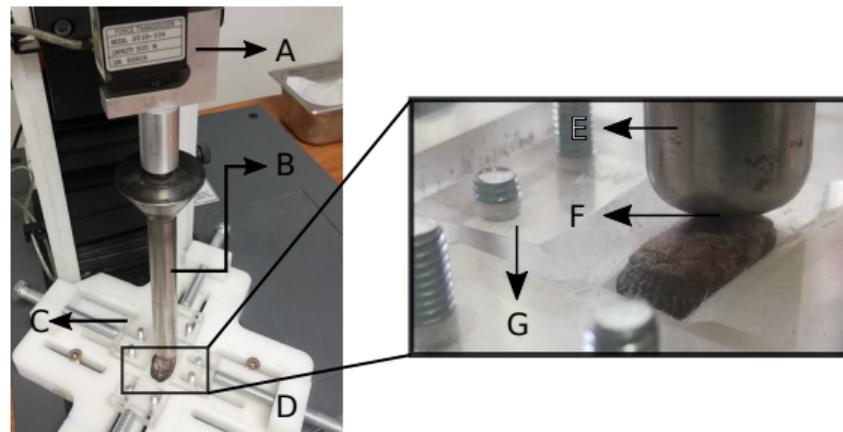


Figura 5: Ensayo de flexo-compresión montado en Instron 3342. A: Celda de carga, B: Punzón, C: Base de ensayo, D: Valva montada, E: Punzón, F: Punto más alto de la valva en contacto con punzón, G: Pared de confinamiento.

Índice

- 1 Introducción
- 2 Objetivos
- 3 Ensayos Experimentales
 - Compresión Uniaxial
 - Flexo-Compresión
- 4 **Resultados**
 - Característica de falla
 - Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)
- 5 Simulaciones numéricas
 - Direcciones ortótropas
 - Condiciones y procedimiento de la simulación
 - Resultados de la simulación
- 6 Conclusiones
- 7 Principales líneas de trabajo futuras
- 8 Referencias

Resultados

Cuadro 3: ANCOVA para Módulo elástico (E), esfuerzo máximo (σ_{max}), y deformación máxima (ε_{max}). El Grosor (G) [mm] de la concha fue utilizado como covariable. 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.

Fuente de variación	Módulo elástico (E)				Esfuerzo máximo (σ_{max})				Deformación máxima (ε_{max})			
	GL	SC	F	p	GL	SC	F	p	GL	SC	F	p
Espesor (E)	1; 179	8482661	36,85	<0,001	1; 179	116753	21,82	<0,001	1;179	0,010349	1,69	0,195
Tamaño (T)	4; 179	2231018	9,69	<0,001	4; 179	35405	6,62	<0,001	4; 179	0,012374	2,03	0,093
Valva izq-der (V)	1; 179	392566	1,71	0,193	1; 179	11361	2,12	0,147	1; 179	0,015988	2,62	0,107
Zona (Z)	2; 179	429319	1,87	0,158	2; 179	1069	0,2	0,819	2; 179	0,006161	1,01	0,36
Dirección (d)	2; 179	39192966	170,27	<0,001	2; 179	25728	4,81	0,009	2; 179	0,940001	153,96	0,001
$T \times V$	4; 179	182587	0,79	0,531	4; 179	2473	0,46	0,763	4; 179	0,003177	0,52	0,721
$T \times Z$	8; 179	109154	0,47	0,873	8; 179	8699	1,63	0,120	8; 179	0,009423	1,54	0,145
$T \times d$	8; 179	183583	0,8	0,605	8; 179	8992	1,68	0,106	8; 179	0,020345	3,33	0,001
$V \times Z$	2; 179	118832	0,52	0,598	2; 179	2086	0,39	0,678	2; 179	0,003939	0,65	0,526
$V \times d$	2; 179	71727	0,31	0,733	2; 179	11000	2,06	0,131	2; 179	0,019201	3,14	0,045
$Z \times d$	4; 179	351214	1,53	0,197	4; 179	9821	1,84	0,124	4; 179	0,00546	0,89	0,469
$T \times V \times Z$	8; 179	22719	0,1	0,999	8; 179	2460	0,46	0,883	8; 179	0,003062	0,5	0,854
$T \times V \times d$	8; 179	91868	0,4	0,920	8; 179	4409	0,82	0,583	8; 179	0,009067	1,49	0,165
$T \times Z \times d$	16; 179	205562	0,89	0,578	16; 179	4794	0,9	0,575	16; 179	0,00628	1,03	0,429
$V \times Z \times d$	4; 179	245962	1,07	0,374	4; 179	5454	1,02	0,399	4; 179	0,00171	0,28	0,891
$T \times V \times Z \times d$	16; 179	73345	0,32	0,995	16; 179	4585	0,86	0,620	16; 179	0,003485	0,57	0,903

Resultados ANCOVA y Post Hoc de Tukey de la caracterización material

- $d_r = d_t \neq d_e$.
- ✓ Simetría de valvas.
- ✓ Homogeneidad.
- ✓ Remodelación en d_e
- ✗ Remodelación en d_r y d_t .

- Compresión uniaxial: figura 7.

- Flexo-Compresión: figura 6.

