

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
DEPARTAMENTO DE FISICA



**CARACTERIZACIÓN DE LA SEGREGACIÓN
GRANULAR EN UN MEDIO BIDISPERSO SECO**

IGNACIO JAVIER CALDERÓN LILLO

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
DEPARTAMENTO DE FISICA



CARACTERIZACIÓN DE LA SEGREGACIÓN GRANULAR EN UN MEDIO BIDISPERSO SECO

IGNACIO JAVIER CALDERÓN LILLO

Profesor Guía: Dr. Francisco Melo

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

SANTIAGO DE CHILE

SEPTIEMBRE 2014

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
DEPARTAMENTO DE FISICA



CARACTERIZACIÓN DE LA SEGREGACIÓN GRANULAR EN UN MEDIO BIDISPERSO SECO

IGNACIO JAVIER CALDERÓN LILLO

Profesor Guía : Dr. Francisco Melo

Profesores Comisión : Dr. Francisco Vivanco.

: Dr. Daniel Serafini.

: Dr. Iaroslav Ispolatov.

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

SANTIAGO DE CHILE

SEPTIEMBRE 2014

“CARACTERIZACIÓN DE LA SEGREGACIÓN
GRANULAR EN UN MEDIO BIDISPERSO SECO ”

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

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

SANTIAGO DE CHILE

SEPTIEMBRE 2014

“CARACTERIZACIÓN DE LA SEGREGACIÓN
GRANULAR EN UN MEDIO BIDISPERSO SECO”

IGNACIO JAVIER CALDERÓN LILLO

Este trabajo de Graduación fue preparado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Francisco Melo H., del Departamento de Física y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora del candidato, Dr. Francisco Vivanco, Dr. Daniel Serafini y Dr. Iaroslav Ispolatov.

.....
Dr. Francisco Vivanco

.....
Dr. Daniel Serafini

.....
Dr. Iaroslav Ispolatov

.....
Yolanda Vargas
Directora

.....
Dr. Francisco Melo
Profesor Guía

©Ignacio Javier Calderón Lillo.

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.

*Dedicado a
mis padres...*

Agradecimientos

A mis amigos del colegio, Juan, Jorge, Leonardo, Sebastian F., Sebastian G., Miguel, Natalia, Jeanette, Daniela. Me hace feliz saber que los años pasan y seguiremos siendo los amigos de siempre.

A mis compañeros de universidad con los que compartí tantos años de estudios, marchas, almuerzos y risas, especialmente a Manuel S., Manuel N., Claudia, Eduardo, Nicolás, Rodrigo, Patricia, Susana, Sebastian, José Miguel, María y muchos más.

A Cecilia, con quien nos hemos acompañado en cada ocasión desde el principio, en buenos, malos y peores momentos, no hay forma de describir la complicidad y la química que hemos desarrollado, a ella solo puedo darle gracias y seguir dándole todo mi amor.

Al equipo del laboratorio de Física No-Lineal, a todos y cada uno de ellos, por las conversaciones, consejos, ayudas, etc. Le agradezco a María, José Miguel, Alejandro, Erika, Leonardo, Gonzalo, Nelson, Belfor, Sebastián, Oscar, Víctor, Manuel, Felipe, Antonella, Romina, Nicolas, Francisco. Debo agradecer especialmente a Javier y mas que nada al profesor Francisco Melo, por darme la oportunidad de trabajar en su laboratorio, y tambien a su visión y estructuración del problema, discusiones, y preguntas, todo aquello fue lo que le dio vida a este trabajo.

Pero todo camino parte con el primer paso, por lo que el mayor agradecimiento es para mis padres, Reinaldo y Sandra. También a mis abuelos María, Gladys, Gerardo y mi difunto abuelo Sergio, no tengo palabras para agradecerles por todo lo que han hecho por mi. A mis hermanos Felipe y Javiera, crecer con ustedes dos a mi lado, fue un privilegio en el completo sentido de la palabra. Y especialmente a mi sobrino, Diego, que con su risa, juegos, bromas y preguntas me llena de felicidad y me da ánimos para siempre seguir adelante.

Tabla de Contenido

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Tabla de Contenidos	III
Índice de tablas	V
Índice de Ilustraciones	VII
Resumen	VIII
1 Introducción	1
1.1 Introducción	2
1.1.1 Hipótesis	5
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo General	6
1.2.2 Objetivos específicos	6
1.3 Estado del arte	7
1.4 Propiedades de los Granos utilizados	9
2 Segregación Granular	16
2.1 Consideraciones iniciales	17

2.2	Montaje Cizalle puro	20
2.3	Efectos de la amplitud en Cizalle puro	24
2.4	Efectos del tamaño de capa	27
2.5	Montaje Estiramiento Uniaxial	29
2.6	Deformación Uniaxial	31
2.7	Modelo de segregación	34
3	Estructuras Granulares	37
4	Proyecciones y Conclusiones	44
4.1	Proyecciones	45
4.2	Conclusiones	46
A	Preparación del Experimento	48

Índice de tablas

1.1	Resumen Medición de diámetros	10
1.2	Resumen Avalanchas	12
1.3	Resumen Cohesión	14

Índice de Ilustraciones

1.1	Patrones Reportados por Kessler	2
1.2	Histogramas de Diámetros	9
1.3	Montaje ángulos avalancha	10
1.4	Ángulos de Avalancha	11
1.5	Montaje medición Cohesión	12
1.6	Puente Capilar	14
1.7	Resumen Curvas de Cohesión	15
2.1	Fotografías mezcla granular	17
2.2	Diagrama lateral muestra	19
2.3	Diagramas Cizalle puro	20
2.4	Diagrama Montaje de Cizalle	21
2.5	Montaje Cizalle puro	22
2.6	Gráficos Deformaciones	24
2.7	Ajuste de Deformación	25
2.8	Segregacion por espesor	27
2.9	Ajuste de espesores	28
2.10	Diagrama de estiramiento uniaxial	30
2.11	Deformaciones Uniaxiales	31
2.12	Ajustes deformaciones uniaxiales	33
2.13	Deformaciones Uniaxiales vs Cizalle	33

2.14 Diagrama de dos capas	34
2.15 Comportamiento modelo de Segregación	36
3.1 Estructuras Granulares	38
3.2 Estructuras Granulares marcadas	39
3.3 Comparación Campos de Desplazamiento	40
3.4 Localización Desplazamientos	41
3.5 Comparación Campos de Cizalle	42

Resumen

En este trabajo de titulación, se estudió el efecto de la deformación sobre la segregación en un medio granular bidisperso mezclado seco. Se estudió la respuesta de una muestra granular bidispersa mezclada a diversos ensayos donde se controló la amplitud de deformación, el espesor de la capa y el tipo de deformación (cizalle puro y estiramiento uniaxial) todo esto con la finalidad de visualizar el crecimiento de patrones de segregación localizada.

En el capítulo 2 se describe la dinámica de segregación del sistema en todos los casos estudiados. Se desarrolló un modelo de segregación para el caso de estiramiento uniaxial que captura el comportamiento observado de la segregación granular.

Por otra parte, en el capítulo 3, se reportan estructuras de segregación localizada, una hipótesis surge de esto, según la cuál las estructuras son formadas por una competencia entre la segregación por cizalle y la no-segregación por cohesión. Es de esta competencia que el cizalle se localiza en bandas y provoca segregación localizada, formando patrones que dependen del tipo de deformación aplicada a la muestra.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Los materiales granulares se encuentran presentes en una amplia gama de industrias y disciplinas tan variadas como geofísica, construcción, minería, agricultura, alimentos, etc. Es por esto que una caracterización de su comportamiento en distintas situaciones puede tener un profundo impacto en diversas áreas.

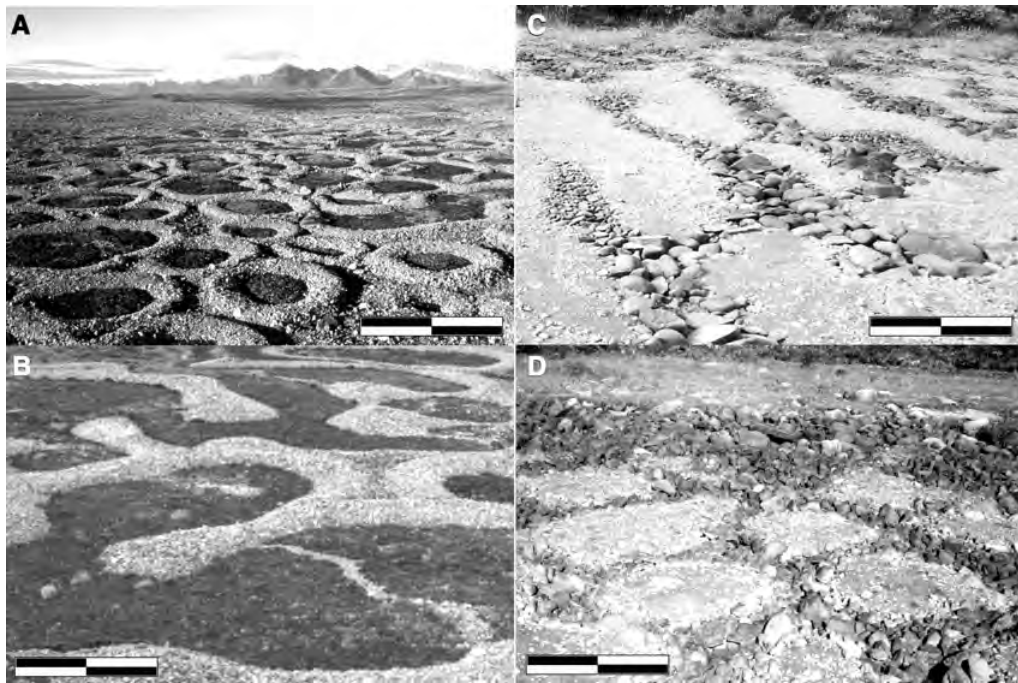


Figura 1.1: Patrones geológicos reportados por Kessler [1]. En A se observan estructuras circulares. En B, estructuras de franjas. En C, se ven estructuras de tipo islas. En D se reportan estructuras poligonales.

Además, su comportamiento es aún materia de investigación, en especial de los medios granulares bidispersos - [2, 3, 4]- aún un modelo de segregación universal no ha probado ser exitoso.

En particular, en el área de la geología y de la geofísica, pueden ayudar a un mejor entendimiento del comportamiento de la corteza terrestre.

Un ejemplo de la dinámica de flujo granular es la presencia de patrones geológicos que han sido encontrados en diversas zonas frías de la tierra (Antártica, Siberia, Noruega, etc) que se muestran en 1.1. El origen de estos patrones es aún materia de debate en parte debido a las dificultades técnicas para reproducir las condiciones naturales en un laboratorio. En estas zonas existe un sustrato de permafrost (o sea, suelo permanentemente congelado) que cuando caen precipitaciones (agua o nieve) y las temperaturas descienden, tiende a expandirse (por su composición de agua) y en caso contrario, en la estación cálida el agua en la superficie se derrite y el permafrost tiende a comprimirse. Este proceso, se repite año a año, provocando un efecto de compresión/dilatación cíclico sobre la superficie. En la presente tesis se propone que el movimiento producido por el cambio en la compresibilidad del suelo es el motor de la formación de estos patrones.

Un aspecto importante del estudio es la formación de bandas de cizalle. Una banda de cizalle es una zona donde los esfuerzos de corte se concentran en el material, al punto de provocar fallas en el medio y de esta forma, se movilizan granos selectivamente, provocando una segregación localizada. También, se ha mostrado mediante simulaciones [3] que una mezcla bidispersa bajo excitaciones cíclicas puede formar estructuras.

