

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE INTERFASES
COMPLEJAS CON SUSTRATOS SÓLIDOS**

RUBÉN ANDRÉS MEZA LLANOS

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE INTERFASES
COMPLEJAS CON SUSTRATOS SÓLIDOS**

RUBÉN ANDRÉS MEZA LLANOS

Profesor Guía : Dr. Enrique Cerda
Profesores Comisión : Dr. Jacques Dumais
: Dr. Eugenio Hamm
: Dr. Yaroslav Ispolatov

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FÍSICO

SANTIAGO DE CHILE

SEPTIEMBRE 2012

“ESTUDIO Y ANÁLISIS DE INTERFASES COMPLEJAS CON
SISTRATOS SÓLIDOS”

Trabajo de titulación presentado a la Facultad de Ciencia, en cumplimiento parcial de los requerimientos exigidos para optar al Título profesional de Ingeniero Físico.

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

SANTIAGO DE CHILE

SEPTIEMBRE 2012

©RUBÉN ANDRÉS MEZA LLANOS

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

**“ESTUDIO Y ANÁLISIS DE INTERFASES COMPLEJAS CON
SISTRATOS SÓLIDOS”**

RUBÉN ANDRÉS MEZA LLANOS

Este trabajo de Graduación fue preparado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Enrique Cerda, del Departamento de Física y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora, del candidato Jacques Dumais, Eugenio Hamm y Yaroslav Ispolatov.

.....
.....
.....
.....

Profesor Guía

.....

Director

A mis Padres...

Agradecimientos

Primero que todo quisiera expresar gratitud a los seres mas importantes en mi vida, mis mejores ejemplos, y mi mayor orgullo, a mis padres, Rubén Meza y Gabriela LLanos, mis pilares fundamentales, gracias por entregarme el apoyo y todas las herramientas necesarias a lo largo de mi vida, mis hermanos Rodrigo Meza y Juan Manuel Meza, los cuales son mi motivación diaria, mi cuñada Carolina Pizarro y sobrino Joaquin Meza que me enseñan cada día a no perder lo importante de ser feliz.

Quisiera expresar mi gratitud al equipo humano que conforma el laboratorio del departamento de química, instituto de biofísica dinámica, James Frack, de la universidad de Chicago E.E.U.U., en especial a su Profesora a cargo la Dr. Ka Yee Lee, por darme la oportunidad de ser parte de su equipo de trabajo y confiar en mi, también quisiera agradecer profundamente a quienes fueron mis mentores en la universidad de Chicago, el Dr. Luka Pocivavsek y el Dr. Niels Holten- Andersen

cuyas enseñanzas apreciare por siempre, también al programa de intercambio Chile – Chicago Material Collaborations, el cual me permitió desarrollar estos lazos tan importantes para mi.

Doy Gracias a mi tutor el Dr. Enrique Cerda por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto de título y al Dr. Eugenio Hamm por aceptarme en su laboratorio durante casi dos años, brindando sus consejos y enseñanzas valiosas.

Agradezco a los miembros de la comisión, su voluntad de revisar y evaluar éste trabajo de titulación. También quiero agradecerle a los profesores y a todo el personal del departamento de Física que de alguna manera colaboraron en mi formación.

También quisiera hacer una membresia especial, agradecer a todos mis familiares, algunos perdidos a lo largo de estos años que estarán en mis recuerdos por siempre y para siempre, sin ud. las cosas serian diferente, agradezco desde lo mas profundo su apoyo que a lo lejos aun siento.

Finalmente quisiera agradecer a mis compañeros y amigos, Marinka Quezada, Tania Silva, Jorge Muñoz, Ignacio Calderon, Sergio Palma, Enzo Zeidler, Gonzalo Galdames, Claudio Araus, y por ultimo pero no menos importante, Tiaren Garcia, por toda la ayuda, apoyo, horas de estudio y distracción que me han brindado en este largo proceso.

Gracias por todo a todos.

Resumen

El principal objetivo de este trabajo de tesis es el estudio y análisis de interfaces complejas con sustratos sólidos, teniendo como propósito determinar sus propiedades y comportamiento ante una compresión longitudinal.

Estas características juegan un rol fundamental en procesos industriales, pues el comportamiento de la deformación permite prever el contorno para fines específicos en una gran diversidad de aplicaciones. Por lo mismo, en este trabajo, se realiza el análisis de perfiles de deformación de interfaces complejas con sustratos sólidos para compresiones longitudinales, específicamente estudiando el comportamiento y las características de las arrugas y los pliegues, definidos respectivamente, como una pequeña deformación sinusoidal simétrica y la otra como una deformación localizada, y observadas en las llamadas curvas de compresión, las cuales son obtenidas a través de imágenes por metodologías modernas de compresión superficial.

Las imágenes fueron analizadas mediante MATLAB, un software computacional que permite extraer la información completa sobre los perfiles de deformación mediante algoritmos diseñados para obtener la longitud de onda de las arrugas, la curvatura de la base soporte de los materiales de la interfase y los espesores, que en generales, se ven involucrados. También con técnicas reológicas se midieron las constantes elásticas de los materiales.

Por otro lado a partir de las ecuaciones típicas [1] sobre las arrugas, es posible comprobar la relación en interfaces con sustratos sólidos, la cual correspondería a una relación lineal entre la longitud de onda de las arrugas con la razón de los módulos elásticos al $1/3$ por el espesor de la lamina de goma, ecuación representativa tanto a nano como a macro escala.

Los resultados encontrados a partir de las imágenes fueron comparados entre si, determinando tres posibles regiones, en donde las curvas de compresión tienen distintos comportamientos, dependiendo de cuanto las arrugas se acercan al fondo del modelo y el espacio que necesitan para desenvolverse a pliegues.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Aplicaciones	3
1.1.1. Aplicación como sistemas de control en problemas de ad- hesión	4
1.1.2. Aplicación en la micro fabricación de modelos 3D	5
1.1.3. Aplicación en la electrónica	6
2. Teoría	10
2.1. Elasticidad Básica	11
2.2. Ley de Hooke	14
2.3. Arrugas	16
2.4. Transición de arrugas a pliegues	18

3. Perfil de deformación	21
3.1. Elaboración del sustrato de gel	22
3.2. Preparación Láminas de goma	23
3.3. Experimento	24
3.4. Adquisición de datos desde las imágenes	26
4. Desarrollo Experimental	29
4.1. Geles de calibración	29
4.2. Longitud de onda característica de las arrugas	32
4.3. Curvas de compresión	34
5. Conclusión	42

Índice de figuras

1.1. Perfil óptico de adhesivo arrugado de PnBA	5
1.2. Engranajes a micro escala	6
1.3. Modelo de circuito de multicapas	8
2.1. Ejemplo de arruga y pliegue	19
3.1. Contenedor del gel	24
3.2. Montaje experimental	25
3.3. Análisis de una imagen	27
4.1. Calibración elástica del gel	30
4.2. Gráfico experimental para la longitud de onda de las arrugas	33
4.3. Ilustración de la relación compresión - curvatura.	35
4.4. Gráfico de razón de amplitudes versus el parámetro de compresión	36

4.5. Gráfico de razón de amplitudes versus el parámetro de compresión para $H/\lambda > 1$ y $H/\lambda \leq 1$	38
4.6. Gráfico de razón de amplitudes versus el parámetro de compresión para diferentes $H/\lambda > 1$	40

Capítulo 1

Introducción

En las últimas décadas el estudio de interfaces complejas se ha traducido en un significativo avance en ámbitos tan diversos como la medicina, procesos industriales y técnicas de control. Este desarrollo ha impulsado, a su vez, el interés de distintas ramas científicas e ingenieriles, con el objetivo de determinar la relación funcional de los patrones que se pueden formar mediante la compresión.

Varios enfoques teóricos se han propuesto para describir la inestabilidad de arrugas en relación de pequeñas compresiones, es decir, cerca del umbral de la inestabilidad. Sin embargo, el dominio a gran compresión permanece en parte sin

explorar.

La naturaleza elástica de los materiales se considera una propiedad termodinámica importante al igual que cualquier otra, como por ejemplo la densidad . Y al igual que la densidad, es razonable suponer que la respuesta elástica cambia poco en alguna ventana de perturbaciones (temperatura, presión, etc.), en otras palabras, se supone que el material esta en un estado de equilibrio, una deformación controlada y lenta de una muestra aislado proporcionará una buena caracterización de sus propiedades elásticas. A pesar de que la caracterización de estos materiales a nivel macroscópico es bien conocida, es de suma importancia implementar métodos que sean útiles cuando estos materiales conforman muestras muy pequeñas o muy delgadas. La instalación de dispositivos de ensayos mecánicos, por lo general, no tienen la sensibilidad para medir las fuerzas que intervienen en el esfuerzo de una película delgada de polímero.