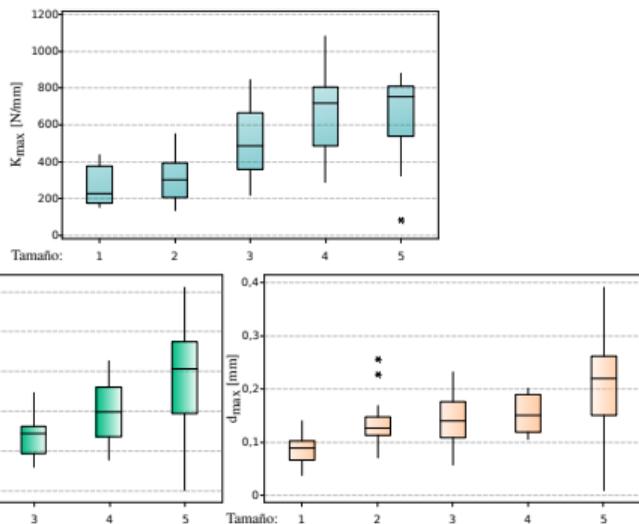


Figura 6: Rigidez (K), Fuerza máxima (F_{max}) y desplazamiento máximo (d_{max}) del punzón sobre la valva izquierda de *P. purpuratus* para 5 rangos de tamaños corporales. (*): valores extremos de la distribución

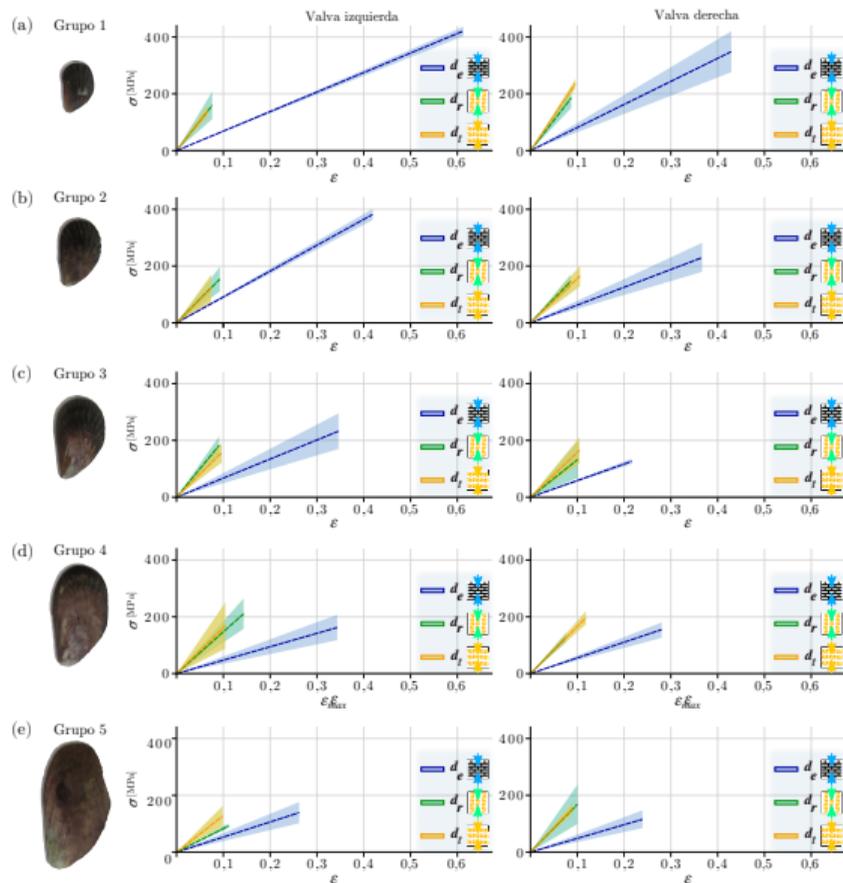


Figura 7: Desviación estándar (SD) de la curva esfuerzo-deformación.

Característica de falla

- El tipo de falla depende de la dirección. $d_r = d_t \neq d_e$.
- La dirección d_e se rompe en pedazos o pulveriza.
- Las direcciones d_r y d_t sufren una aparente delaminación.
- Mismo efecto en ensayo de flexo-compresión.
- Fractura tortuosa [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23].

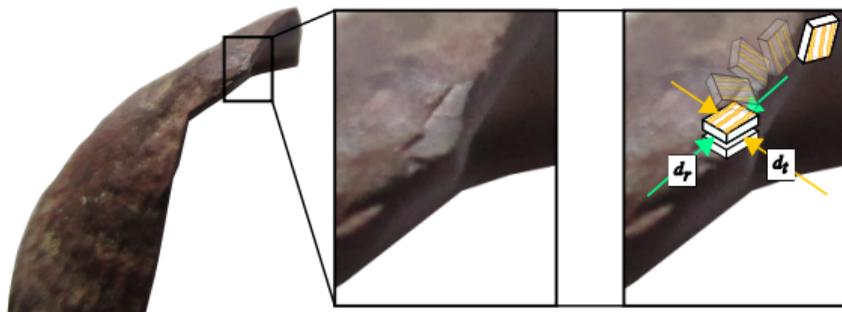


Figura 8: Desprendimiento del material de la valva después de ser sometido al ensayo de flexo-compresión