Es en parte por lo anteriormente expuesto que es difícil encontrar una solución al problema de los patrones geológicos. Por otro lado, es muy difícil la observación de una banda de cizalle, que es una estructura capaz de movilizar granos en la muestra, principalmente porque estas bandas suelen crearse en el interior de la muestra y no en la superficie. Sin embargo, con el montaje utilizado en este

trabajo, es posible la observación de este fenómeno y como también lo es el reproducir el comportamiento cíclico del fenómeno descrito anteriormente.

1.1.1 Hipótesis

Si bien, en el fenómeno de los patrones geológicos pueden intervenir una gran cantidad de variables (composición del suelo, forma de las rocas, etc.) se decidió explorar los medios granulares bidispersos, ya que se ha establecido anteriormente [2] que el coeficiente de fricción estático en una mezcla con dos tamaños de granos (100 y $200 \mu m$) varía de forma no trivial según la concentración de la mezcla hecha, con un máximo a una concentración de $50 - 50\%$ (Medido como porcentaje en masa).

La hipótesis de este trabajo viene dada de lo anterior, ya que cuando la muestra sea sometida bajo deformaciones de cizalle puro, al ser friccionados entre ellos, los granos intentarán minimizar el coeficiente de fricción entre ellos, generando así una segregación localizada en bandas de cizalle en la superficie del material.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudiar el efecto de la deformación cíclica impuesta en el plano sobre una muestra de material granular bidisperso. Para ello, se hicieron diversos experimentos, principalmente bajo la deformaciones de tipo cizalle puro.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseño de un dispositivo experimental para estudiar los efectos de las deformaciones cíclicas de cizalle puro y estiramiento uniaxial en medios granulares bidispersos.
- Caracterizar los efectos de segregación en función del tipo de deformación.
- Cuantificar los efectos la amplitud de la deformación en la segregación de muestras bidispersas.
- Identificar y modelar los parámetros críticos asociados a la respuesta de los medios granulares bidispersos bajo estiramiento y cizalle.

1.3 Estado del arte

En esta sección, se muestra una revisión de la literatura indispensable para el desarrollo de este trabajo.

Kessler [1] presenta un modelo computacional de cómo podrían originarse los patrones geológicos presentados en la figura 1.1, éstos son explicados a través de procesos de auto-organización ligados a la concentración de rocas y a los cambios de compresibilidad del suelo. Se presentan resultados de simulaciones en los que se reproducen las estructuras poligonales observadas en la corteza terrestre y mostrados en la figura 1.1.

Estructuras en medios granulares han sido reportadas anteriormente, por ejemplo en el artículo [3] donde se muestra -a través de simulaciones de dinámica molecular- que una muestra bidispersa de granos (de igual tamaño pero distinta densidad) al ser excitada de forma horizontal y periódicamente, puede formar estructuras definidas, cuya forma varía según la manera en que se estimulan los granos.

Por otra parte, se ha reportado en la literatura [2] que el efecto de formar una mezcla con granos de distinto tamaño, tiene una fuerte influencia en el coeficiente de fricción dinámico y estático, haciendo que aumenten y que varíen de forma no trivial en función de las distintas concentraciones estudiadas.

La segregación en medios granulares fue en principio atribuida sólo a los efectos convectivos, es por ello que cuando se hacen vibrar granos se puede inducir segregación, tanto si la vibración es vertical como horizontal, sin embargo, el efecto más llamativo ocurre verticalmente y se ilustra en BNE, además con

el paso del tiempo se mostró que no es necesario que exista convección para tener segregación, sino que basta con fluidizar el medio. También, estudios muy recientes [4] han mostrado que no sólo vibración sino que también el cizalle son capaces de inducir segregación y se puede ver hasta convección. En [4] se estudió el efecto de los ciclos de cizalle (en una celda cuadrada con base rotatoria) sobre la segregación de una muestra bidispersa mezclada compuesta por granos de distinto tamaño y se comparó con el efecto de un cizalle constante. La principal conclusión es que al ser cizallado cíclicamente, el sistema segrega sobre una amplitud crítica, bajo la cual la segregación se suprime.

Para medir la segregación, se utilizará un indicador de segregación que se definirá en el capítulo 2, este indicador es la fracción de empaquetamiento, y estará normalizada por la fracción de empaquetamiento del estado *Random Close Packing (RCP)* en 2 dimensiones, el cual fue definido en [5] donde se calculó que corresponde a $\Phi_{RCP-2D} \approx 0,84$ para círculos monodispersos, lo que contrasta con el valor en tres dimensiones que es $\Phi_{RCP-3D} \approx 0,64$, es decir una fracción mucho mas pequeña.

En comparación, este trabajo estudió la segregación en un material granular bidisperso, tal como [4]. Sin embargo, se utilizó un montaje diferente, ya que (como se mostrará mas adelante) el montaje utilizado en este trabajo permite la imposición de una deformación de cizalle puro en el plano y no sólo en la base. Si bien en [4] se estudió la influencia de los ciclos de cizalle en la segregación, se hizo con una celda de base rotatoria, por lo que la dinámica de los granos no necesariamente será igual, es decir, este trabajo es novedoso, ya que no existe un trabajo que investigue la segregación debido a deformaciones por cizalle puro ni deformaciones uniaxiales en el plano.

1.4 Propiedades de los Granos utilizados

Los granos utilizados en los diversos experimentos, están compuestos de bronce. Estos fueron caracterizados, determinando su distribución de tamaños y sus ángulos de avalancha, además de la cohesión de los distintos tipos de muestras, para verificar que se realizan experimentos bajo un régimen no-cohesivo.

Para la caracterización del tamaño de los granos, se utilizó un programa de análisis de imágenes para la detección de bordes de objetos circulares, implementado en Labview. Luego todos los granos detectados fueron revisados manualmente para cerciorarse que la identificación del diámetro es correcta. Los granos contados fueron ≈ 3000 en los granos pequeños y ≈ 7000 en los granos grandes, los resultados de estas mediciones son mostradas en la figura 1.2, y resumidos en la tabla 1.1.

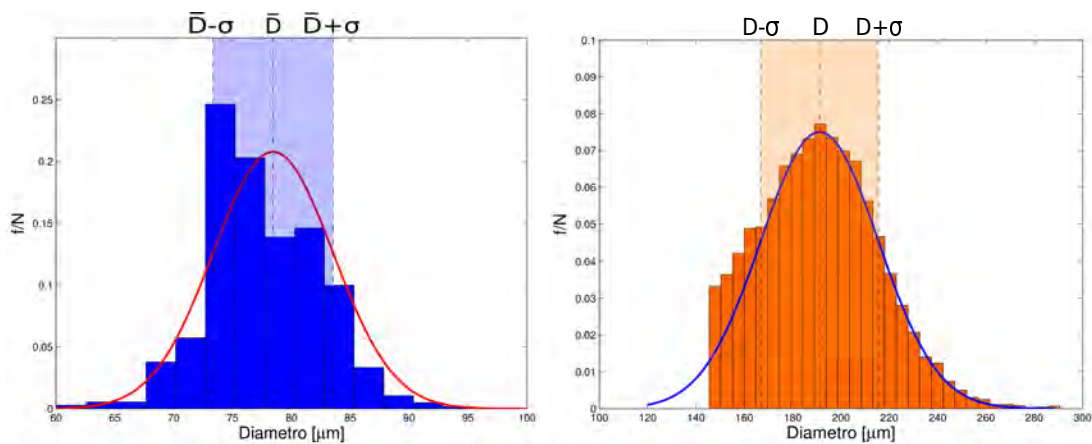


Figura 1.2: Distribuciones de tamaño para los dos tipos de granos utilizados

Granos	Diametro [μm]	3σ [μm]
Pequeños	78	15
Grandes	191	55

Tabla 1.1: Resumen Medición de diámetros

Los ángulos de avalancha, son un indicador de la fricción interna del material granular, ya que refleja el ángulo mas alto para el cual el material es capaz de sostenerse a si mismo. Para la medición de estos ángulos, se utilizó el montaje de avalanchas de la figura 1.3. Para medir, se pegaron granos en la base de esta celda (del tipo de granos que se estuviese midiendo) para que el ángulo de avalancha refleje el ángulo al que la fricción interna de los granos (y no del contacto grano-acrílico). En este caso, los granos fueron secados antes de realizar las mediciones (siguiendo el protocolo especificado en el apéndice A), por lo que se trata de un indicador de la fricción del material al no haber cohesión.

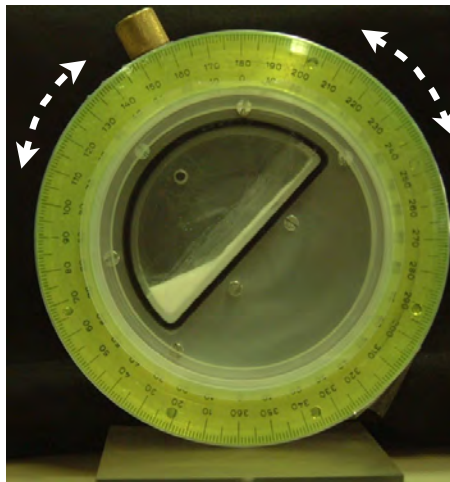


Figura 1.3: Montaje para la medición de los ángulos de avalancha.

En la tabla 1.2 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para las avalanchas, y en la figura 1.4 se muestran a la izquierda, el ángulo de avalancha

respecto a la concentración de granos grandes, de acuerdo a [2], y a la derecha los histogramas de las mediciones realizadas en cada caso.

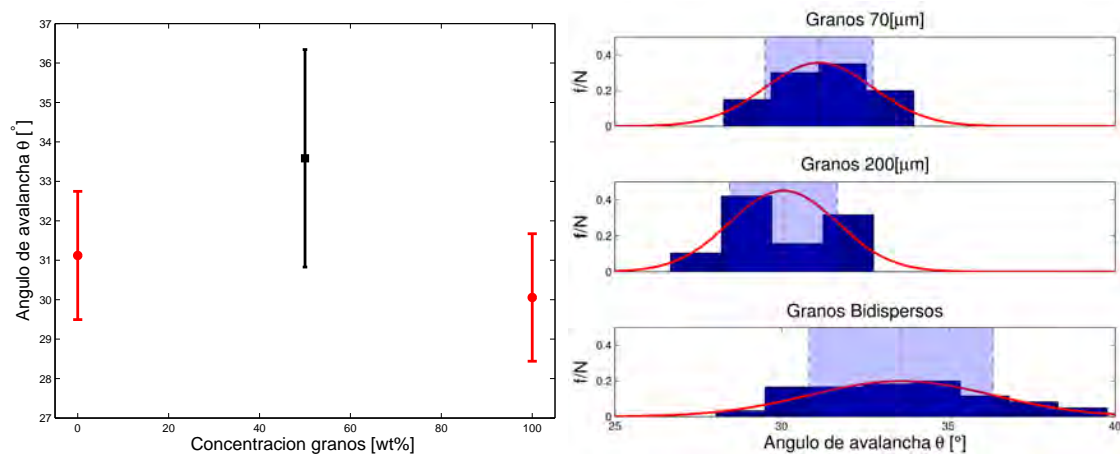


Figura 1.4: Resultados de ángulos de avalancha. A la izquierda el ángulo de avalancha v/s. la concentración en masa (granos grandes en granos chicos). A la derecha, los histogramas de los resultados obtenidos para cada caso.