Las dificultades en el estudio de este tipo de estructuras se encuentran en su heterogeneidad intrínseca, tanto materiales y geométricas. Aun así se innovo en un sistema de compresión superficial determinado por el cambio de curvatura en la base del modelo.

En este trabajo se presenta una estrategia de diseño alternativo para la elaboración reproducible de interfaces complejas mediante la adhesión de un elastómero

con una película elástica. Para lograr el objetivo de comprender tales fenómenos, se debe comenzar con la caracterización elástica de geles de calibración, determinando la reproducibilidad mecánica del mismo, y así, ser usados como sustratos en la creación de interfaces modelos. Luego se propone continuar con la verificación de la relación fundamental teórica entre la longitud de onda de las arrugas y las constantes elásticas de los materiales que forman la interfaces, en este caso para razones de las constantes elásticas del orden de los sustratos sólidos y finalmente, estudiar la transición de arrugas a pliegues.

El proceso de modelamiento de una arruga se basa en la compresión de un cuerpo de polímero confinado bajo una película elástica. A continuación se muestran aplicaciones en algunas áreas.

1.1. Aplicaciones

Las estructuras que constan de una película delgada arrugable depositada sobre un sustrato sólido blando prometen una amplia gama de aplicaciones tanto a macro como a nano escala, en donde la conexión con las distintas áreas de la industria se implementa en la generación de técnicas de control, modelamiento y

prevención.

1.1.1. Aplicación como sistemas de control en problemas de adhesión

En problemas de adhesión, las observaciones en la naturaleza de como los diferentes patrones de superficie (i.e. figura. 1.1) pueden controlar la adherencia y puesta en libertad, ha motivado la investigación en este aspecto. Es el caso de los geckos y algunos insectos, los cuales tienen extremidades decoradas con estructuras fibrilares diseñadas específicamente para su locomoción. Tales observaciones permitieron el diseño de estrategias para la generación de adhesivos modelados por arrugas superficiales, los cuales de acuerdo a su patrón [2] (amplitud y longitud de onda) pueden determinar la cantidad de peso adherida a una superficie y su misma adhesión.

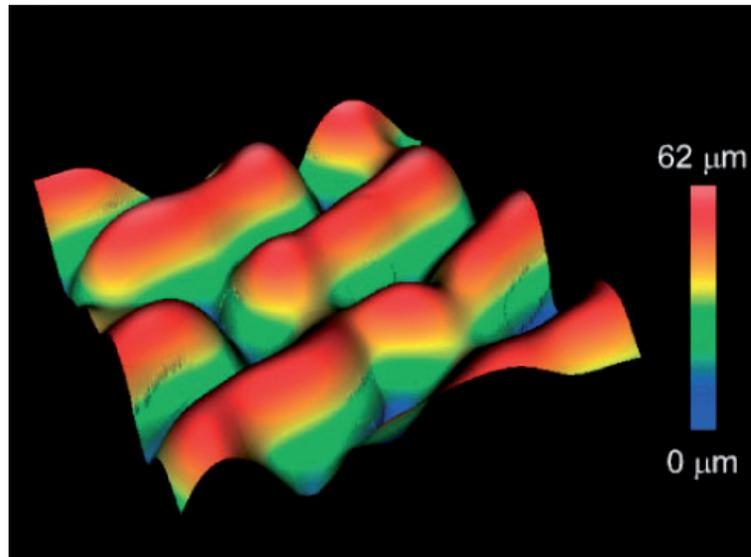


Figura 1.1: Perfil óptico de $1 \times 1 \text{ mm}^2$ de adhesivo arrugado de PnBA.[2]

1.1.2. Aplicación en la micro fabricación de modelos 3D

La mayoría de los estudios anteriores se limitaban a sustratos planos. Por otro lado una nueva gama de aplicaciones surge cuando los dispositivos se vuelven curvos (cilíndricos, véase fig. 1.2). Tipos de morfología de pandeo pueden surgir lo que deja cierto la fabricación en tres dimensiones (3D) de microestructuras y micro-dispositivos [3].

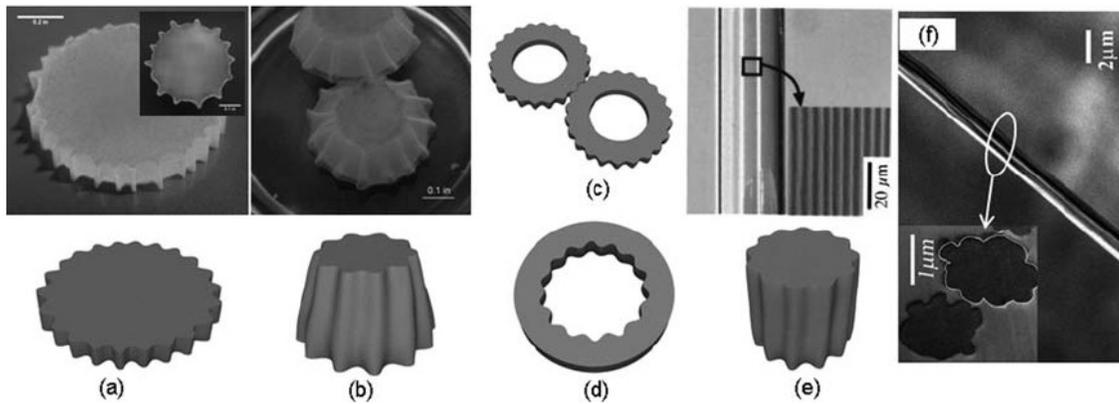


Figura 1.2: (a) Experimento de las dos ruedas dentadas en sustratos. (b) Experimento de engranajes cónicos, cono con ángulo de 90 grados de vértice. (c) Simulación de engranaje formado en la superficie exterior de un sustrato cilíndrico hueco.[4] (d) Simulación con la forma de engranaje en la superficie interna de un sustrato con forma de anillo.[4] (e) Simulación de engranajes de alta relación de aspecto, que es similar al perfil de engranaje formados en un sustrato micro cilíndrico.[5]

1.1.3. Aplicación en la electrónica

En las últimas décadas, la evolución de las tecnologías y la necesidad de nuevas implementaciones, ha provocado que pequeñas y grandes empresas mues-

tren un creciente interés en la electrónica deformable. Ejemplo de esto es el éxito comercial de teléfonos celulares y computadoras portátiles ultra delgadas con teclados deslizables y pantallas movibles, en donde la realización de la electrónica con el mismo rendimiento de las tecnologías establecidas que utilizan semiconductores rígidos, pero en un formato ligero, plegable y extensible, juega un papel muy importante[6].

En la actualidad, nuevos materiales proveen un buen camino en la electrónica deformable, en donde, la más exitosa hasta el momento, es la utilización de conductores elásticos conectados entre dispositivos rígidos o solo pandeables, sobre multicapas de elastómero, como se muestra en la figura 1.3.

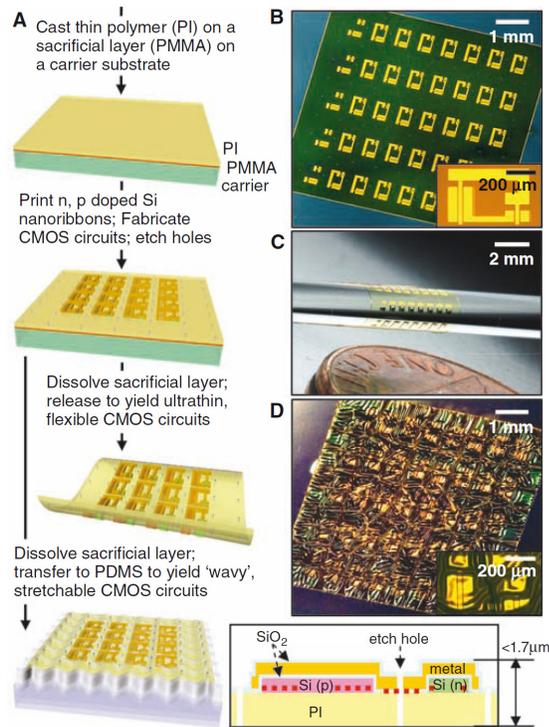


Figura 1.3: (A) Descripción general del proceso de fabricación de circuitos delgados de CMOS en los que se aprovechan de nanocintas de silicio y permiten niveles extremos de plegabilidad (tercera imagen desde arriba) o total reversibilidad de estiramiento /compresión (imagen inferior a la izquierda) y esquema de la sección transversal con el plano mecánico neutral indicada con una línea discontinua de color rojo (imagen inferior de la derecha). (B - D) imágenes ópticas de los circuitos e imagen ampliada de un solo inversor CMOS (recuadro) (B), en una varilla delgada (C), y en una configuración ondulada en PDMS(D).[7]

De tales dispositivos surge la necesidad de conocer los patrones de deformación, para el bienestar de las partes rígidas, y un buen rendimiento de los materiales.