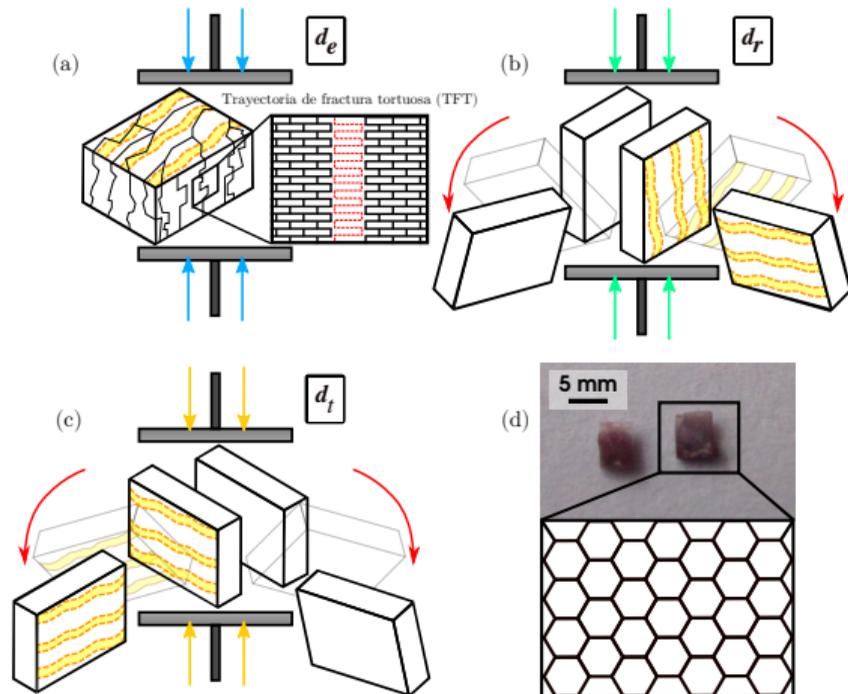


Figura 9: Característica de fallo de la muestra al final del ensayo de compresión uniaxial en las direcciones de espesor (d_e), radial (d_r) y tangencial (d_t).

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

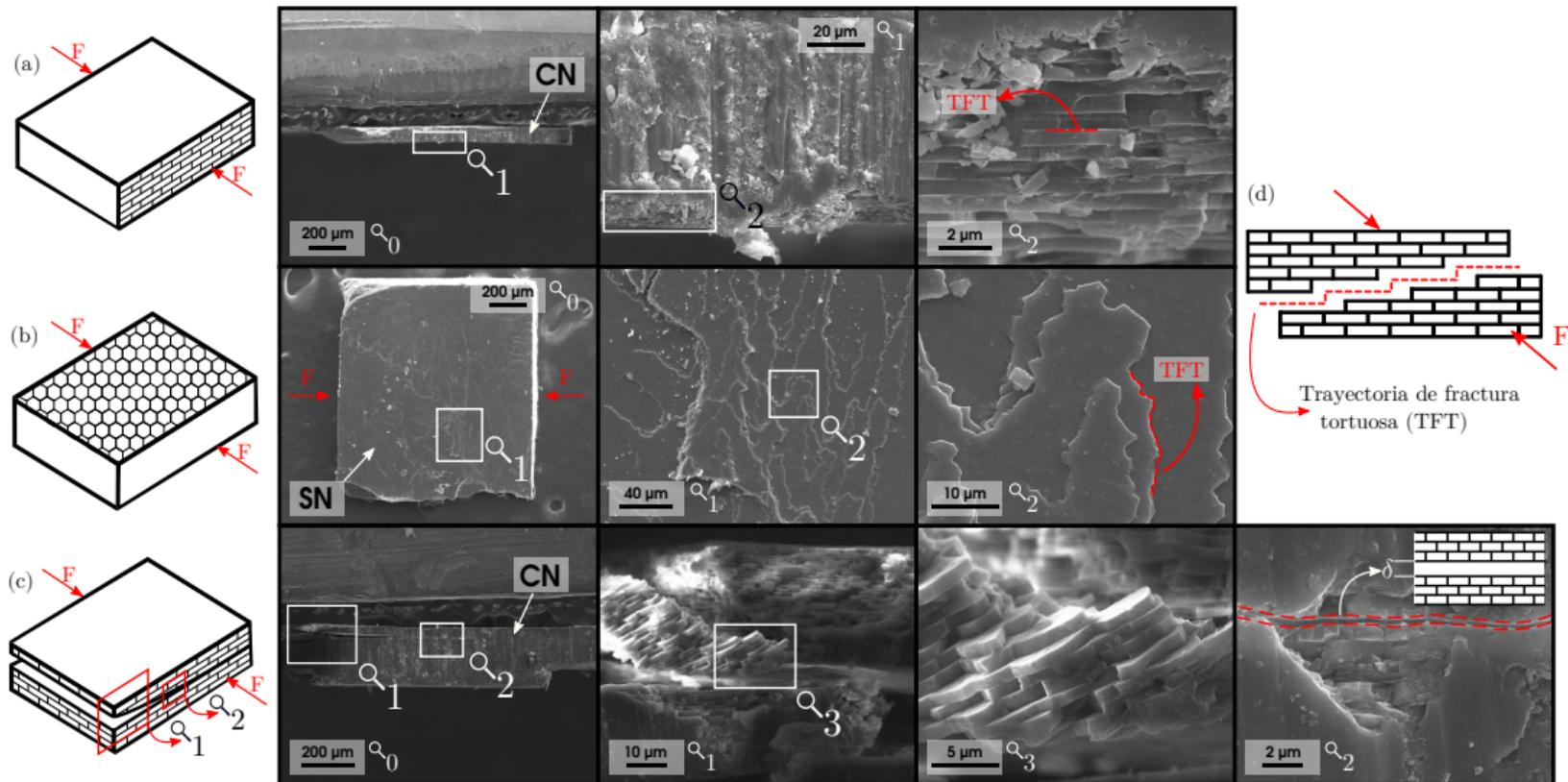


Figura 10: Imágenes MEB de la muestra al final del ensayo de compresión en las direcciones radial (d_r) y tangencial (d_t). (a) Imagen en la superficie de la capa nacarada (SN), (b) imagen en la sección transversal de la capa (CN), (c) muestra con delaminación incompleta, cuyo origen de fractura tiene una separación de "ladrillos" de aragonito de δ , (d) trayectoria de fractura tortuosa (TFT). F: dirección de la fuerza aplicada.