Cabe destacar que estos resultados son coherentes con lo planteado en [2], ya que se observa un aumento del coeficiente de roce del material en un medio bidisperso, esto, debido a que al mezclar dos tamaños distintos de partículas, es posible llenar un mayor porcentaje del espacio ocupado por la muestra, aumenta la cantidad de contactos en el material, y con ello la fricción interna de este.

Se observa también que la muestra bidispersa tiene un error mayor que las monodispersas, esto es debido a que cuando se introduce en la celda de avalanchas, y cada vez que se realiza una medición, el sistema segrega, y si bien luego de cada medición se intentaba volver a mezclar, es muy difícil dejar los granos homogéneamente distribuidos, lo que genera una mayor dispersión respecto a las otras muestras.

Tamaño [μm]	Ángulo [θ°]	Ensayos
78	31 ± 2	20
191	30 ± 2	19
Mezcla	34 ± 3	60

Tabla 1.2: Resumen resultados de ángulos de avalancha. La mezcla está hecha 50 % – 50 % en masa de cada tipo de grano.

Por otro lado, se midió la cohesión de los granos tanto individualmente como mezclados en una proporción 50 % – 50 % en masa, obteniéndose los resultados de la tabla 1.3 y los histogramas de la figura 1.7. En la tabla 1.3, se presentan los valores de la cohesión σ_c medida, la cohesión que se mediría de existir puentes capilares en el material (σ_w), así como la comparación entre la comparación entre ambas. Se observa que la cohesión medida es del orden de $\sim 10^3$ veces menor que la que existiría si el material estuviese húmedo.

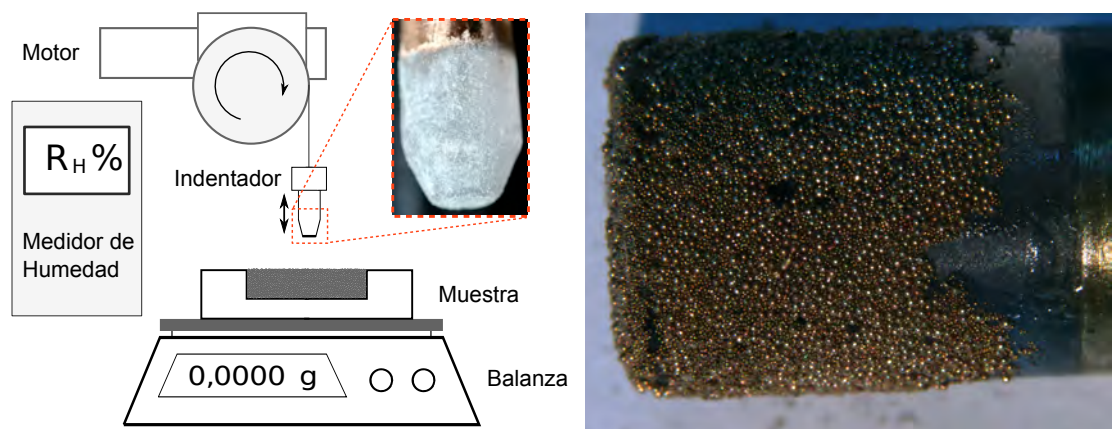


Figura 1.5: A la izquierda: Diagrama del montaje para la medición de la cohesión. A la derecha: Identador usado para la mezcla de granos bidispersa.

Las mediciones de cohesión se realizaron depositando una muestra de granos en una balanza con una resolución de $\Delta m = 0,0001[gr]$ y una velocidad de muestreo de $f = 5[Hz]$. Luego se penetraba la muestra utilizando un indentador con granos pegados a este tal como se muestra en la figura 1.5, y dejando que envejezca durante 5 minutos para generar el contacto grano-grano, luego se retira a una velocidad $v = 3[\mu m/s]$ y se registran las curvas de la masa mediante un programa de LabView. La masa es posible transformarla a un esfuerzo de cohesión mediante la expresión:

$$\sigma_c = \frac{4mg}{\pi D_I}. \quad (1.1)$$

Esta curva, es básicamente la presión con la que el indentador está tirando de la muestra, y de donde se obtiene el mínimo de la curva, el cual corresponde al valor de la cohesión de la muestra (ya que es la fuerza a la cual se despega el indentador de la muestra) seguido de un proceso de relajación de los granos hasta llegar a cero.

Para comparar la cohesión medida con la generada por humedad a través de puentes capilares, se puede utilizar la ecuación de Laplace, según la cual: $P = \gamma(1/r_1 + 1/r_2)$ para calcular esa cohesión, se puede utilizar la imagen 1.6, según la cual:

$$(R + r_2)^2 = (r_2 + r_1)^2 + (R + d)^2.$$

De donde, considerando que $r_2 \gg r_1$, y que $d = l/2$ (siendo l la distancia entre dos granos), se obtiene la expresión:

$$r_2 = \frac{l^2 + 4Rl}{8R}.$$

De acá, se puede calcular la cohesión producida por un puente capilar:

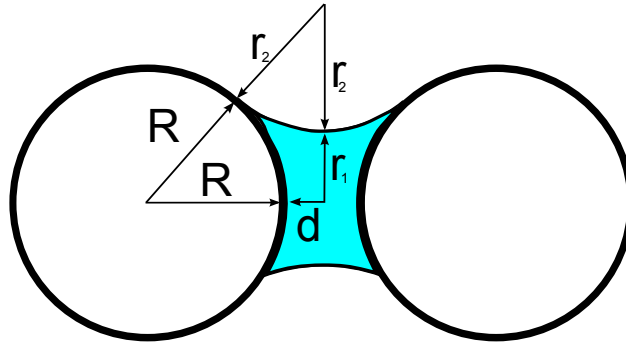


Figura 1.6: Diagrama de la estructura de un puente capilar entre dos granos.

$$\sigma_{cap} = \frac{\gamma}{r_2} = \frac{8\gamma R}{l^2 + 4Rl}$$

Finalmente, considerando que el tamaño del grano es mucho mayor que las rugosidades en las que puede acumular humedad (*i.e.* : $R \gg l$) se tiene que:

$$\sigma_{cap} = \frac{8\gamma}{R}$$

<i>Particula</i> [μm]	σ_c [<i>Pa</i>]	Rango [<i>Pa</i>]	σ_w [<i>kPa</i>]	σ_w/σ_c
78	$1,3 \pm 0,3$	[0,9 – 1,8]	14,8	$11 \cdot 10^3$
191	$1,0 \pm 0,4$	[0,3 – 1,5]	6,0	$6 \cdot 10^3$
Mezcla	$6,0 \pm 0,8$	[4,8 – 7,5]	4,3	$0,7 \cdot 10^3$

Tabla 1.3: Resumen de los resultados de cohesión σ_c , además de la comparación con la cohesión por un puente capilar σ_w . La mezcla fue hecha 50% – 50% en masa de cada tipo de grano.

Es decir, los granos utilizados, son muy poco cohesivos, además, al ser granos metálicos y al ser secados, son poco propensos a tener efectos electrostáticos.

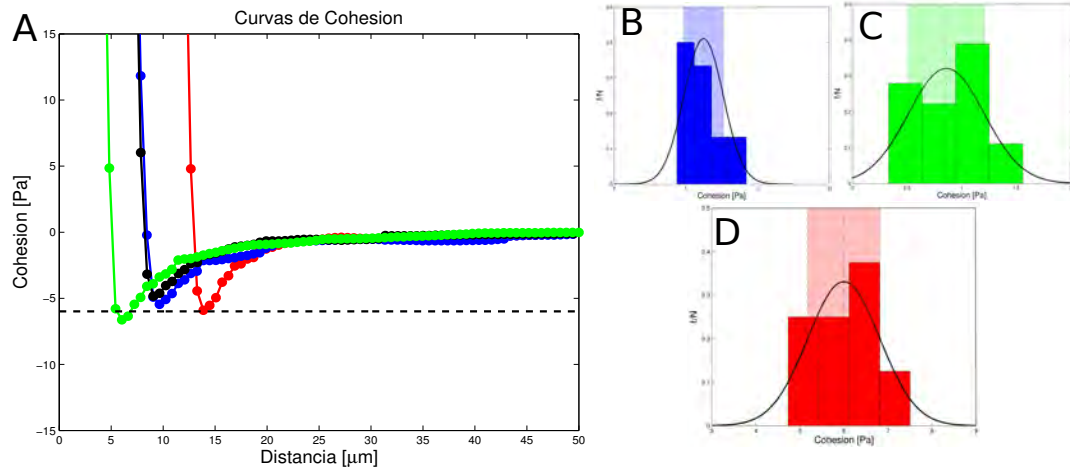


Figura 1.7: Resumen de Curvas de Cohesión. En A: Curvas típicas en la medición de la cohesión. B, C y D Histogramas de la medición de cohesión. En B granos de $\bar{D}_p = 78[\mu m]$, en C granos de $\bar{D}_G = 191[\mu m]$, y en D una mezcla en una proporción 50 % – 50 % en masa

Finalmente, sobre las propiedades de los granos, se puede decir que se trabajó con granos que tienen un contraste de $D_G/D_p = 191/78 \approx 2,4$, que cumplen con lo expuesto por [2] en cuanto a sus propiedades de fricción interna, ya que el ángulo de avalancha del material llega al máximo al estar mezclados en una proporción de 50 – 50% en masa y que además son granos muy poco cohesivos, ya que al comparar la cohesión que sienten con la producida por puentes capilares, se encuentra que es alrededor de 3 ordenes de magnitud menor que ésta.

Capítulo 2

Segregación Granular de una muestra Bidispersa mezclada

2.1 Consideraciones iniciales

En este capítulo se presentarán los resultados del estudio de la segregación en un medio granular bidisperso mezclado no cohesivo.

Para realizar este estudio, una muestra bidispersa mezclada se sometió a una serie de ensayos para su respuesta a la deformación bajo estiramiento uniaxial y principalmente cizalle.

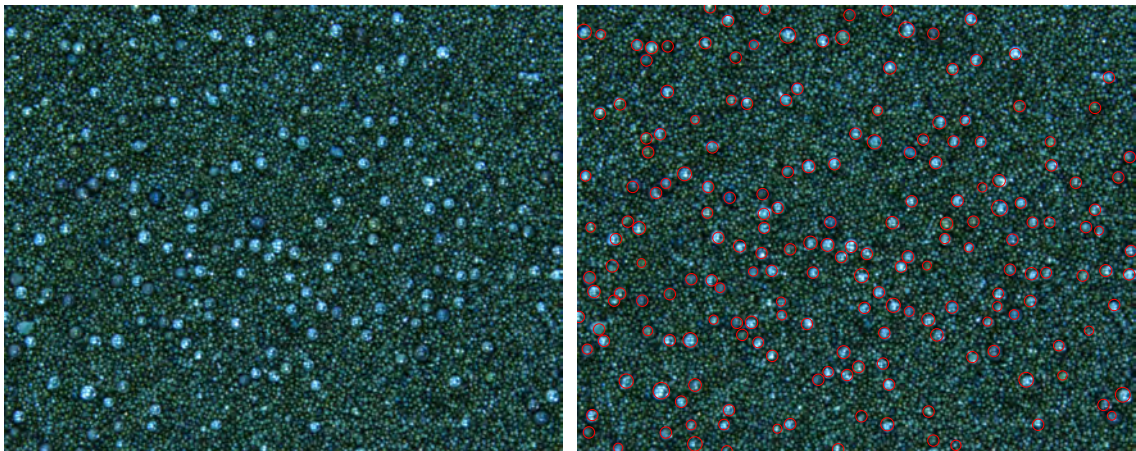


Figura 2.1: Micrografía típica del estado inicial de una muestra bidispersa mezclada. A la izquierda: Una sección del 16% del área original de la foto, se pueden observar las diferencias entre los granos gruesos y los finos. A la derecha: La misma sección de la fotografía con círculos rojos en el lugar donde se detectaron los distintos granos grandes.