Capítulo 2

Teoría

En física e ingeniería, el término elasticidad es la propiedad de cambiar de forma cuando actúa una fuerza externa sobre un objeto. Tal propiedad está relacionada con la capacidad de un sólido de sufrir transformaciones termodinámicas reversibles e independiente de la velocidad de deformación.

2.1. Elasticidad Básica

Cuando sobre un sólido actúan fuerzas exteriores y éste se deforma, se produce un trabajo de éstas fuerzas que se almacena en el cuerpo en forma de energía potencial elástica y por tanto se producirá un aumento de la energía interna. La magnitud mas simple para medir la deformación, ya sea elástica o plástica, se llama deformación unitaria que se define como el cambio de longitud por unidad de longitud (%).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L - l}{L} \quad (2.1)$$

Donde “ L ” es a longitud inicial, “ l ” la longitud final y “ ε ” expresa la deformación como compresión con el signo (+) o estiramiento con (–), dependiendo del punto de referencia. En la Mecánica de sólidos deformables la deformación puede tener lugar según diversos modos y en diversas direcciones, y puede además, provocar distorsiones en la forma del cuerpo. En esas condiciones la deformación de un cuerpo se puede caracterizar por un tensor (más exactamente un campo tensorial) de la forma:

$$T = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}$$

llamado tensor de deformaciones, específicamente se define el vector $\vec{u}_i(\vec{x}_i) = \vec{x}'_i - \vec{x}_i$ como el vector desplazamiento, de la siguiente manera [8] :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.2)$$

En donde \vec{x}_i y \vec{x}'_i representa las coordenadas en i dimensiones, antes y después de ser desplazado.

Un cuerpo que no se haya deformado, presenta una distribución de moléculas correspondiente a su estado de equilibrio térmico, y todas las partes del cuerpo se hallan en equilibrio mecánico. Esto significa que si consideramos una porción del sólido, la resultante de las fuerzas que actúa sobre ella, debidas a todas las demás, es nula.

Cuando ocurre una deformación, cambia la distribución de las moléculas y dejan de encontrarse en el estado de equilibrio inicial, apareciendo fuerzas que tien-

den a llevarlo a un nuevo equilibrio, fuerzas cuales se llaman tensiones internas. Considerando el esfuerzo como una fuerza aplicada sobre un elemento de superficie, se tiene que $F_i = \frac{\delta\sigma_{ij}}{\delta x_j}$, donde F_i es la fuerza ejercida en cada dirección dimensional, se puede considerar la fuerza total que se ejerce sobre un volumen del cuerpo como una integral de volumen $\int F_i dV$, donde dV es el elemento de volumen, y por un análisis vectorial la fuerza ejercida sobre cualquier volumen puede ser expresada como

$$\int F_i dV = \int \frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_j} dV = \oint \sigma_{ij} df_j \quad (2.3)$$

donde df_j son las componentes del vector elemento de superficie df y σ_{ij} recibe el nombre de tensor de tensiones. El tensor de tensiones es el que da cuenta de la distribución de tensiones y esfuerzos internos en el medio continuo, así mismo, en conjunto con el tensor de deformaciones forman parte importantes en los fenómenos involucrados en este trabajo y relevantes en la explicación de la ley de Hooke.

2.2. Ley de Hooke

En términos generales, la ley de Hooke establece una región en la que la fuerza ejercida en un cuerpo es proporcional a la elongación.

$$F = -k\Delta l \quad (2.4)$$

En donde como ya se ha mencionado, F es la fuerza ejercida, k la constante de Hooke y Δl la longitud desplazada.

Considerando una barra, por definición el esfuerzo σ es igual al cociente entre la fuerza de tensión F y la sección A transversal de la barra, se tiene que

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

y la deformación

$$\varepsilon = \frac{L - l}{L} \quad (2.6)$$

de esta manera, de acuerdo a la ecuación 2.4 se puede escribir

$$\sigma \sim \varepsilon \quad (2.7)$$

en donde la constante de proporcionalidad es conocida como el modulo de Young E .

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.8)$$

y describe la relación esfuerzo - deformación para un cuerpo elástico.

Hasta aquí, se quiere dar a conocer definiciones, debido a que la base de cualquier deformación elástica viene de la comprensión de de los campos vectoriales y energías involucradas, entendiendo así la participación del modulo de Young como constante elástica y las partes que relaciona.

2.3. Arrugas

Los problemas con un enfoque Hookeonano clásico, pueden ser incluso mas severos cuando el sistema bajo estudio es una interfaz, refiriendo a una interfaz como una región física que existe y separa dos regiones.

La aparición en un recubrimiento de arrugas extendidas y de pliegues localizados, genera concentración de esfuerzos que explican el quiebre del recubrimiento o su separación del sustrato, inestabilidades, resultado del equilibrio entre la energía requerida para doblar la película rígida superior y la energía para deformar el sustrato subyacente, de la cual existe una longitud de onda crítica que minimiza la energía de deformación total en el sistema, la cual depende de las propiedades del material de la película y el sustrato.

Considerando esto en el análisis dimensional hecho por E. Cerda y L. Mahadevan [9], se minimizo la energía total del sistema, que incluye la energía de doblamiento (U_B) y de rigidez (U_s), dando a entender que la longitud de onda crítica (λ) puede ser expresada por

$$\lambda \sim \left(\frac{B}{K} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.9)$$

En donde B es la rigidez de doblamiento de la lamina y K es la rigidez del sustrato, a la vez B es conocida como $B = E_m t^3 [3 / [12(1 - \nu_m^2)]]$ en donde E_m , t y ν_m corresponde al modulo de Young, espesor y coeficiente de Poisson, por lo que la relación quedaría dependiendo de K , la cual se estima como una función del tipo $K = E_s f(\lambda/l_p) / l_p$ en donde E_s , corresponde al modulo de Young del sustrato, $f(\lambda/l_p)$ una función adimensional y l_p una longitud característica. En el limite $t \ll \lambda \ll H$, limite para un sustrato profundo, en donde la longitud característica es λ , ($l_p \sim \lambda$) ocurre que $K \sim E_s / \lambda$ entregando una relación entre la longitud de onda de las arrugas y la razón de las constantes elásticas de la membrana y el sustrato.

$$\lambda \sim t \left(\frac{E_m}{E_s} \right)^{1/3} \quad (2.10)$$

Si bien esto entrega una primera aproximación, de acuerdo a los estudios de E. Sultan y A. Boudaoud [10] y las curvas de medición de C. Stafford [1], se considera una relación funcional típica entre la longitud de onda de las arrugas y los módulos elásticos de las capas definidas en la ecuación como

$$\lambda = 2\pi t \left(\frac{(1 - \nu_s^2)E_m}{3(1 - \nu_m^2)E_s} \right)^{1/3} \quad (2.11)$$

2.4. Transición de arrugas a pliegues

Como se puede ver en la ecuación 2.11, la longitud de onda es independiente de algún parámetro de compresión. Esto da a suponer su utilidad en la determinación de los perfiles de deformación en la interacción mecánica de los componentes de la interfase, en donde la transición de arrugas a pliegues, ya visto para sustratos líquidos por Pocivavsek et al. [11], resulta ser la mas interesante. Por esto se enfatiza en la diferencia que se le da en este estudio a las arrugas y los pliegues, pues, si bien las arrugas son deformaciones que vista de forma transversal es una sinusoidal periódica caracterizada por su simetría, los pliegues son mas bien la focalización de la deformación, en donde su principal característica es la amplitud con respecto al punto de referencia.