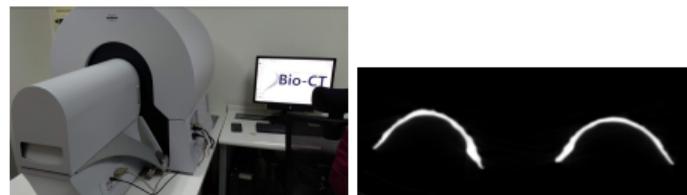
Índice

- 1 Introducción
- 2 Objetivos
- 3 Ensayos Experimentales
 - Compresión Uniaxial
 - Flexo-Compresión
- 4 Resultados
 - Característica de falla
 - Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)
- 5 **Simulaciones numéricas**
 - Direcciones ortótropas
 - Condiciones y procedimiento de la simulación
 - Resultados de la simulación
- 6 Conclusiones
- 7 Principales líneas de trabajo futuras
- 8 Referencias

Selección de individuos de *Perumytilus purpuratus* provenientes de Quintay

Cuadro 4: Individuos seleccionados: Grupo, largo inicial previo a los 3 meses del experimento; largo final, altura, ancho y espesor al finalizar el experimento.

Grupo	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



(a) Micro-CT modelo SkyScan 1278. (b) Sección transversal de la concha.

Figura 11: Micro-CT utilizado en la digitalización de las valvas.

- Simulación del ensayo de flexo-compresión.
- Malla de elementos tetraédricos de cuatro nodos.
- Calidad de la malla: criterio del ángulo diédrico mínimo y calidad de forma.
- La ortotropía del material es incorporada mediante un método novedoso desarrollado en el contexto de este trabajo y de un paper bajo revisión en la revista *PLoS ONE*.



Figura 12: Valvas seleccionadas y sus respectivas mallas para simulación numérica.

Direcciones ortótropas: Superficie paramétrica y proyección ortogonal de los baricentros

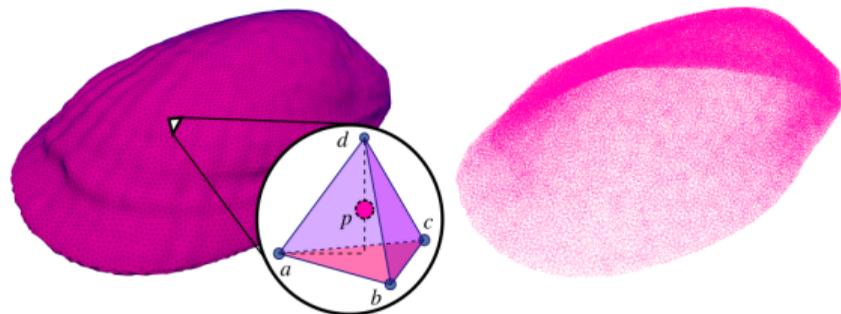


Figura 13: Baricentro p del tetraedro que conforma la malla de las valvas.

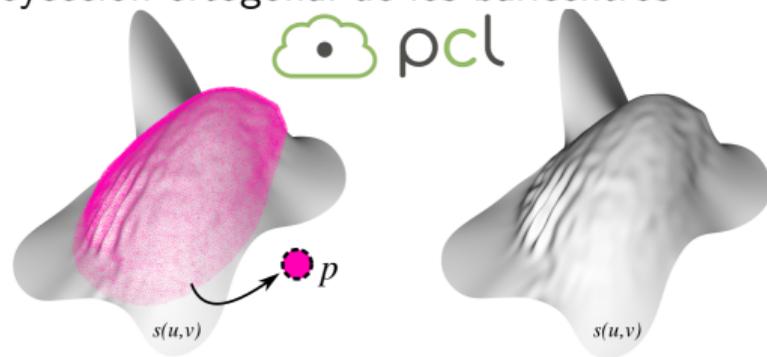


Figura 14: Superficie paramétrica ajustada a los baricentros de la valva [24].

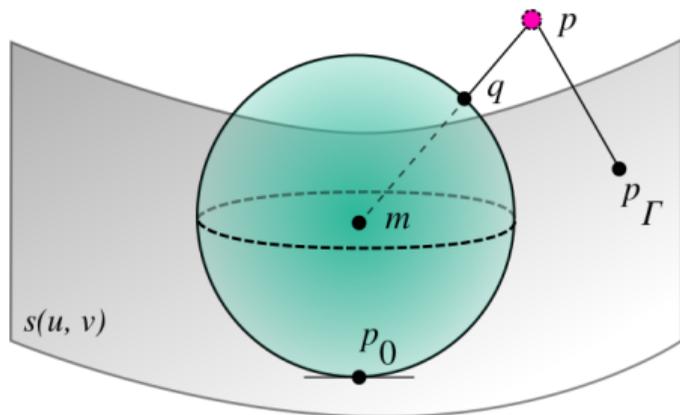


Figura 15: Demostración gráfica del método GSA de Li et al. [25].

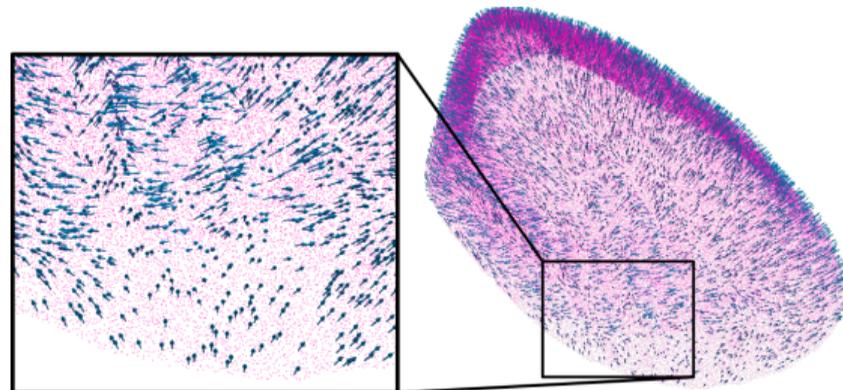


Figura 16: Dirección espesor \hat{d}_e calculado al normalizar $d_e = p - p_\Gamma$.