Para esto, primero se debe definir el concepto de segregación en un medio granular. La segregación es el proceso contrario al mezclado, es decir, la separación de una mezcla en los distintos tipos de granos que la constituyen. Esta separación puede ser debido a diferencias de tamaños o su forma, densidad, etc.

Como indicador de la segregación se utiliza la fracción de empaquetamiento en 2D. Ésta se define en dos dimensiones como la fracción de superficie ocupada por un medio granular, es decir:

$$\Phi = \frac{A_{ocupada}}{A_{total}}$$

De acuerdo a nuestras observaciones, como la mezcla tiende a separarse verticalmente, con los granos grandes en la superficie libre y los pequeños en la base (al ser granos del mismo material pero distinto tamaño), el empaquetamiento se calcula como la fracción del área de la fotografía ocupada por granos grandes, y considerando que los granos son esféricos (y que por ende en una imagen se verán circulares), se tiene la expresión:

$$\Phi = \frac{\sum_i \pi r_i^2}{A_{total}} \quad (2.1)$$

Cabe destacar que Φ es una magnitud adimensional, por lo que no dependerá de las unidades utilizadas, esto permite por ejemplo, que el análisis de imágenes se pueda realizar sin convertirlas a unidades reales. Además, de la expresión (2.1) se puede mostrar que Φ es proporcional al número de granos grandes, n , en la superficie de la muestra.

El área total de la función Φ es el tamaño total de la imagen analizada. En general, esto corresponde a imágenes de 3072x3840 (10[MPix]), pero en caso que se indique, se utilizó una ventana del 40 % del lado original, es decir una superficie del 16 % del área original. Una comparación hecha entre la curva obtenida con la imagen completa y la obtenida con la ventana, revela diferencias de 0,6 %, por lo que sin pérdida de generalidad, la población de partículas del área del análisis representa de forma fidedigna el universo de granos para obtener las curvas de segregación.

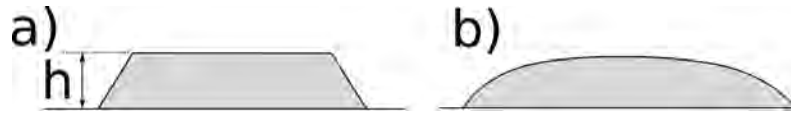


Figura 2.2: Diagrama lateral de la muestra. En a): la muestra original, donde h es el espesor escogido para el experimento. en b) se observa la forma que toma la muestra luego de las deformaciones cíclicas.

Para la adquisición de imágenes, la cámara fue apuntada siempre al centro de la muestra, para evitar efectos de borde, por ejemplo en la figura 2.2, se observa que en b), la muestra tiende a esparcirse y por ende, si la cámara estuviese cerca del borde, una parte importante de la imagen estaría fuera de foco. Por otra parte, mecánicamente, cambiaría la curva, ya que en el centro de la muestra, en el ciclo de compresión de un eje, los granos serán comprimidos por sus vecinos, debido a un movimiento colectivo del sistema; en cambio, si las imágenes fueran tomadas cerca de un borde, los granos observados no sentirían la misma fuerza de compresión por sus vecinos, lo cual afecta la forma en que segrega la muestra. Además, el llenado de la muestra se realizó de forma cuidadosa, siguiendo los pasos descritos en el apéndice A

Para todos los experimentos se utilizó una velocidad constante de deformación $v = 1[mm/s]$.

2.2 Montaje Cizalle puro

Para imponer una deformación de cizalle puro en dos dimensiones, se puede usar un equivalente, que es el ejercer una dilatación sobre la muestra en un eje, mientras se comprime en el otro. Para nuestra propuesta experimental se usó una membrana de látex de $0,5[mm]$ de espesor pre-tensionada, con lo que al traccionar en un eje, impondrá la misma deformación sobre la muestra, y al relajar de la tensión en el otro eje, será equivalente a comprimir los granos en ese sentido, con lo cual, la muestra estará sometida a una deformación de cizalle puro. Para asegurarse que la tensión inicial es la misma en ambos sentidos, se dibuja un cuadrado sobre el centro de la membrana cuando no esta tensa, así, al ser tensada, es fácilmente reconocible si la tensión en ambos sentidos es igual, ya que el dibujo debe mantener su forma.

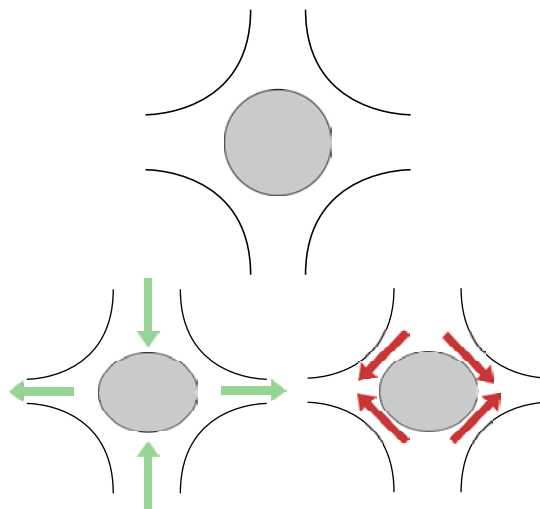


Figura 2.3: Arriba: Configuración cizalle puro. Abajo: equivalencia de tracción-compresión (izquierda, en verde) con Cizalle puro (derecha, en rojo)

El montaje, está compuesto por cuatro piezas hechas de acrílico, montadas sobre dos rieles lineales usando patines con rodamientos que se deslizan

a lo largo de estos. Estas piezas están hechas con forma trapezoidal, con ángulos de 45 grados, y enfrentadas entre ellas, y con un soporte en el interior para evitar que el peso de la muestra deforme la membrana de látex. Dos de las piezas acrílicas (enfrentadas), son empujadas hacia el centro a través de un par de resortes (contra una pared lateral) y son sostenidas en su lugar por el otro par. El par activo, son dos piezas acrílicas, unidas a través de un hilo, el que a su vez está acoplado con el motor servo. De esta forma, si el motor gira hacia un lado, las piezas activas se desplazan hacia afuera, permitiendo que las pasivas vayan hacia el centro, y viceversa.

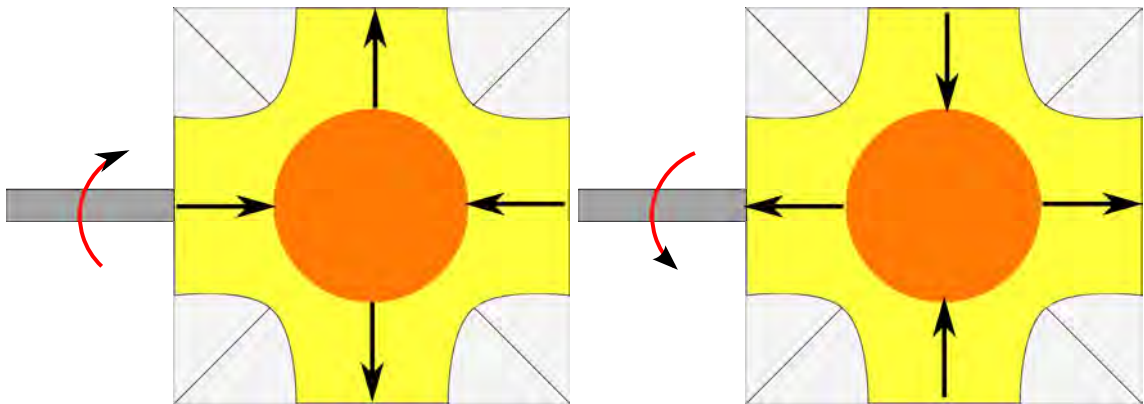


Figura 2.4: Diagrama del montaje de Cizalle. Se muestra la diferencia en el movimiento de los bloques cuando el motor se mueve hacia un lado o hacia el otro.

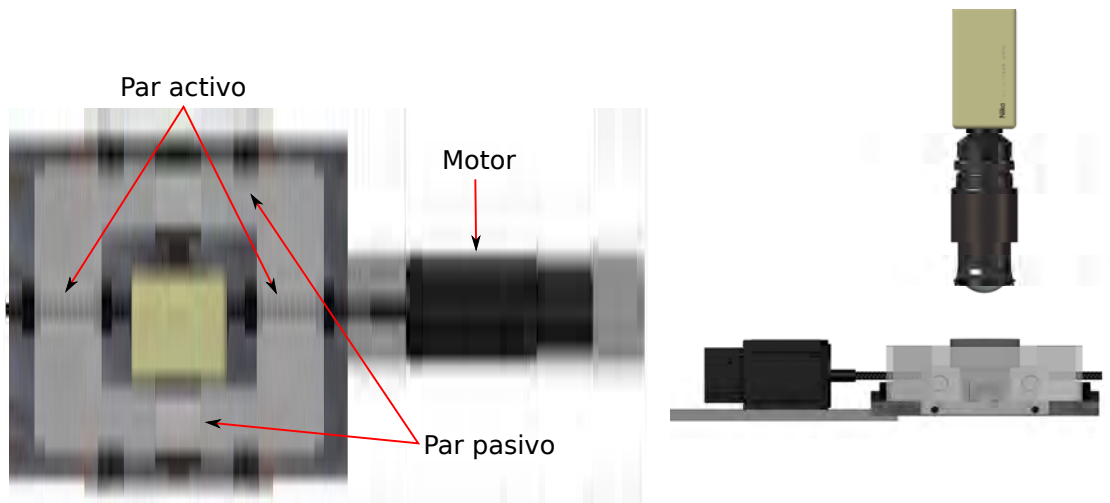
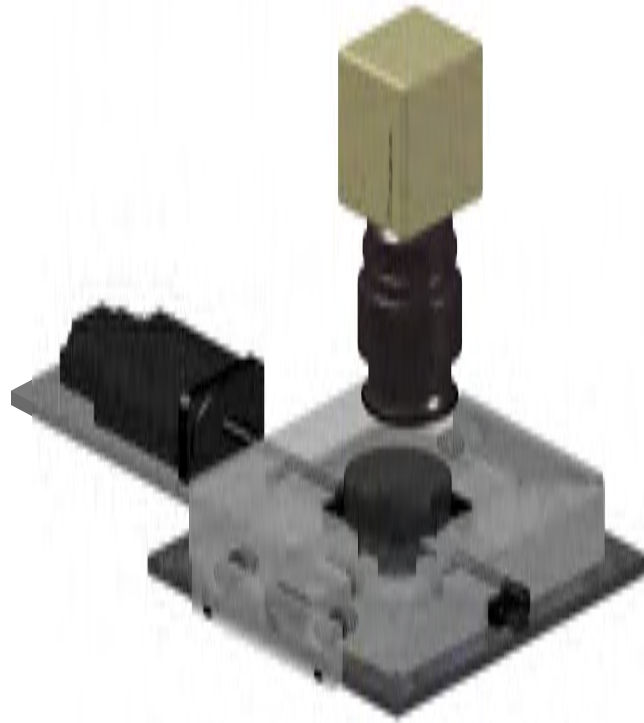


Figura 2.5: Montaje utilizado para la medición de cizalle puro
22

El motor usado es un “AC-Servo type YBL74-76L.X” que es capaz de girar a $3000[RPM]$ que fue controlado mediante un programa en Labview, a través de una tarjeta “NI USB-6216”. Además usando la misma tarjeta National Instruments, se enviaba un pulso a la tarjeta de adquisición de la cámara usada (Nikon DXM1200), este pulso funciona como detonador, con lo que el programa de control de la cámara, inmediatamente comienza la captura de la imagen. Las imágenes tomadas fueron al inicio y final de cada ciclo del experimento con una resolución de $10[MPix]$ y a una distancia que permite distinguir individualmente cada grano grande.