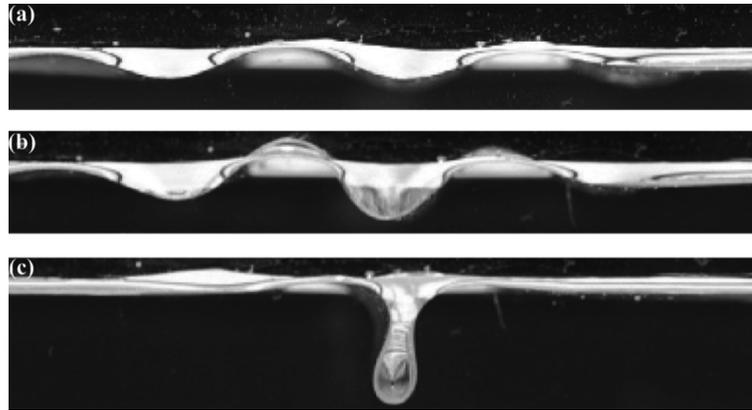


Figura 2.1: Transición de arruga a pliegue de una lamina de poliéster sobre agua por compresión longitudinal, a) arruga y c) pliegue. [11]

Suponiendo que los parámetros macroscópicos son H (espesor del sustrato), λ (longitud de onda de las arrugas) y Δ (parámetro de compresión), se espera que la razón de las amplitudes entre las arrugas y los pliegues A_0/A_1 pueda ser descrita de la forma

$$A_0/A_1 = f(\Delta, \lambda/H) \quad (2.12)$$

Donde f es una función adimensional y el parámetro λ/H representa el parámetro de penetración de la deformación del sustrato.

A partir de este simple análisis, se considera como parejas de parámetros relevantes a el parámetro de penetración (λ/H), la razón de amplitudes (A_0/A_1) y la compresión (Δ), enfocando el fenómeno físico que implica la transición de arrugas a pliegues en interfases complejas por el análisis de tales variables.

Capítulo 3

Perfil de deformación

Para tener el perfil de deformación presenciado en la compresión superficial de la interfase, es necesario crear las condiciones para que esto ocurra. Si bien se conocen varias técnicas para tener una interfase compleja, se optó por desarrollar una simple, la cual se formará por la unión de un sustrato y una lámina elástica, que en este caso es de goma, y la complejidad de ello cae en la elaboración de un sustrato homogéneo y reproducible.

3.1. Elaboración del sustrato de gel

La elaboración del sustrato de gel, es un proceso metódico desarrollado con el fin de obtener de manera reproducible un sustrato con las características necesarias para nuestras experimentaciones. Utilizamos en distintas concentraciones aceite mineral y un polímero elástico llamado Estireno - Isopreno - Estireno (SIS en inglés), ambos se mezclaron, batieron y fundieron en un baño térmico entre los 125 - 140 grados Celsius, en un sistema abierto, evitando la oxidación por medio de la creación de burbujas de nitrógeno dentro de la mezcla. En este punto, se administró el gas mediante una aguja lo suficientemente larga como para evitar la contaminación de la muestra.

Una vez que la presencia de los pellets del polímero se ha perdido, se interrumpe la creación de burbujas y se procede a generar vacío para la eliminar las burbujas restantes y luego se vierte la solución al correspondiente contenedor. El contenedor fue hecho con teflón, por sus características de no adherencia con respecto al gel, y varía de acuerdo a si se quiere medir las características elásticas del gel o tener el perfil de compresión de la interfase a experimentar.

Medir las características elásticas del gel no implica mayor preparación del punto de vista del mismo, ya que lo siguiente dependerá del instrumento utilizado para

medir.

3.2. Preparación Láminas de goma

Se prepararon láminas de goma con distintos espesores, pero con un mismo corte rectangular, que básicamente evita el contacto de la lámina con los bordes del contenedor cuando esta se pone sobre el gel. Las láminas de goma se limpiaron y dejaron libres de agentes externos, se utilizó pintura fluorescente para marcar con una delgada línea uno de los bordes, el cual ira por la cara visual del perfil. A su vez se hizo lo mismo en la base del contenedor, el cual para este caso (véase fig. 3.1) es un contenedor cubico rectangular puesto horizontalmente con forma de caja, abierta en la parte superior, con tres caras de teflón, las dos caras más largas (fig. 3.1 a), removibles y paralelas entre sí y con una placa flexible como base.

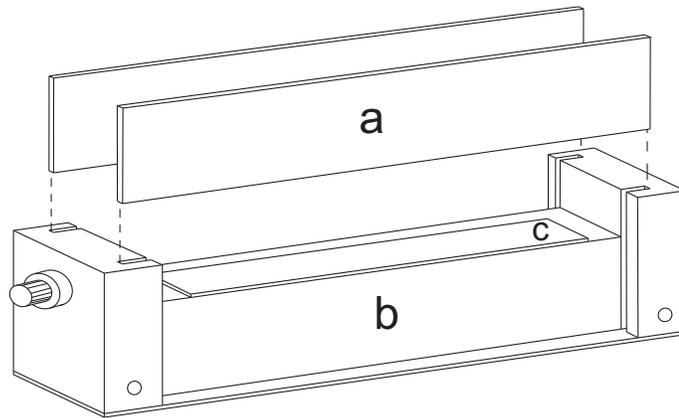


Figura 3.1: Contenedor del gel, a.- Paredes removibles de teflón b.- Gel c.- Lámina de goma.

La función de las caras removibles es mantener el gel mientras este se solidifica después de la elaboración, por lo que tales caras deben ser removidas antes de la preparación de la lámina de goma, para luego, con la interfase lista, terminar el montaje representado en la figura 3.2 A.

3.3. Experimento

El experimento diseñado consiste en tomar una fotografía del perfil de la interfase (sustrato - lamina) mientras esta se comprime de forma longitudinal al plano.

La compresión se llevó a cabo cambiando la curvatura placa inferior del contenedor del gel, la cual se mantiene constante a lo largo de la misma, tal como se muestra en la figura 3.2 (A → B) en donde se representa el funcionamiento del montaje y cuál sería la parte fotografiada de él.

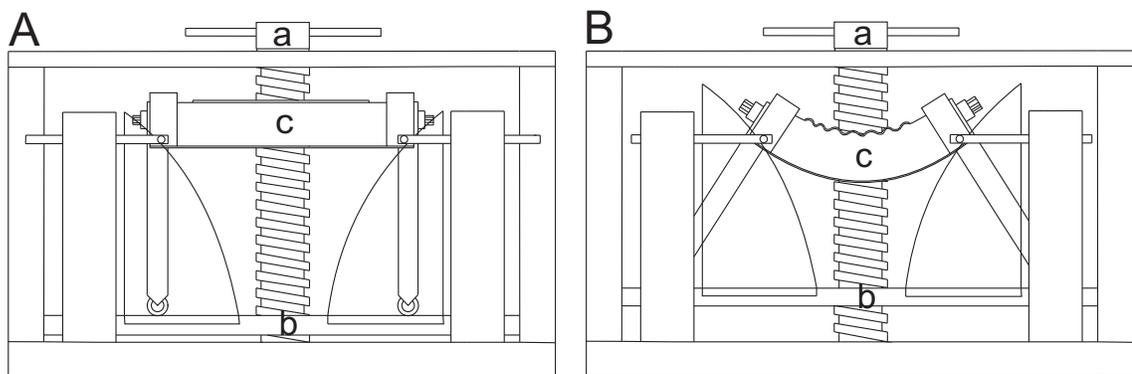


Figura 3.2: Motaje experimental a.- Tornillo guía b.- Plataforma con rieles c.- Contenedor (véase fig. 3.1).

A medida que se gira el tornillo guía (fig. 3.2 a), este eleva la plataforma con rieles (fig. 3.2 b) y cambia la curvatura de la placa base en el contenedor del gel (fig. 3.2 c), por lo que de forma consecutiva se obtiene una serie de fotografías con los perfiles de la interfase entre el gel y la lámina.

La pintura fluorescente en la lámina y la base del contenedor nos permitió en experimentos sin luz ambiente, poder definir el perfil de deformación y la curvatura

de la placa usando una longitud de referencia, y mediante software de análisis, se pudo obtener todas variables necesarias del sistema.

Las magnitudes elásticas del sustrato y de la lámina de goma, fueron medidas como el modulo G, extraído a partir de los módulos de almacenamiento y de pérdida de un reómetro modelo “Physica MCR 301 Anton Paar”. Es importante destacar que si bien se midieron los módulos G con el mismo instrumento, se utilizo distinta técnica, ya que para un buen uso del reómetro es necesario el mejor contacto posible con el material, por lo que se aprovecho en los geles de polímero la composición pegajosa incrementando la adhesión con laminas ásperas en los contactos. En cambio, en las laminas de goma se utilizo adhesión por compresión, y es por esto que la precisión en las laminas de goma es mejor que en los geles incluso si son materiales mas rígidos.