Direcciones ortótropas: Cálculo de las direcciones tangencial y radial

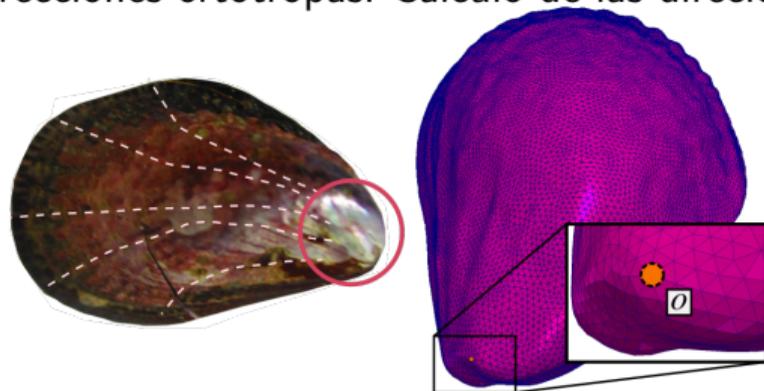


Figura 17: Punto aproximado de origen de las estrías o .

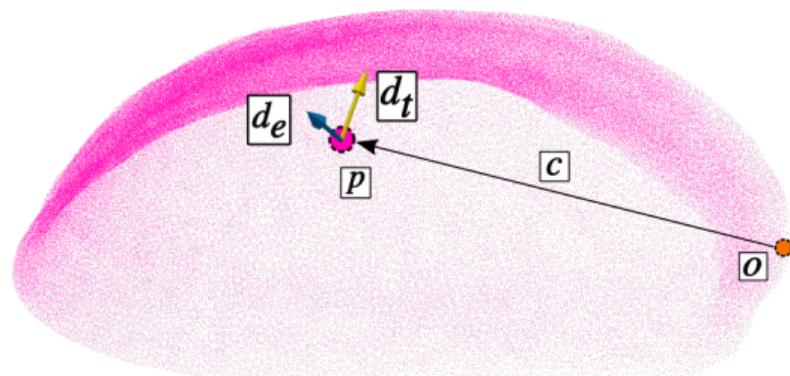


Figura 18: Cálculo del vector c mediante $c = p - o$.

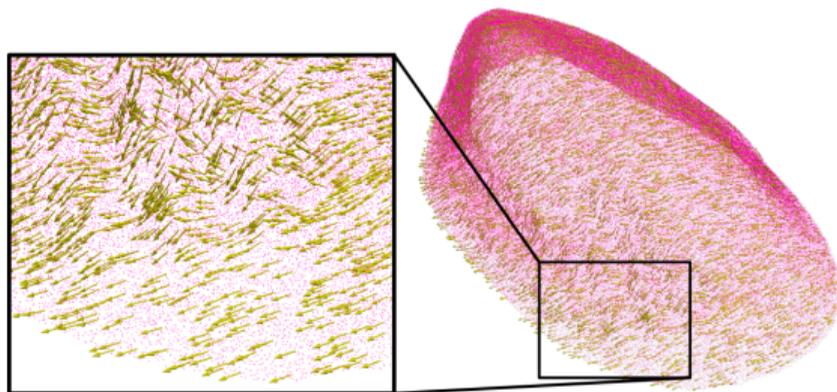


Figura 19: Dirección tangencial \hat{d}_t calculado al normalizar $d_t = c \times d_e$.

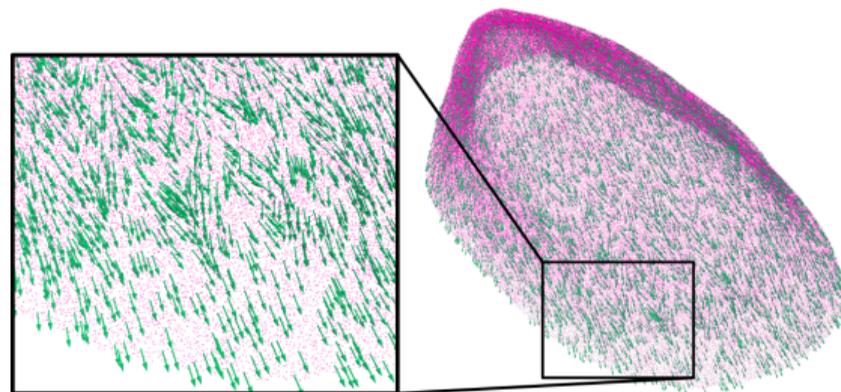


Figura 20: Dirección radial \hat{d}_r calculado al normalizar $d_r = d_e \times d_t$.

Condiciones y procedimiento de la simulación

Condiciones

- **Vulcan:** Simulación mediante elementos finitos.
- Se otorga las direcciones ortótropas con sus correspondientes propiedades mecánicas.
- Elementos triangulares de 3 nodos: margen de crecimiento y curvatura de la valva
- Elementos cuadrilaterales de 4 nodos: base y paredes.
- Simulación ejecutada con y sin efecto de fricción — $\mu = 0,5$
- Se registra la fuerza de reacción del punzón.