En los experimentos realizados con este montaje, la deformación fue medida a través del análisis de imágenes, y usando la expresión:

$$\epsilon = \frac{\Delta D}{D_0} \quad (2.2)$$

Donde ΔD corresponde al cambio de diámetro en un ciclo y D_0 corresponde al diámetro inicial de la muestra.

2.3 Efectos de la amplitud en Cizalle puro

La deformación en cizalle puro, fue definida en el capítulo 1 así como la forma de calcularla, mediante la expresión (2.2).

La dinámica de la segregación bajo distintas deformaciones: $\epsilon = 3\%$; $\epsilon = 8\%$; $\epsilon = 13\%$; $\epsilon = 18\%$; se presenta en la figura 2.6 en donde los puntos sólidos representan datos experimentales, mientras que las líneas entrecortadas representan el ajuste de los datos. Todos los experimentos fueron realizados a velocidad constante $v = 1[mm/s]$, para una capa de espesor $h = 3,95[mm]$ en una mezcla granular hecha por 50 – 50% en masa.

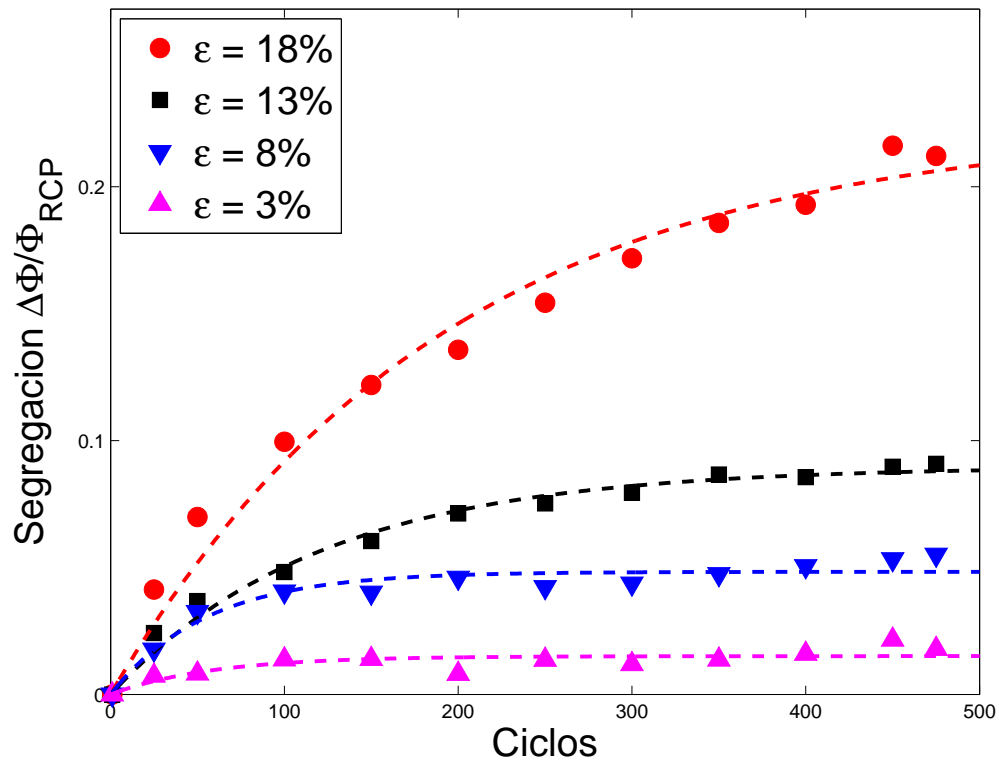


Figura 2.6: Gráfico de segregación versus ciclos para distintas deformaciones.

Para hacer este ajuste, se utilizó la expresión (2.3). Estos valores representan la amplitud (A) a la que satura esta curva, como los ciclos característicos (n_0) de la curva de segregación.

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi_{RCP}} = A(1 - e^{-n/n_0}) \quad (2.3)$$

Los resultados de ese ajuste son los presentados en la figura 2.7. Se observa que tanto la amplitud como los ciclos característicos de cada curva (n_0) dependen fuertemente de la deformación impuesta de una manera no lineal.

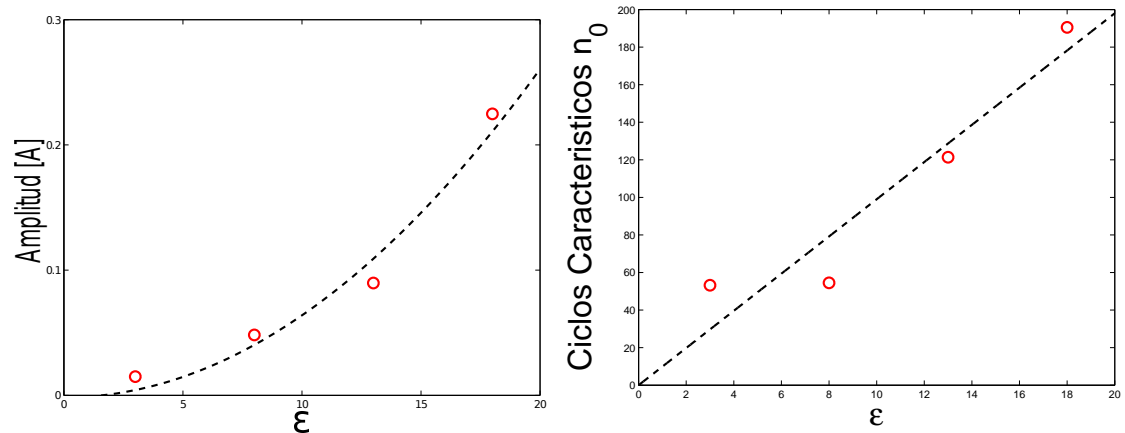


Figura 2.7: Resultados del ajuste de la ecuación (2.3) versus la deformación. A la izquierda: El ajuste de amplitud, se ve que tiene una forma no-lineal, por lo que se ajustó como $A = \alpha\epsilon^2$, esto solo con el sentido de mostrar que la relación entre la amplitud y la deformación es no trivial. A la derecha: El ajuste de los ciclos característicos en función de la deformación, se observa que tienden a aumentar de forma lineal con la deformación, haciendo que la curva alcance un punto de saturación mas lentamente.

Este comportamiento se puede traducir en las expresiones presentadas en (2.4).

$$\begin{aligned}A(\epsilon) &= \alpha\epsilon^2 \\n_0(\epsilon) &= \gamma\epsilon\end{aligned}\tag{2.4}$$

Además, en la figura 2.7, se observa que n_0 crece linealmente con la deformación, es decir, a mayor deformación la curva demorará mas ciclos en alcanzar un estado de saturación.

2.4 Efectos del tamaño de capa

Otra serie de experimentos realizados, fue la medición de segregación Φ en función del espesor de la muestra, manteniendo el cizalle puro. Para ello, se hicieron experimentos con diferentes espesores de capa, h , de 1,15[mm], 2,80[mm], 3,95[mm], 4,50[mm], 6,30[mm] a una deformación fija, $\epsilon = 18\%$ y $v = 1$ [mm/s]. Los resultados se muestran en la figura 2.8

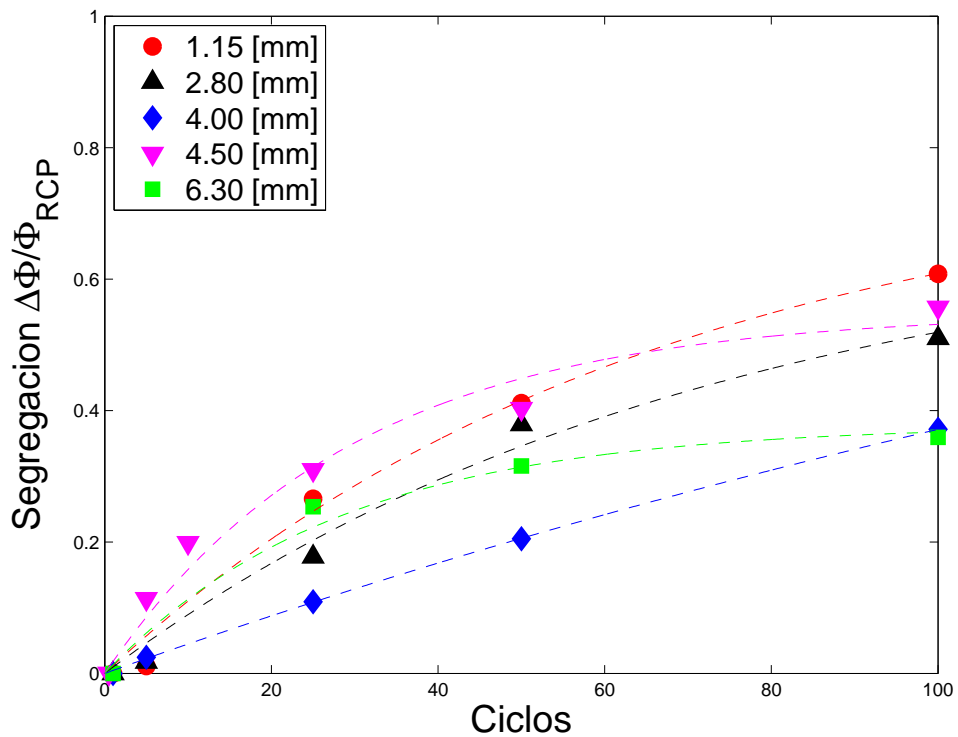


Figura 2.8: Curvas de Segregación para distintos espesores de capa.

Luego, se hizo el mismo ajuste con la expresión (2.3), con lo que se obtuvo los resultados mostrados en la figura 2.9. Donde se observa un comportamiento decreciente lineal tanto para la amplitud como para los ciclos característicos.