3.4. Adquisición de datos desde las imágenes

La adquisición de datos se desarrolló en base a observaciones experimentales y en donde la precaución de resaltar los perfiles de deformación reduce todo a un análisis de intensidades. Por otro lado, debido a la arbitrariedad con la que las

arrugas cambian a pliegues, se optó por empezar desde una imagen con mayor a una con menor compresión, de esta manera se puede hacer un seguimiento claro de cada componente.

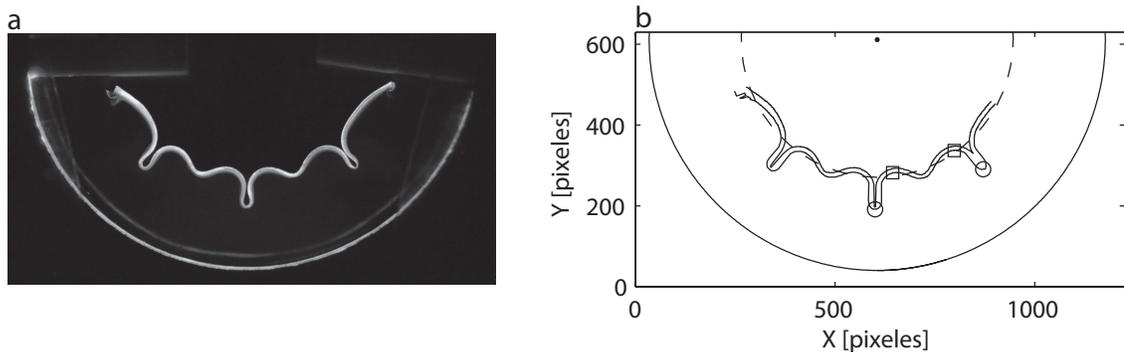


Figura 3.3: Análisis de una imagen a.- Imagen sin procesar b.- Datos extraídos en un plano X-Y.

Para cada imagen se comienza con definir los puntos de interés en un plano X - Y (línea continua fig. 3.3 b), extrayendo la curvatura de la placa al circunscribir una circunferencia en ella y delineando el contorno superior e inferior de la interfase, solo de manera visual, ya que solo usamos el contorno inferior para tener diferencias de amplitudes. Una vez definidos los contornos se sigue imagen a imagen los máximos de curvatura de pequeñas zonas, marcadas con cuadrados y círculos en la fig. 3.3 b. Del promedio radial de la sección del perfil de deforma-

ción entre ambos cuadrados, se marca una línea discontinua de referencia para definir A_0 y A_1 correspondiente a la amplitud de los pliegues y arrugas respectivamente.

A_0 es el promedio de las distancias radiales ente la línea discontinua y cada símbolo circular, por otro lado A_1 es el promedio de las distancias radiales ente la línea discontinua y cada símbolo cuadrado.

Capítulo 4

Desarrollo Experimental

4.1. Geles de calibración

Con el fin de estimar la reproducibilidad y a la vez la calibración de los sustratos gel, se desarrollaron experimentos de donde se obtuvo la relación entre el modulo elástico G y la razón porcentaje - peso de distintas muestras en el rango elaborable, como se puede ver en el siguiente gráfico (fig. 4.1).

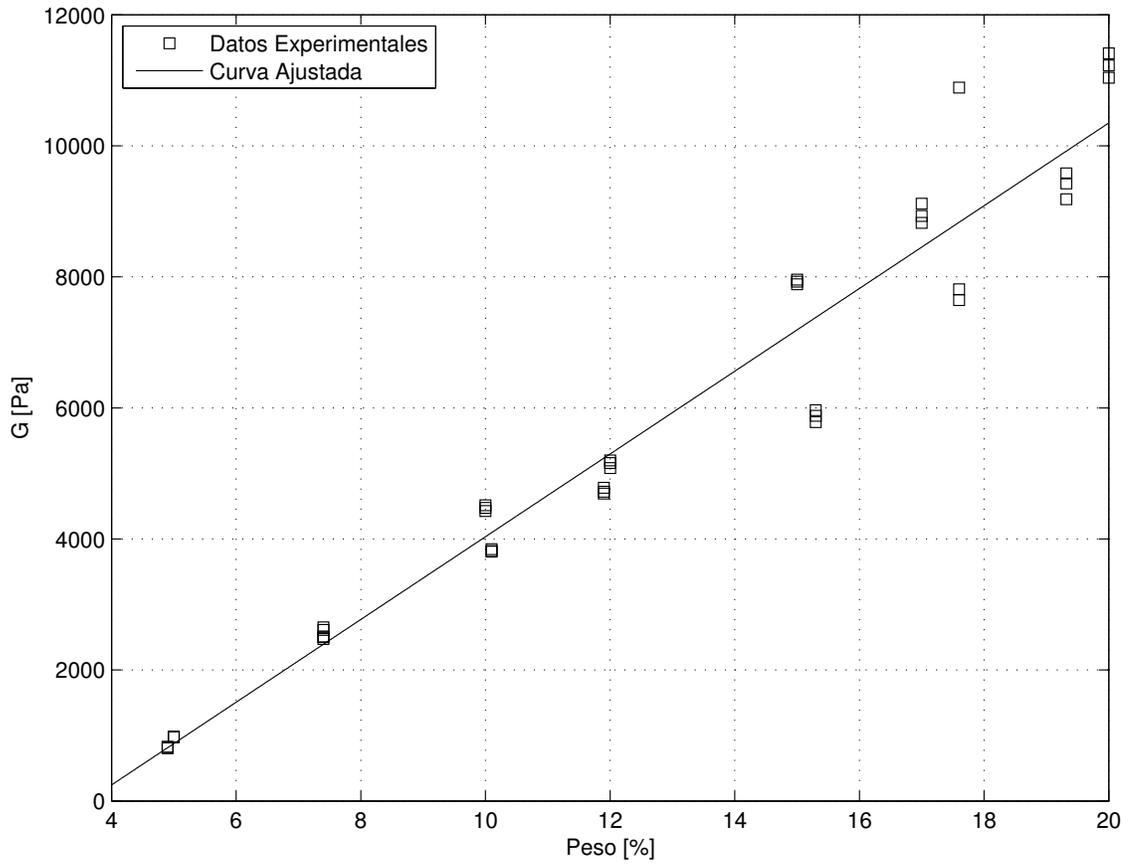


Figura 4.1: Gráfico de la calibración elástica del gel con ajuste lineal.

Del gráfico (fig. 4.1) se obtuvo la siguiente relación lineal:

$$G = (631,5 \pm 45,8)Peso - (2282 \pm 609) \quad (4.1)$$

Si bien se espera que la relación entre el modulo elástico y la razón porcentaje – peso no sea lineal, debido a que en el limite en donde hay solo aceite mineral (0%), el modulo G debe ser superior a 0. Se estimó que como solo se observo el 20% de toda la curva por limites en el proceso de elaboración, se determinó con un 95% de ajuste la mejor relación para el rango medido, en donde el incremento en la desviación estándar para los porcentajes – pesos mas altos se atribuyen a los diferentes tipos de adhesión que presenta la diferente mezcla de materiales. Con la curva mostrada en la fig. 4.1 se determinó que el sustrato gel es reproducible. Y considerando que el sustrato de gel y la lámina de goma tienen el mismo coeficiente de Poisson, debido a que en la solución del gel, se observa desde el punto de vista de la deformación, un material de características similares a la lamina de goma, se uso la razón entre modulo G de la lamina de goma y el sustrato de gel ($\frac{G_m}{G_s}$) como constantes elásticas de comparación y no la razón del modulo de Young como previamente se usaba ($\frac{E_m}{E_s}$), dicho de otra forma, debido a que en gran parte del sustrato es aceite y por otro lado se tiene una lamina de goma, ambos incompresibles, se puede asumir que el coeficiente de Poisson es de 0.5, no afectando el resultado de la razón entre los módulos de Young al usar la razón de los módulos G, ya que son de igual magnitud.