Procedimiento

Imposición de desplazamiento nodal:

- Valva: Sin imposición de desplazamiento
- Punzón: nulo
- Base y paredes: nulo en x y z , no nulo y positivo en y .

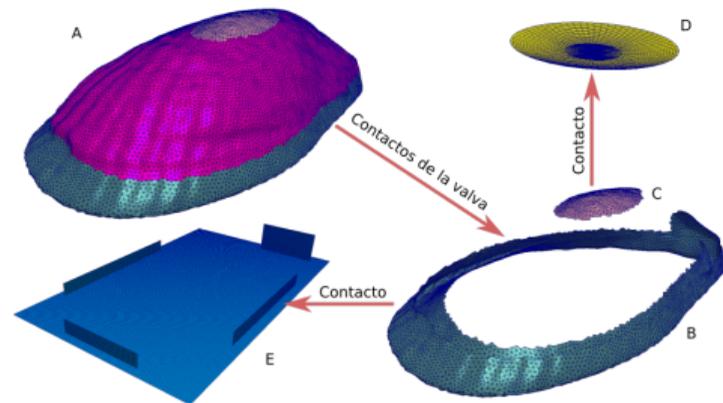


Figura 21: A: Valva, B: Contacto del margen de crecimiento, C: Contacto de la curvatura, D: Punzón, E: Base y paredes.

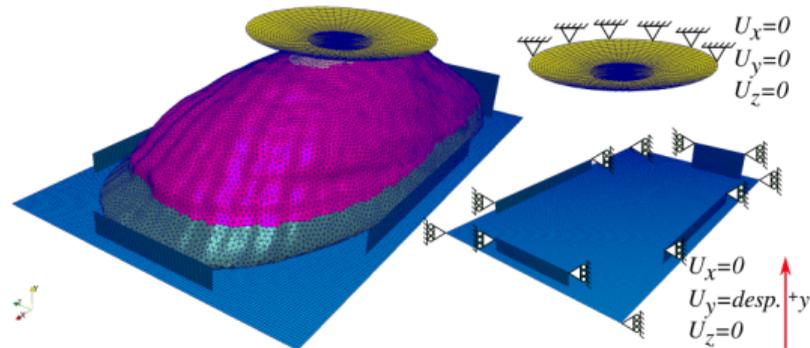


Figura 22: Restricciones de movimiento de la simulación.

Fuerza y desplazamiento

- Comparación de curvas a la misma magnitud de la fuerza captada en ensayo experimental.
- En general, curvas con bondad de ajuste superior a 0,9 con respecto a la curva experimental, excepto la del tamaño 1.
- Curvas con efectos de roce poseen mayor bondad de ajuste.
- Comparación de ambas curvas de simulación: con roce posee menor error que su contraparte.

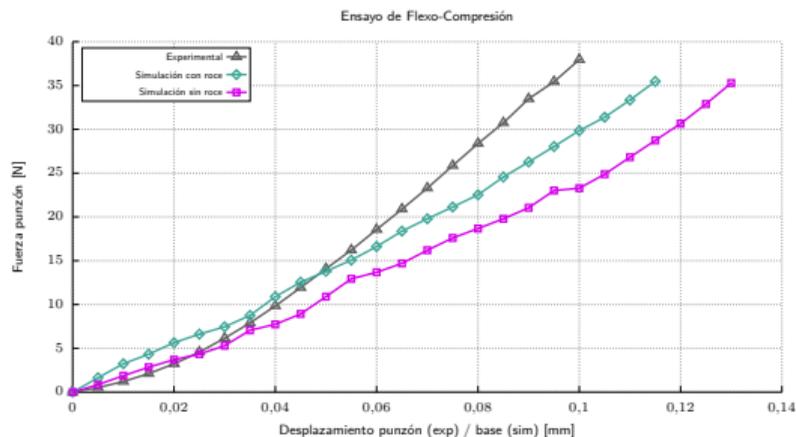


Figura 23: Simulación flexo-compresión para el tamaño 1

Cuadro 5: F_{max} , d_{max} , bondad y error de ajuste para las simulaciones y ensayos experimentales de los 5 tamaños.

Tamaño	Condición	F_{max} [N]	d_{max} [mm]	r^2	NRMSD
1	Experimental	39	0,1023	-	-
	Con roce	39	0,1169	0,895	0,100
	Sin roce	39	0,1315	0,680	0,176
2	Experimental	43,5	0,1478	-	-
	Con roce	43,5	0,1621	0,975	0,046
	Sin roce	43,5	0,1816	0,928	0,078
3	Experimental	31	0,1495	-	-
	Con roce	31	0,1399	0,987	0,030
	Sin roce	31	0,1378	0,974	0,043
4	Experimental	50	0,1701	-	-
	Con roce	50	0,2022	0,941	0,069
	Sin roce	50	0,2221	0,758	0,140
5	Experimental	63,3	0,1412	-	-
	Con roce	63,3	0,1601	0,936	0,075
	Sin roce	63,3	0,1748	0,923	0,083

Esfuerzos principales

- Magnitudes: Esfuerzo de compresión > Esfuerzo de tracción.
- Alineación aproximada de los esfuerzos principales (σ_I , σ_{II} y σ_{III}) y direcciones ortótropas del material.
- Los efectos de compresión se concentran en el espesor.
- Los esfuerzos máximos de compresión disminuyen de 330 MPa para el tamaño 1, a 130 MPa en el tamaño 5.