Por otra parte, en el gráfico de la figura 2.8, se observa que no hay grandes

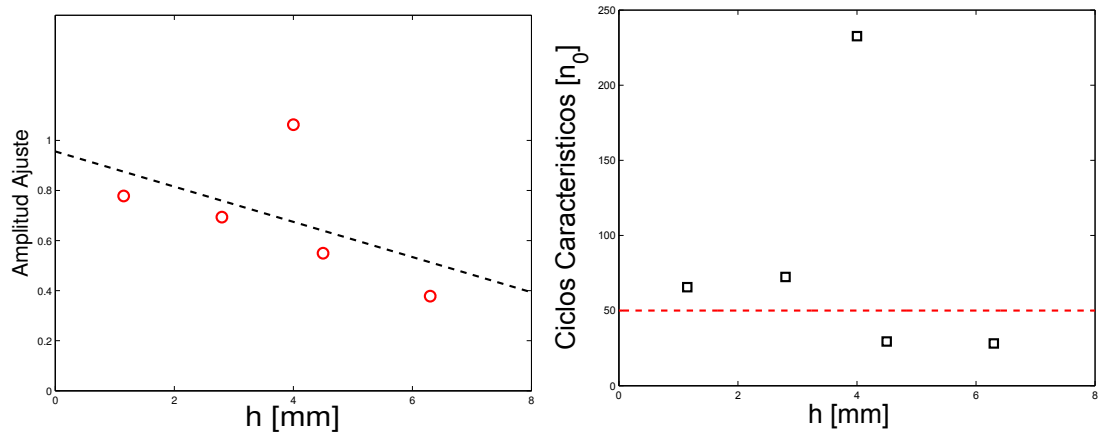


Figura 2.9: Dependencia con el espesor de los parámetros de ajuste de 2.3. A la izquierda: Valores de la amplitud de las curvas. A la derecha: ciclos característicos en función del espesor.

diferencias entre las curvas, sin embargo, en el ciclo 100, hay una clara tendencia de las curvas a ordenarse según el espesor, de menor ($h = 1,15[mm]$ en la parte superior) a mayor ($h = 6,3[mm]$ en la parte inferior), con la excepción de la curva de $h = 4,5[mm]$ que se sale de este patrón. Todo esto se puede resumir en las expresiones mostradas en la ecuación (2.5). Además, del ajuste mostrado en la figura 2.9, se observa que el valor de la segregación decae a mayor espesor de capa, pero que sus ciclos característicos se mantienen constantes.

$$\begin{aligned}
 A(h) &= -\zeta h + c_1 \\
 n_0(h) &= c
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

2.5 Montaje Estiramiento Uniaxial

Los experimentos de stretching fueron realizados en un montaje compuesto por dos motores de movimiento lineal modelo “WN410TA” fabricados por “Beijing Winner Optical Instruments Co. Ltd” y se utilizó una membrana de latex de $0,05[mm]$ ejerciendo una deformación uniaxial. Entre los motores, hay una superficie de acrílico, lo que evita el pandeo de la membrana con la muestra. En la figura 2.10 hay un diagrama del experimento.

El largo de la membrana de látex es de $9,6[cm]$ que es poco mas que el diámetro de la muestra ($7,0[cm]$). Por lo que la deformación impuesta se calcula como se indica en la ecuación (2.6).

$$\epsilon = \frac{1}{2} \frac{A}{L}. \quad (2.6)$$

Donde (como se aprecia en la figura 2.10) A es la amplitud dada (en centímetros), L es el largo de la membrana (es decir $L = 9,6[cm]$) y el factor $1/2$ es debido a que la deformación es uniaxial, o sea se está traccionando la muestra por ambos lados.

Las fotografías fueron tomadas con una cámara Nikon DXM1200, y fueron tomadas cada 20 ciclos. Cada ciclo parte con los extremos de la membrana en una posición x_0 , luego se estira uniaxialmente por ambos lados hasta $x_0 + A$ para luego volver nuevamente a su posición inicial.

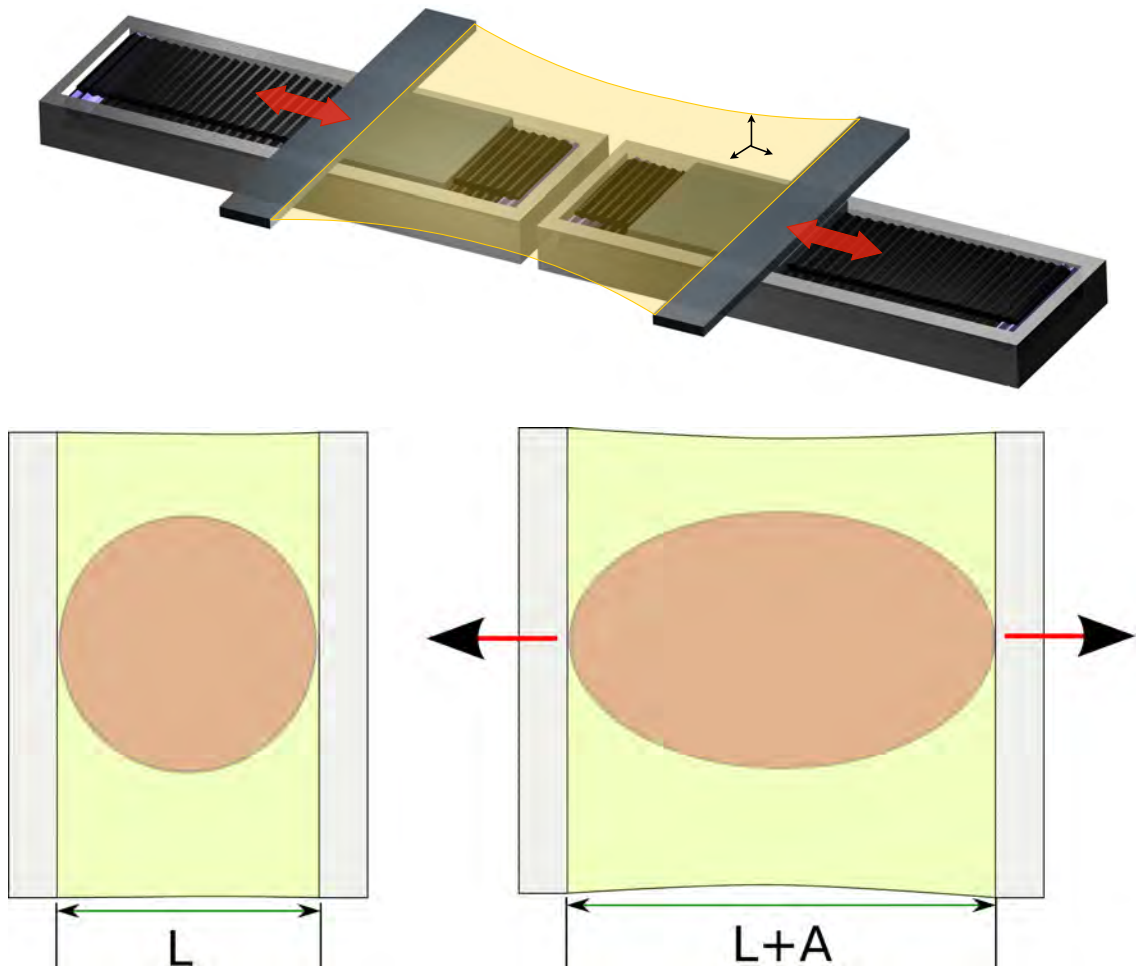


Figura 2.10: Diagrama de estiramiento uniaxial. Arriba: Dibujo en 3 dimensiones del funcionamiento del montaje. Abajo a la izquierda: Posición inicial de la muestra sobre la membrana de largo L . Abajo a la derecha: Muestra deformada cuando es aplicada una deformación de amplitud A

2.6 Deformación Uniaxial

También se realizaron experimentos bajo deformaciones uniaxiales a distintas deformaciones. Para ϵ se utiliza la expresión (2.6). Para tomar estos datos, se mantuvo un espesor de capa constante h , de $3,95[mm]$ y una velocidad $v = 1[mm/s]$. Este montaje, permitió incrementar la amplitud de deformación en comparación a las realizadas bajo cizalle, llevando a cabo las siguientes: $\epsilon = 40\%$; $\epsilon = 20\%$; $\epsilon = 13\%$; $\epsilon = 8\%$; $\epsilon = 4\%$. La dinámica de la mezcla granular bidispersa ante 5 amplitudes de deformación ϵ , se resume en la figura 2.11.

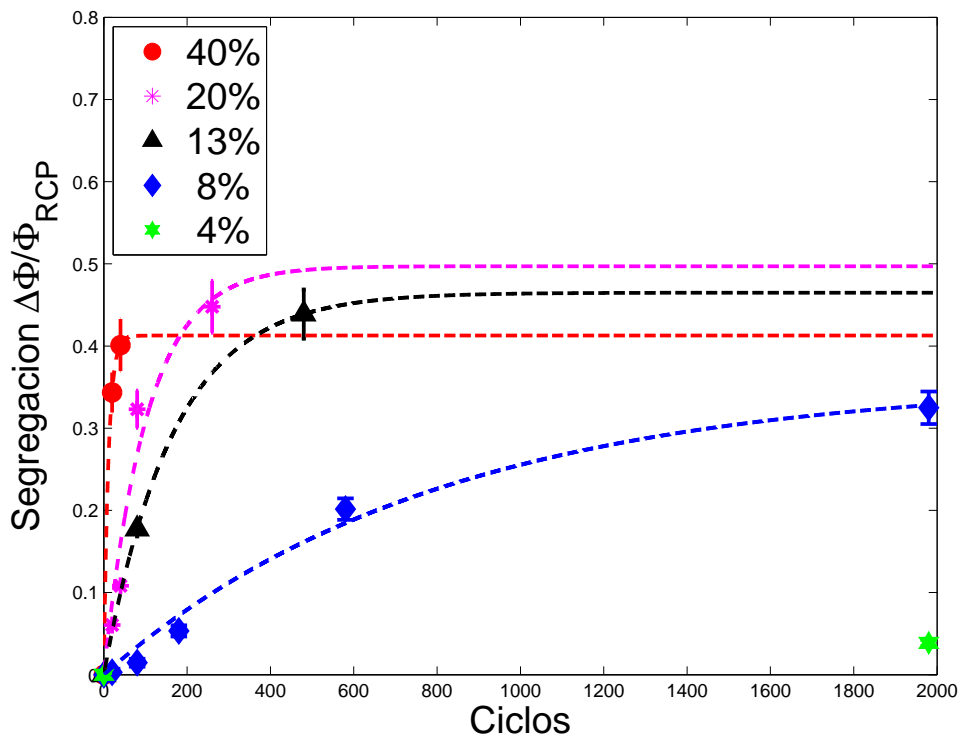


Figura 2.11: Deformaciones uniaxiales a varias amplitudes

La figura 2.11, muestra que el umbral de segregación bajo estiramiento uniaxial comienza cuando se alcanza una amplitud de 4% de deformación, acá la segregación $\Delta\Phi$ es menor a 5% aún después de 2000 ciclos, debido a ello sólo

se consideraron los puntos iniciales y finales.

Además, en la figura 2.11 las líneas entrecortadas representan el ajuste dado por la expresión (2.3), de aquí se pueden calcular las cantidades características A y n_0 que son mostradas en la figura 2.12. Para la amplitud, se realiza un ajuste lineal sólo para ilustrar el incremento sostenido de la segregación con la deformación, pues la dependencia real de la amplitud A no puede ser capturada con un modelo tan simple. Sin embargo, el número de ciclos característico tiene una forma muy no lineal, por lo que fue ajustado con una curva exponencial con la forma de la ecuación (2.7). Donde del parámetro c se puede obtener el umbral de segregación del sistema.

$$c = Ae^{-b\epsilon+c} \quad (2.7)$$

Los resultados del ajuste de n_0 mostrado en la figura 2.12 con la ecuación (2.7) son: $A = 7510$; $b = 0,2851$; $c = 0,0397$. Es decir, el parámetro c , es equivalente a $c = 3,97\%$, que es casi el mismo umbral encontrado con la deformación de 4% .