4.2. Longitud de onda característica de las arrugas

De acuerdo a lo señalado en el párrafo anterior y en la ecuación 2.11, se argumentó que la longitud de onda crítica de las arrugas (λ) se presenta en función de la razón de las constantes elásticas de los materiales que forman la interfase. A partir de esto se utiliza la razón de los módulos G de la lamina y el sustrato, para determinar la validez de tal relación.

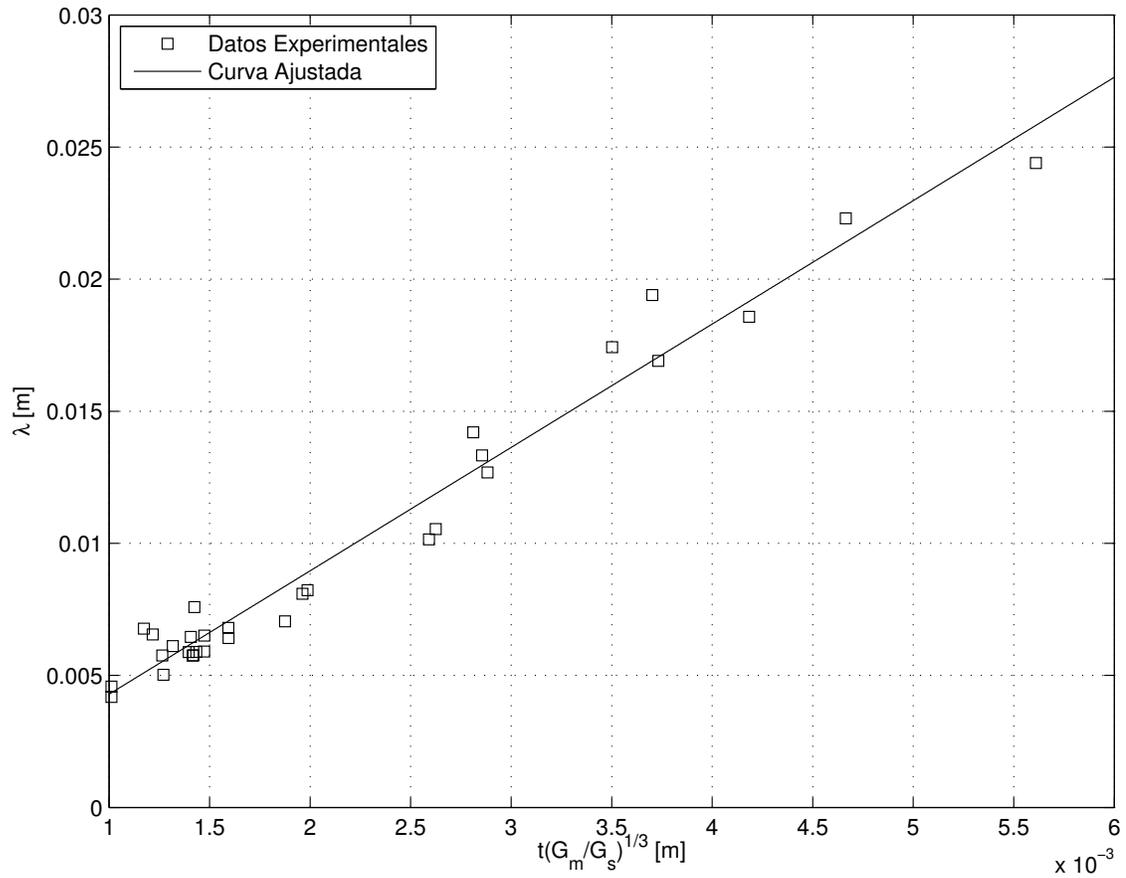


Figura 4.2: Gráfico experimental para la longitud de onda de las arrugas

La relación funcional para la longitud de onda muestra una correlación del 97%.

$$\lambda = (4,671 \pm 0,314)t \left(\frac{Gm}{Gs} \right)^{1/3} - (0,0003837 \pm 0,0007794) \quad (4.2)$$

El coeficiente de Poisson para materiales standard ronda entre 0 y 0.5, para materiales sólidos isotópicos incompresible tiene un valor de 0.5, punto importante para analizar la ecuación 4.2, en la que el intervalo del intercepto de la ecuación de la recta se considera nulo, y la pendiente denota la relación en la ecuación 2.11, ya que $\frac{E_m}{E_s} = \frac{G_m}{G_s}$, por lo que la pendiente, teniendo en cuenta que tanto como el sustrato y la lamina de goma son incompresibles, abarca la teóricamente aceptada de 4.357 correspondiente a $2\pi \left(\frac{(1-\nu_s^2)}{3(1-\nu_m^2)} \right)^{1/3}$, validando en los casos de sustratos sólidos como, un gel, la relación entre la longitud de onda de las arrugas y las componentes elásticas de los materiales de la interfase.

4.3. Curvas de compresión

Ya que la compresión relevante en el sistema es superficial y varía de acuerdo a la profundidad H , el parámetro de compresión Δ en la ecuación 2.12 corresponde al parámetro $H \cdot \kappa$ en el sistema, en donde H es el espesor del sustrato y κ la curvatura de la base, específicamente

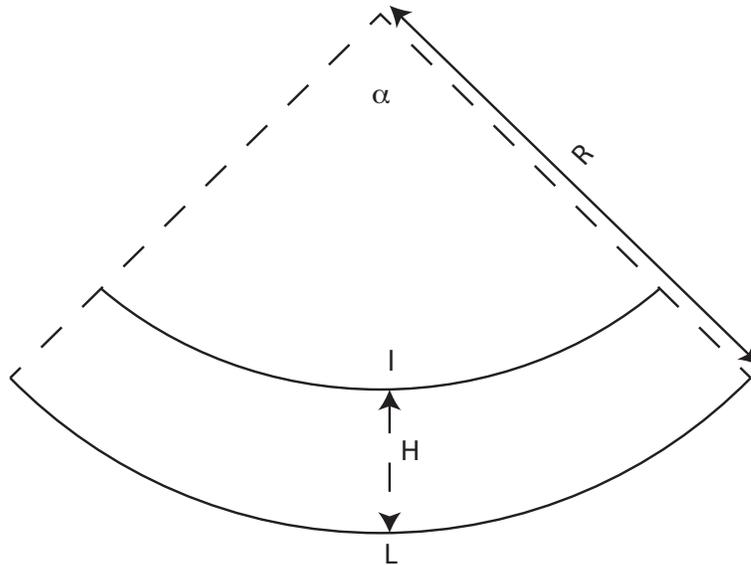


Figura 4.3: Ilustración de la relación compresión - curvatura para el modelo experimental.

Para un arco exterior L constante (α y R variables) a curvatura nula ($R \rightarrow \infty$), equivalente a un sistema sin compresión, el arco interior l tiene la misma longitud de arco L , por lo que a medida que aumenta la curvatura, la compresión se calcula como $\Delta = \frac{L-l}{L}$, de igual forma si se observa la fig. 4.3, se tiene que $L = R\alpha$ y $l = (R - H)\alpha$, de lo que rápidamente el parámetro de compresión queda expresado por $\Delta = H\kappa$ en donde $\kappa = \frac{1}{R}$.

Considerando lo anterior, se presenta la curva de compresión para un experimento, con la intención de explicar el comportamiento de la curva.