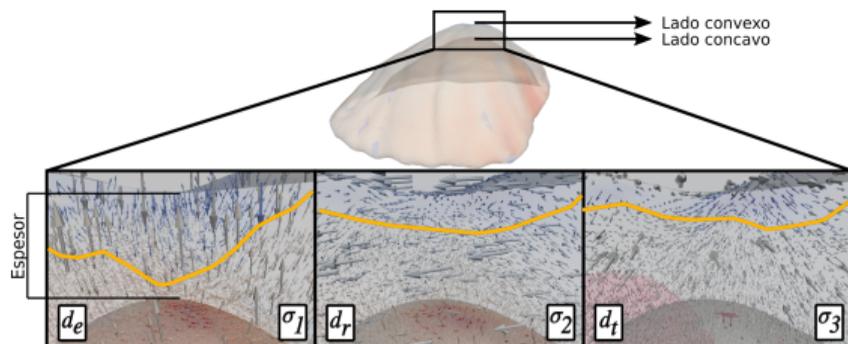


Figura 24: Concentración de esfuerzos en el espesor.

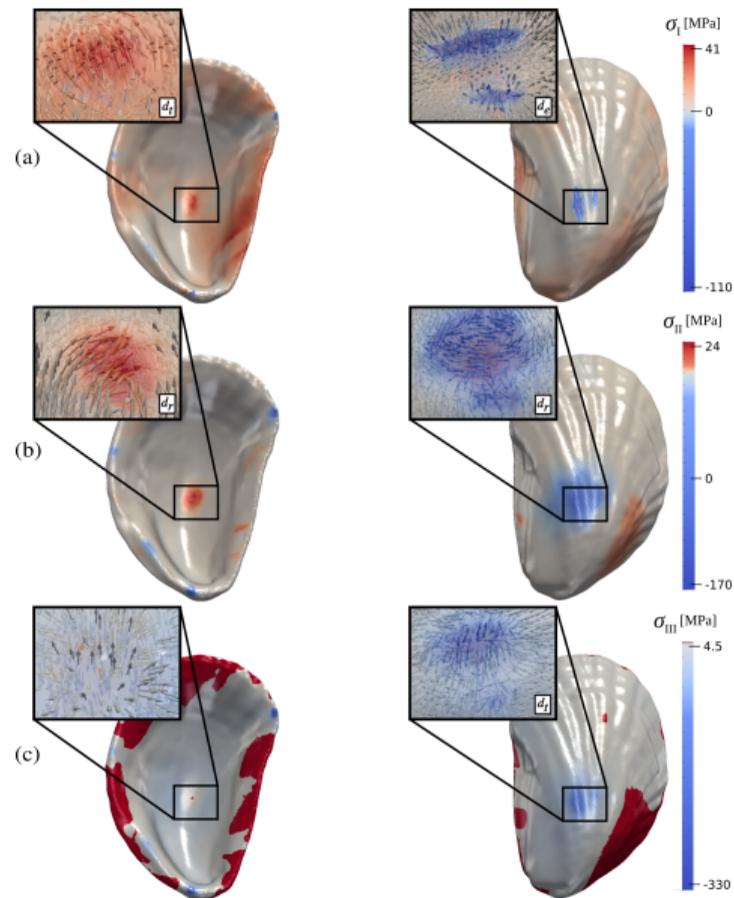


Figura 25: Esfuerzos principales y sus direcciones en la concha.

Índice

- 1 Introducción
- 2 Objetivos
- 3 Ensayos Experimentales
 - Compresión Uniaxial
 - Flexo-Compresión
- 4 Resultados
 - Característica de falla
 - Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)
- 5 Simulaciones numéricas
 - Direcciones ortótropas
 - Condiciones y procedimiento de la simulación
 - Resultados de la simulación
- 6 Conclusiones
- 7 Principales líneas de trabajo futuras
- 8 Referencias

Conclusiones

- Los resultados experimentales sugieren una simetría y homogeneidad en las propiedades mecánicas de la concha.
- Los resultados sugieren que la resistencia estructural de la valva es preponderante ante la del material:
 - Deterioro en las propiedades mecánicas en la dirección del espesor a mayor tamaño de la concha.
 - La valva se vuelve más rígida, y soporta mayores cargas antes de la rotura a mayor tamaño de la concha.
- La característica de falla del material se ha descrito en la literatura.
- Dirección de la grieta de la fractura tortuosa, al parecer, es perpendicular a la fuerza aplicada.

Conclusiones

- Los resultados experimentales sugieren una simetría y homogeneidad en las propiedades mecánicas de la concha.
- Los resultados sugieren que la resistencia estructural de la valva es preponderante ante la del material:
 - Deterioro en las propiedades mecánicas en la dirección del espesor a mayor tamaño de la concha.
 - La valva se vuelve más rígida, y soporta mayores cargas antes de la rotura a mayor tamaño de la concha.
- La característica de falla del material se ha descrito en la literatura.
- Dirección de la grieta de la fractura tortuosa, al parecer, es perpendicular a la fuerza aplicada.

Conclusiones

- Buenos resultados en las simulaciones utilizando micro-ct y el método de las superficies paramétricas.
- Sin embargo, estudio realizado con este método para la concha del *Argopecten purpuratus* presentó un error mayor al esperado.
- Simulaciones cuyas concentraciones de esfuerzo son mayores en dirección radial y tangencial.
- Se deben realizar mayores estudios para determinar la causa de la delaminación en la flexo-compresión, cuyas concentraciones coinciden con las direcciones en se observó la delaminación en el ensayo material.

Conclusiones

- Buenos resultados en las simulaciones utilizando micro-ct y el método de las superficies paramétricas.
- Sin embargo, estudio realizado con este método para la concha del *Argopecten purpuratus* presentó un error mayor al esperado.
- Simulaciones cuyas concentraciones de esfuerzo son mayores en dirección radial y tangencial.
- Se deben realizar mayores estudios para determinar la causa de la delaminación en la flexo-compresión, cuyas concentraciones coinciden con las direcciones en se observó la delaminación en el ensayo material.