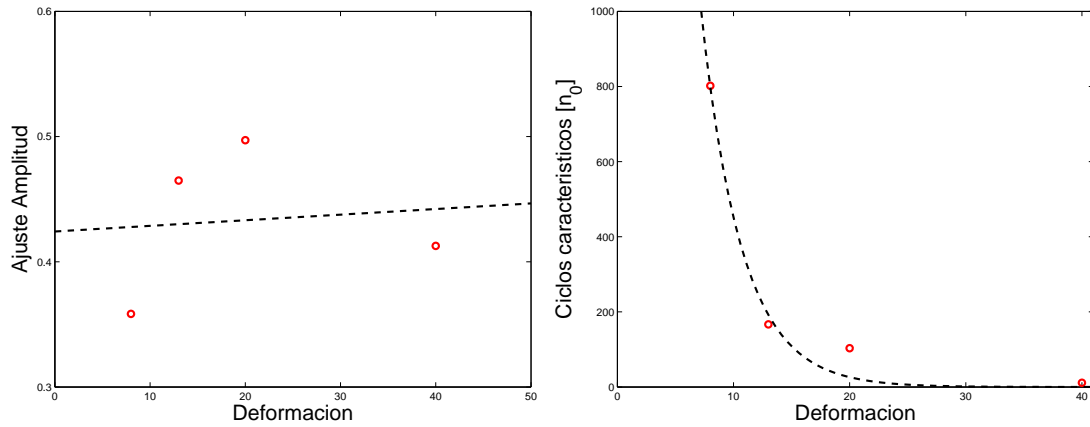


Figura 2.12: Evolución de los parámetros de ajuste del modelo 2.3 para los experimentos de deformación uniaxial. A la izquierda: Ajustes de la amplitud, Se observa un crecimiento con la deformación. A la derecha: Ajustes de los ciclos característicos, Se observa un comportamiento altamente no-lineal por lo que fue ajustado con la ecuación (2.7), donde se encontró mediante esta función que el umbral de segregación está cercano al 4%

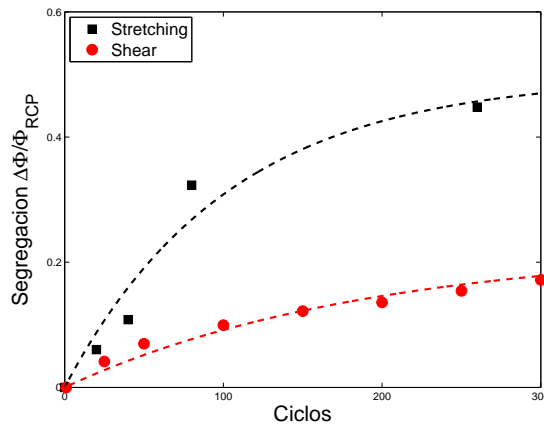


Figura 2.13: Comparación de la segregación entre deformaciones uniaxiales y de cizalle. Se observa que la segregación bajo deformación uniaxial es mayor que la producida por deformaciones de cizalle. Ambos experimentos se realizaron con $h = 3,95[mm]$, $v = 1[mm/s]$ y con deformaciones similares ($\epsilon = 20\%$ en el caso uniaxial y $\epsilon = 18\%$ en cizalle).

2.7 Modelo de segregación

A continuación se desarrolla un modelo de segregación para el caso de estiramiento uniaxial en un medio granular bidisperso. Aquí se considera un modelo en que la muestra está dividida en dos capas, cada una con un volumen V_1 y V_2 respectivamente, como se ilustra en la figura 2.14.

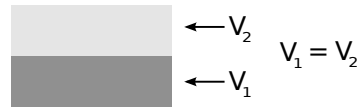


Figura 2.14: Diagrama de dos capas

En cada una de las capas habrá concentraciones de granos pequeños y granos grandes, que se denotarán c_1^D , donde el sub-índice indica la capa y el súper-índice el tipo de grano. Además, también se cumple que $c_1^d + c_1^D = 1$, ya que la suma de las concentraciones llena el total del espacio de la capa. También se tiene la conservación de la masa, según la cual $\frac{d}{dn}(c_2^d + c_1^d) = 0$.

En este modelo se indica que el cambio en la concentración de granos pequeños en la capa superior es proporcional a la deformación, así como a la concentración de granos grandes en la capa inferior, como se indica en la ecuación 2.8.

$$\frac{dc_2^d}{dn} \propto -\epsilon n \quad (2.8)$$

Esto es debido a que para que los granos pequeños puedan ir de una capa a la otra, necesitan de agujeros a través de los cuales bajar, y la única manera de formar estos agujeros es alrededor de los granos de mayor tamaño durante la deformación. Además, si una capa está muy poblada de granos pequeños, significa necesariamente que la otra capa tiene pocos granos pequeños, y por ende, está

muy poblada con granos grandes.

La ecuación 2.8 se puede desarrollar para ambos tipos de granos en cada una de las capas, donde se utilizará α como constante de proporcionalidad. Por ejemplo para los granos pequeños en la capa inferior, se tiene:

$$\begin{aligned}\frac{dc_1^d}{dn} &= \alpha \epsilon c_1^D \\ \frac{dc_1^d}{dn} &= \alpha \epsilon (1 - c_1^d)\end{aligned}\tag{2.9}$$

De donde integrando y evaluando en $n = 0$:

$$1 - c_1^d = (1 - c_{1-ini}^d) e^{\alpha \epsilon n}\tag{2.10}$$

Finalmente (2.10), se puede reescribir, y de forma análoga se obtienen las expresiones para el comportamiento de cada tipo de grano en cada capa, que son escritas en la (2.11)

$$\begin{aligned}c_1^D &= c_{1-ini} e^{-\alpha \epsilon n} \\ c_1^d &= 1 - (1 - c_{1-ini}^d) e^{\alpha \epsilon n} \\ c_2^D &= 1 - (1 - c_{2-ini}^d) e^{\alpha \epsilon n} \\ c_2^d &= c_{2-ini} e^{-\alpha \epsilon n}\end{aligned}\tag{2.11}$$

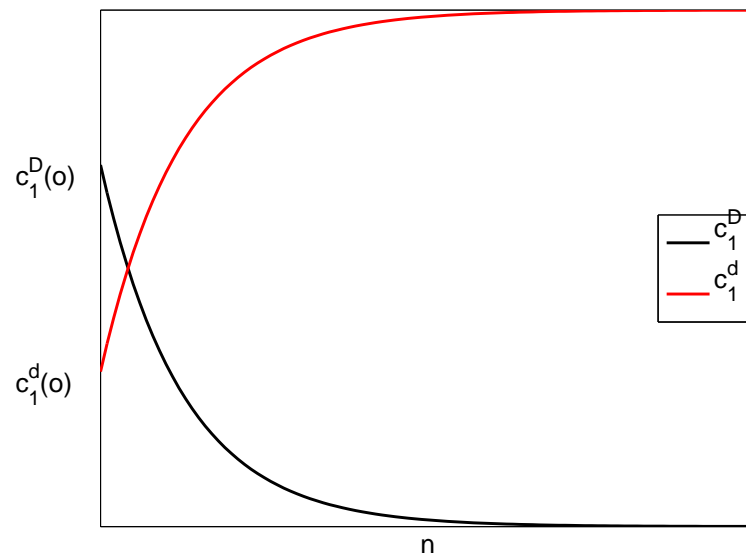


Figura 2.15: Diagrama del comportamiento de concentraciones de granos en la capa inferior. En rojo: la concentración de granos pequeños crece con el tiempo hasta llegar a la saturación. En negro: la concentración de granos grandes se empobrece con los ciclos

Capítulo 3

Estructuras de segregación

En este capítulo se reportan estructuras de segregación localizadas, tanto en deformaciones de cizalle como en uniaxiales.

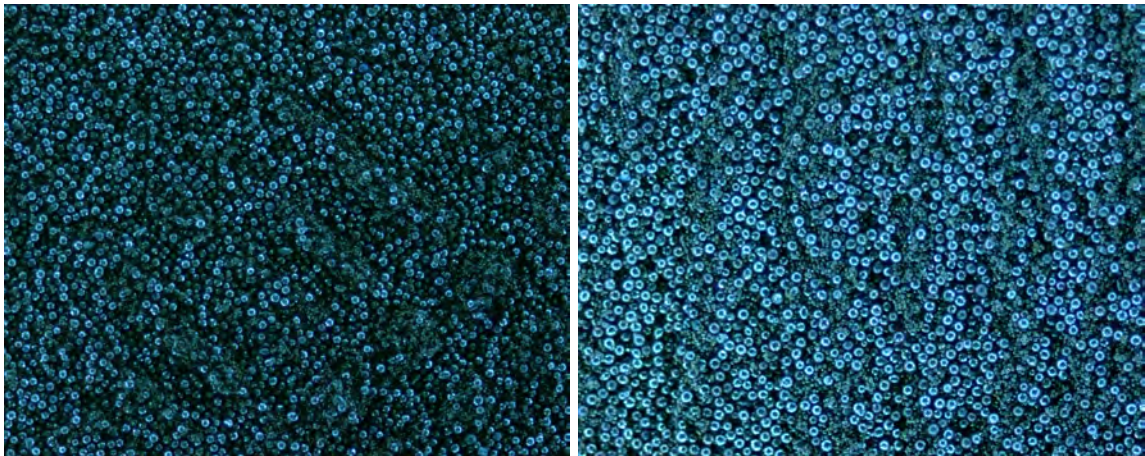


Figura 3.1: A la izquierda: Estructura de malla observada al deformar la muestra en forma de cizalle. A la derecha: Estructura de franjas observada al deformar la muestra de forma uniaxial.

Durante la realización de experimentos para la caracterización de la segregación bajo altas deformaciones, se observó la aparición de zonas de ordenamiento periódicas en la superficie de la muestra bidispersa, esta periodicidad es también segregada. Estos patrones se aprecian fácilmente bajo estiramiento uniaxial cuando se alcanza el 33% de deformación, y en el caso cizalle puro a 18%. Para este último, las estructuras forman una red como la mostrada en la figura 3.2B, donde cada banda de la red se encuentra alternadamente segregada, y se hacen visibles bajo observación directa en torno a los 100 ciclos de deformación.

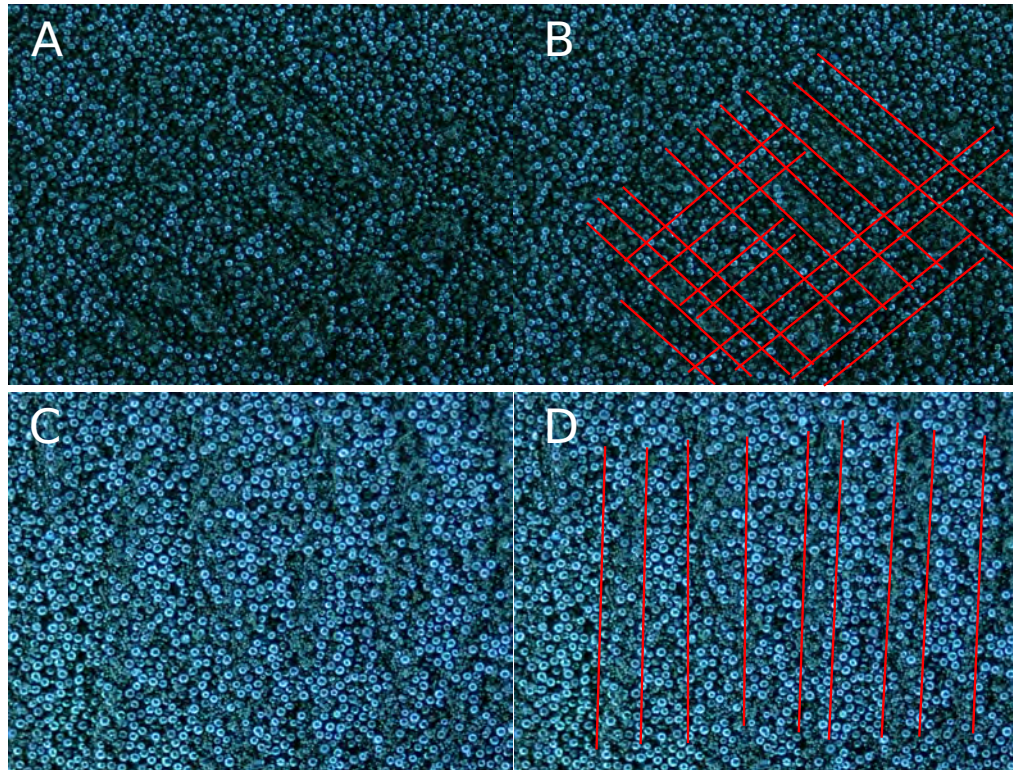


Figura 3.2: Estructuras Granulares remarcadas. A: Estructuras formadas bajo deformación de cizalle. B: Estructuras de cizalle remarcadas. C: Estructuras formadas bajo estiramiento uniaxial. D: Estructuras de deformación uniaxial remarcadas

Al hacer un seguimiento estroboscópico de la muestra, se observa que el movimiento de los granos está localizado en las zonas donde se concentran los granos grandes (es decir, donde está la segregación localizada). La mejor evidencia de ello es el cálculo de la correlación promedio del sistema. Mediante la técnica PIV (Particle Image Velocimetry) se correlacionan las imágenes de 50 ciclos. La forma de hacer esto es correlacionando una imagen, con su equivalente en el ciclo consecutivo a través de sub-ventanas -sucesivamente para los 50 ciclos-. Luego se promedian los desplazamientos y así se obtiene el campo promedio de desplazamiento que se observa en la figura 3.3 .