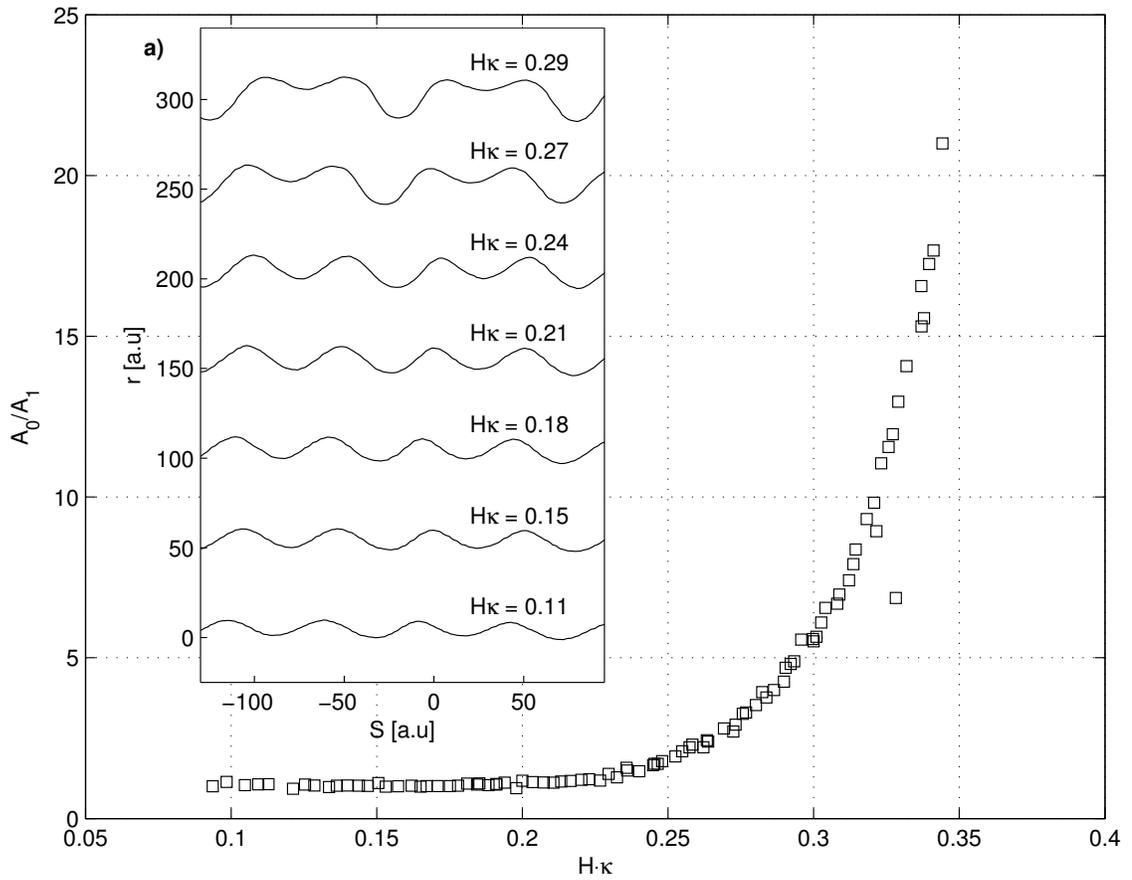


Figura 4.4: Gráfico experimental de la razón entre A_0 y A_1 versus curvatura por espesor del gel.

En el gráfico de la figura 4.4, se puede observar que la longitud de onda de las arrugas permanece constante ante la compresión, la cual es medida con respecto a la longitud de arco de la interfase. A compresiones pequeñas, las arrugas y

los pliegues tienen la misma amplitud ($A_1 = A_0$, $A_0/A_1 = 1$), y mientras aumenta, existe una compresión crítica ($H \cdot \kappa_c$), en la cual la razón de amplitudes se dispara a valores muy grandes, y de acuerdo a su definición (véase fig. 3.3) las amplitudes de las arrugas decrecen a cero, lo que se puede apreciar en la figura 4.4 a), que muestra de forma radial como evoluciona la deformación con respecto a la compresión.

Debido a que experimentalmente se tienen límites en la curvatura de la base del modelo, no se puede observar la compresión crítica en todos los experimentos.

Se estudiaron las curvas de compresión para distintos valores en el parámetro de penetración H/λ la cual fluctúa entre 0.6099 y 3.7495.

En primera instancia, es interesante observar que ocurre para los valores en donde la longitud de onda de las arrugas es similar al espesor del sustrato ($H/\lambda = 1$).

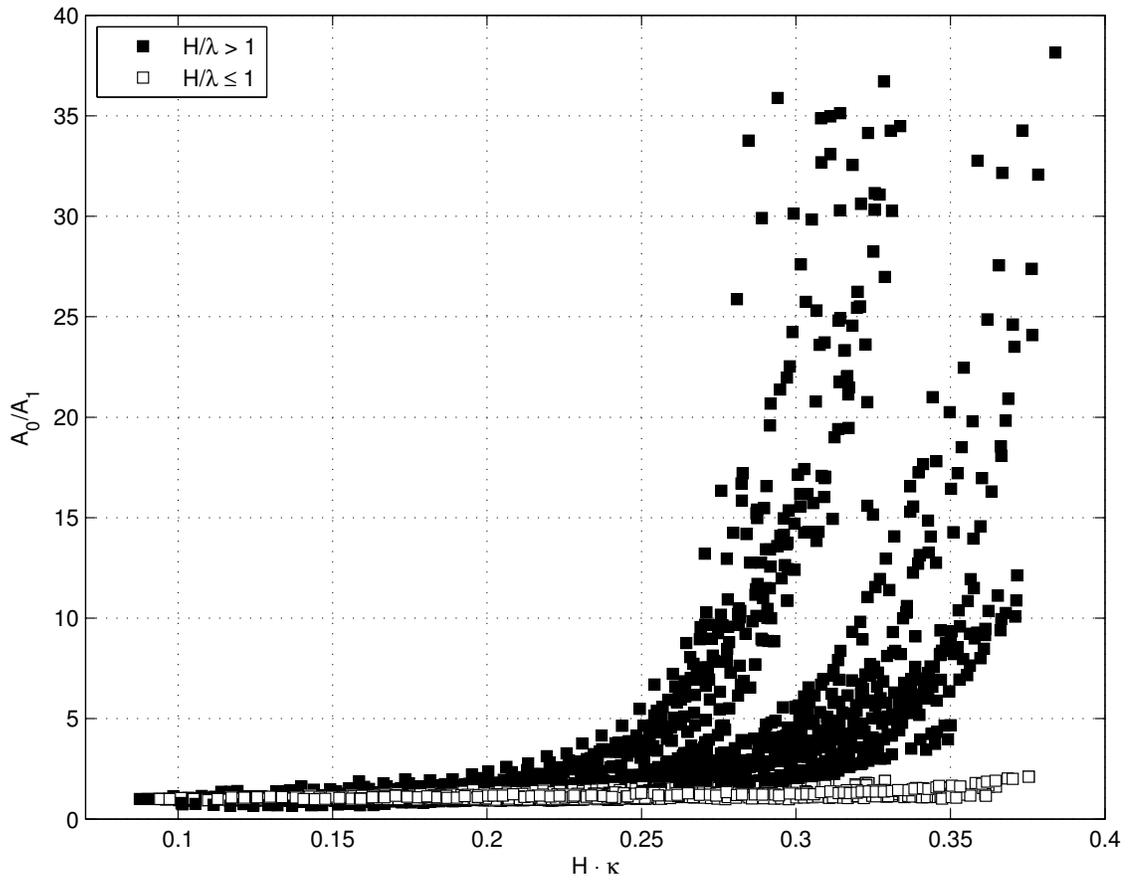


Figura 4.5: Gráfico de razón de amplitudes versus el parámetro de compresión para $H/\lambda > 1$ y $H/\lambda \leq 1$.

Para longitudes de onda similares al espesor del sustrato, se aprecia una gran diferencia en relación de los otros datos, específicamente para $H/\lambda \leq 1$ se observa un comportamiento parecido en todo el rango de datos con un error medio

de ± 1 en la razón de amplitudes y muestra la poca probabilidad de presencia de pliegues a mayor compresión. Considerando el cambio en la curva de compresión al aumentar desde 1 a 1.0035 el parámetro de penetración H/λ (curva inferior gráfico fig. 4.6) y que en el límite $H/\lambda \rightarrow 0$ físicamente no se tiene una interfase, la razón $A_0/A_1 \rightarrow 1$ para todo $H \cdot \kappa$, se asume que cuando el espesor del sustrato es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda, la interfase no mostraría pliegues por medio de compresión. Por otro lado, dado que para $H/\lambda > 1$ la razón de amplitudes crece rápidamente, las curvas en relación del parámetro de penetración no muestran una relación fundamental clara para las variables, aun así se puede observar lo siguiente