Principales aportes

Desarrollar un proyecto multidisciplinario cuyos resultados y nuevos métodos, provenientes del estudio de un ser vivo, son de utilidad en futuros proyectos de ingeniería.

Dar inicio a investigaciones nuevas que ayudarán a la preservación de la especie, su medio ambiente y macrofauna asociada.

Índice

- 1 Introducción
- 2 Objetivos
- 3 Ensayos Experimentales
 - Compresión Uniaxial
 - Flexo-Compresión
- 4 Resultados
 - Característica de falla
 - Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)
- 5 Simulaciones numéricas
 - Direcciones ortótropas
 - Condiciones y procedimiento de la simulación
 - Resultados de la simulación
- 6 Conclusiones
- 7 Principales líneas de trabajo futuras
- 8 Referencias

Principales líneas de trabajo futuras

- Disminuir el tiempo de las simulaciones empleando el mismo método, pero adecuado a elementos shell de espesor variables.
- Extender el método a simulaciones o procesos que requieran una proyección ortogonal. Por ejemplo, en estructuras de cúpulas o simulaciones con elementos shell con materiales anisótropos; o biomateriales como arterias, que requieran la caracterización de las direcciones principales.
- Estudiar los efectos ambientales en la biomecánica de la concha del *P. purpuratus*, de tal forma que considerar estos estudios como otro proceso bioindicador de la especie.
- Crear un modelo capaz de obtener propiedades mecánicas de las conchas a partir de la densidad de ella mediante tecnología micro-ct. Esto ayudaría a entender procesos de defensa o comportamiento de animales extintos, cuyas conchas pueden ser procesadas por esta tecnología.

Principales líneas de trabajo futuras

- Disminuir el tiempo de las simulaciones empleando el mismo método, pero adecuado a elementos shell de espesor variables.
- Extender el método a simulaciones o procesos que requieran una proyección ortogonal. Por ejemplo, en estructuras de cúpulas o simulaciones con elementos shell con materiales anisótropos; o biomateriales como arterias, que requieran la caracterización de las direcciones principales.
- Estudiar los efectos ambientales en la biomecánica de la concha del *P. purpuratus*, de tal forma que considerar estos estudios como otro proceso bioindicador de la especie.
- Crear un modelo capaz de obtener propiedades mecánicas de las conchas a partir de la densidad de ella mediante tecnología micro-ct. Esto ayudaría a entender procesos de defensa o comportamiento de animales extintos, cuyas conchas pueden ser procesadas por esta tecnología.

Muchas gracias por su atención

Índice

- 1 Introducción
- 2 Objetivos
- 3 Ensayos Experimentales
 - Compresión Uniaxial
 - Flexo-Compresión
- 4 Resultados
 - Característica de falla
 - Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)
- 5 Simulaciones numéricas
 - Direcciones ortótropas
 - Condiciones y procedimiento de la simulación
 - Resultados de la simulación
- 6 Conclusiones
- 7 Principales líneas de trabajo futuras
- 8 Referencias

1. **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>.
2. **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.
3. **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 1, págs. 357-370. ISSN 18697534.
4. **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.
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. **GUIÑEZ.** *Dinámica poblacional del chorito maico, Perumytilus purpuratus (Lamarck, 1819) (Bivalvia: Mytilidae), en gradientes de exposición al oleaje.* 1996.
7. **IMMEL, Françoise et al.** The shell of the invasive bivalve species *Dreissena polymorpha*: Biochemical, elemental and textural investigations. *PLoS ONE.* 2016, vol. 11, n.º 5, págs. 1-28. ISSN 19326203.
8. **MACKENZIE, Clara L. et al.** Ocean warming, more than acidification, reduces shell strength in a commercial shellfish species during food limitation. *PLoS ONE.* 2014, vol. 9, n.º 1, págs. 1-9. ISSN 19326203.

9. **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.
10. **FITZER, Susan C. et al.** Ocean acidification alters the material properties of *Mytilus edulis* shells. *Journal of the Royal Society Interface*. 2015, vol. 12, n.º 103. ISSN 17425662.
11. **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.
12. **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.
13. **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.
14. **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.
15. **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/FHS2AQ8HEXA7HA3F2X4I19IE7UG7RA365HGUYLQPVRMSYYAB5L-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.

16. **SARIKAYA, Mehmet.** An introduction to biomimetics: A structural viewpoint. *Microscopy Research and Technique*. 1994, vol. 27, n.º 5, págs. 360-375. ISSN 10970029.
17. **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.
18. **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.
19. **WEGST, Ulrike G.K. et al.** Bioinspired structural materials. *Nature Materials*. 2015, vol. 14, n.º 1, págs. 23-36. ISSN 14764660.
20. **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>.
21. **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.
22. **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.
23. **RODRÍGUEZ-GARCÍA, Verónica et al.** Automatically processed bioinspired hierarchical carbon fiber composites. *ICCM International Conferences on Composite Materials*. 2019, vol. 2019-August, n.º August.
24. **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/>.

25. **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.



Trabajo de titulación

Caracterización de la biomecánica del crecimiento y remodelación del *Perumytilus purpuratus* cultivados en condiciones de crecimiento natural

Estefano Matías Muñoz Moya

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.

Profesor guía: Claudio García Herrera
Profesores correctores:

- Alejandro Gutiérrez Silva
- Nelson Lagos Suárez
- Roberto Ortega Aguilera

e-mail: estefano.munoz@usach.cl
WebPage: <https://estefano23.github.io/>

22 de abril de 2021