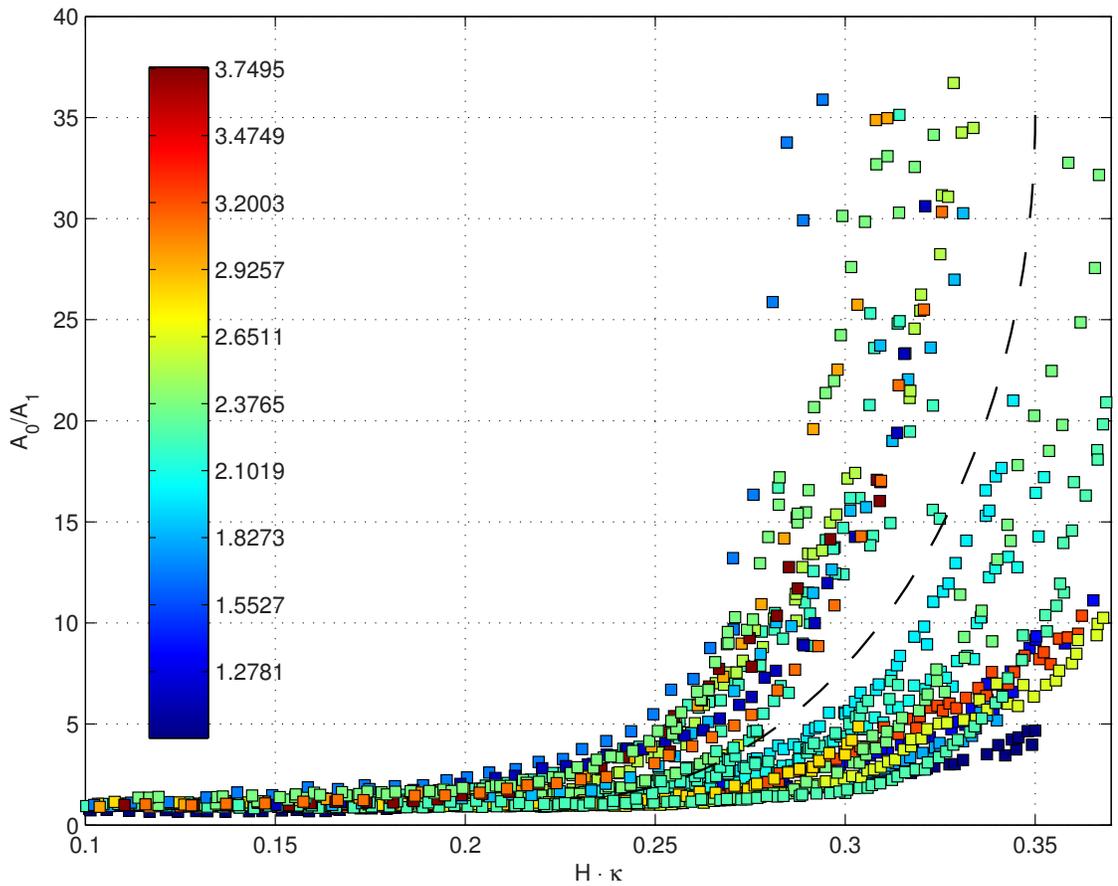


Figura 4.6: Gráfico de razón de amplitudes versus el parámetro de compresión para diferentes H/λ mayores que 1.

Enfocado en los datos para $H/\lambda > 1$ y en escala de colores desde $H/\lambda = 1,0035$ (Azul oscuro) a $H/\lambda = 3,7495$ (Rojo oscuro), se aprecia como en todo el rango de datos existen dos comportamientos diferentes para una misma configu-

ración, es decir, al observar la tendencia de las curvas ante el parámetro de penetración en el gráfico de la fig. 4.6, hay dos principales aproximaciones, una sobre y otra debajo la línea discontinua, con una serie de valores presentes en ambas zonas, concluyendo en la posibilidad de tener comportamientos para regímenes de poca y alta profundidad del sustrato, lo que se diferencia del hecho que para $H/\lambda \sim 1$ se presenta una condición de no existencia de pliegues al no haber espacio suficiente para que la arrugas evolucionen con la compresión, lo que a la vez se traduciría en que tampoco existiría una compresión crítica.

Capítulo 5

Conclusión

Del presente trabajo se puede concluir que el sustrato de gel en base a la combinación del polímero SIS (Styrene Isoprene Styrene en inglés) y aceite mineral, resulta un material lo suficientemente reproducible para la experimentación de interfases complejas con sustratos sólidos. Así mismo, la relación entre longitud de onda de las arrugas y razón de constantes elásticas de las componentes que forman la interfase, resulta adecuarse tanto a la teoría de nano y macro escala para sustratos líquidos, como en este caso, a macroescala con sustratos sólidos, específicamente para razones de módulos elásticos entre $63 < \frac{G_m}{G_s} < 403$,

asumiendo un intercepto nulo se encontró la pendiente para la ecuación 2.11 de $(4,671 \pm 0,314)$ intervalo que contiene a 4,357, valor el cual corresponde a $2\pi \left(\frac{(1-\nu_s^2)}{3(1-\nu_m^2)} \right)^{1/3}$ con un mismo $\nu = 0,5$ para materiales isotópicos incompresible. En cuanto a las curvas de compresión, basados en los resultados experimentales, se estima que cuando se cumple que $H \gg \lambda$ existe un parámetro de compresión Δ_c crítico, el cual de acuerdo al montaje en la figura 3.2 corresponde a un $(H\kappa_c)$ crítico, en donde la razón de amplitudes A_0/A_1 crece bruscamente, a la vez, corroborando en las figuras 3.3 y 4.4 (a, se entiende el comportamiento del perfil de compresión, en el cual por el espacio que utiliza el sustrato de gel y debido a que el desplazamiento del sustrato ante la compresión es tanto radial como angular, se intuye que cuando se observan pliegues en el sistema la progresión de las arrugas es a una amplitud nula.

En los estudios del parámetro de penetración H/λ notamos del gráfico en la figura 4.5 que existe una diferencia importante para $H/\lambda \leq 1$, o mas bien, para las curvas de compresión, en donde el espesor del sustrato es menor o igual que la longitud de onda de las arrugas, no hay un mayor crecimiento de la razón de amplitudes ante la compresión, no así como en su contraparte, la cual muestra un comportamiento dual, notando en el gráfico en la figura 4.6, que existen dos valores de la razón de amplitudes A_0/A_1 para un mismo parámetro de compresión

$H \cdot \kappa$, entendiéndose en un principio que para $H/\lambda \leq 1$ no hay suficiente espacio en el sustrato de la interfase para que las arrugas evolucionen a pliegues, y así mismo para $H/\lambda > 1$, se entiende un fenómeno similar, en el cual las arrugas sienten el fondo de la interfase dando lugar a regímenes de poca y alta profundidad, en donde el espesor de la lamina de goma se encuentra considerada en la relación lineal que tiene con la longitud de onda de las arrugas, describiendo tal nexo.

Se espera que en trabajos futuros sea posible deducir de primeros principios la expresión utilizada en este proyecto de tesis, con el fin de poder explicar el colapso de las curvas del gráfico de la figura 4.6 utilizando los parámetros adimensionales ya definidos (A_0/A_1 , H/λ , $H \cdot \kappa$) y de esta manera encontrar de mejor forma la transición de arrugas a pliegues y los fenómenos involucrados.

Bibliografía

- [1] Stafford, C. et al., buckling-based metrology for measuring the elastic moduli of polymeric thin films. *Natural Materials* 2004.
- [2] Edwin P. Chan, Erica J. Smith, Ryan C. Hayward, and Alfred J. Crosby, Surface Wrinkles for Smart Adhesion. *Science* 320, (2008).
- [3] Xi Chen and Jie Yin, Buckling patterns of thin films on curved compliant substrates with applications to morphogenesis and three-dimensional micro-fabrication. *Soft Matter*, 6, (2010).
- [4] J. Yin, E. Bar-Kochba and X. Chen, *Soft Matter*, 2009, 5, 3469-3474.
- [5] L. Wang, C. Pai, M. C. Boyce and G. C. Rutledge, *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94, 151916.

- [6] John A. Rogers, et al. Materials and Mechanics for Stretchable Electronics. Science 327, 1603 (2010).
- [7] Dae-Hyeong Kim, Jong-Hyun Ahn, Won Mook Choi, Hoon-Sik Kim, Tae-Ho Kim, Jizhou Song, Yonggang Y. Huang, Zhuangjian Liu, Chun Lu, John A. Rogers, Stretchable and Foldable Silicon Integrated Circuits.
- [8] Landau - Lifshitz, Teoría de elasticidad, Física Teórica volumen 7, editorial Reverté.
- [9] Cerda, E., Mahadevan, L.; Geometry and Physics of Wrinkling. Phys. Rev. Lett. 90, 074302(2003).
- [10] Sultan, E., Boudaoud, A.; The buckling of a swollen thin gel layer bound to a compliant substrate. Journal of Applied Mechanics 2008.
- [11] Pocivavsek L., Leahy B., Holten-Andersen N., Lin B., Lee K.Y., and Cerda E., Geometric tools for complex interfaces: from lung surfactant to the mussel byssus, Soft Matter, 5, 1963 (2009).