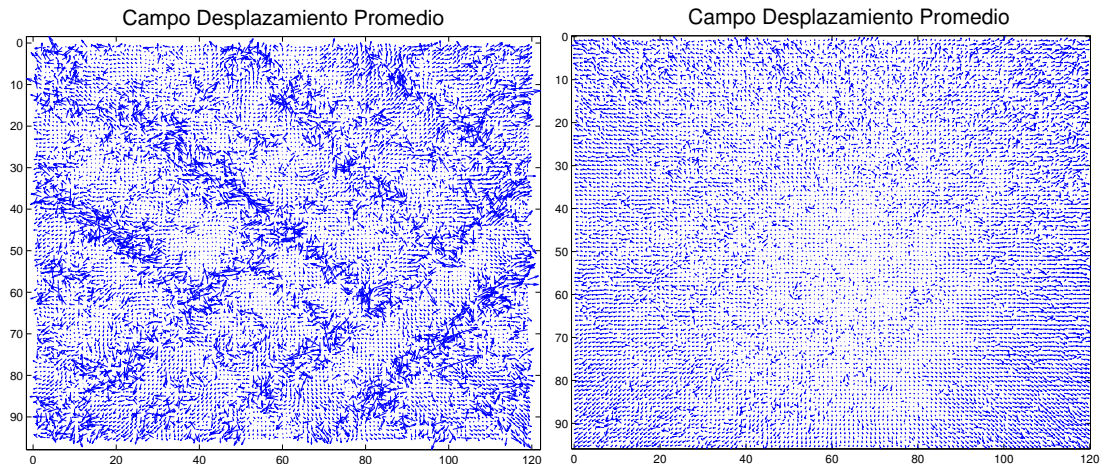


Figura 3.3: A la izquierda: Campo de desplazamiento promedio cuando existe una formación de estructuras. A la derecha: Campo de desplazamiento promedio al no haber formación de estructuras. La magnitud de ambos campos esta amplificada en un factor 2 para mayor facilidad en la observación de los mapas.

De las figuras 3.2, 3.3 y 3.4, se puede observar que tanto el desplazamiento como la segregación de los granos grandes, están concentrados en regiones localizadas de la muestra.

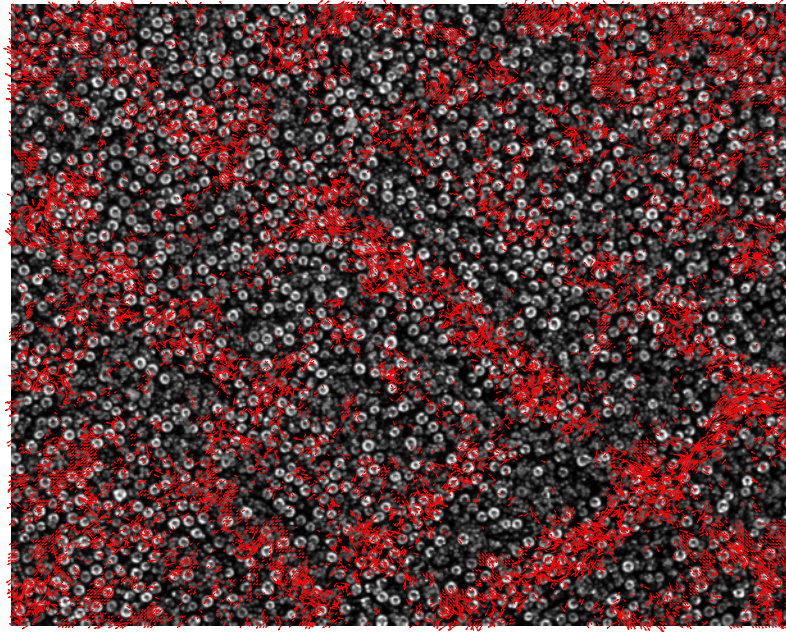


Figura 3.4: Imagen con mapeo de desplazamientos sobrepuestos. Sólo se muestran los mayores desplazamientos. Se observa que los desplazamientos coinciden con los lugares de la segregación localizada.

A partir del campo de desplazamiento, es posible calcular su símil de cizalle máximo, que se muestra en la figura 3.5. Aquí también se observa la diferencia en ambos casos. Si bien, cuando no existe una formación de estructuras el orden de magnitud del cizalle es comparable al del caso estructurado, se nota también que en vez de estar localizado, está distribuido en toda la muestra, sin áreas particulares de concentración.

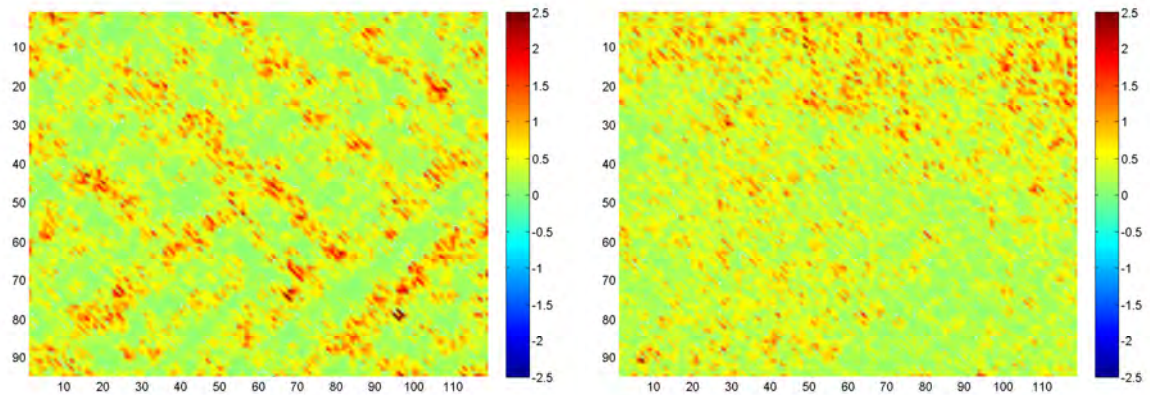


Figura 3.5: Comparación de campos de cizalle. A la izquierda con formación de estructuras y a la derecha sin esta formación.

Una hipótesis para la formación de estos patrones es la formación de clusters, es decir habría un componente de cohesión en la dinámica de los granos. Si bien, estos granos fueron limpiados y secados según el protocolo indicado en el apéndice A, es posible que de igual manera hayan capturado alguna sustancia capaz de provocar cohesión en la mezcla (posiblemente aceite proveniente de la manipulación). La cohesión afecta de manera principal a los granos pequeños, permitiendo que estos formen los clusters en los experimentos en donde se observan estas estructuras.

Si bien, los efectos de la deformación en un medio granular cohesivo han sido estudiados anteriormente [6, 7], estos estudios fueron hechos en muestras monodispersas, por lo que el efecto de la humedad en la segregación bajo deformaciones no es conocido. Sin embargo, hay evidencia [8] de que es necesaria una fracción de agua aproximadamente $V_w \sim 1\%$ (V_w es el volumen de agua respecto del volumen total de la muestra) para tener efectos importantes en la segregación, lo que coincide con lo planteado anteriormente del efecto de la cohesión en las estructuras observadas, ya que afectarán principalmente a los granos pe-

queños.

Estos patrones, si bien fueron documentados en esta tesis, no constituyen el objetivo de esta, ya que son causados probablemente por la cohesión de los granos pequeños que conforman bloques sin movimiento, mientras que los granos grandes se agrupan en bandas, donde si tienen esta libertad. Producto de lo anterior, se termina por desarrollar un patrón en forma de red, pues los granos grandes se agrupan en bandas de cizalle en toda la muestra, sin embargo, aún cuando parece ser que la fricción en los granos grandes es menor que los pequeños y por ello el material fluye en bandas segregadas, el motivo por el cual el sistema se ordena y no se segrega inmediatamente permanece esquivo.

Capítulo 4

Proyecciones y Conclusiones

4.1 Proyecciones

En esta sección se dejarán algunas ideas como proyecciones, esperando poder darle una mayor completitud al trabajo en el futuro.

Primero, es de opinión del autor de este trabajo, que los resultados mas interesantes y prometedores reportados en esta tesis, son las estructuras expuestas en el capítulo 3. La hipótesis planteada es que un efecto importante para la obtención de las estructuras de la figura 3.1 es la cohesión. La cohesión disminuirá la segregación que fue observada en este trabajo, con lo que permitirá que en la superficie de la muestra exista fricción entre distintos tipos de granos, generando la segregación localizada que fue planteada en la hipótesis de este trabajo. Probablemente, la segregación se comportará como una función de la cohesión, con lo que en la muestra habrá una competencia entre la segregación por deformación versus la no-segregación por cohesión.

Otro experimento que se puede realizar, es la deformación de cizalle puro en una muestra bidispersa estratificada. En las simulaciones presentadas en [1] la condición inicial era un sistema completamente estratificado, que podía segregar de tal manera que formaba patrones poligonales. Se puede realizar este experimento con las condiciones dadas en ese artículo (granos grandes en la superficie y granos pequeños en la base) y también de forma inversa (granos grandes en la base y granos pequeños en la superficie) y estudiar como cambian los tiempos de formación de los patrones, longitud de onda, forma, etc. Si bien pareciera extraño (dado lo observado en este trabajo) que los granos pequeños puedan ascender, esto puede ser explicado con los resultados presentados en [8], donde se habla que un cluster de granos pequeños puede comportarse como una sola partícula grande, lo que permitiría este movimiento.

4.2 Conclusiones

Como conclusión general se debe indicar que se logró caracterizar la segregación en un medio granular bidisperso mezclado en distintas situaciones, en cizalle puro se caracterizó su comportamiento a distintas amplitudes de deformación, así como también a distinto espesor de capa. Mientras que en el estiramiento uniaxial se estudió el comportamiento a distintas amplitudes de deformación. En este último caso, además se pudo desarrollar un modelo estadístico que pudo capturar la esencia del comportamiento de las concentraciones de los distintos tipos de granos de la muestra.

La segregación, se pudo caracterizar en función de un parámetro $\Delta\Phi$ que tal como fue definido en (2.1), es un indicador del grado de segregación en la superficie libre de la muestra. Este parámetro es proporcional al número de granos grandes capturados en la imagen analizada. Se observa que Φ siempre tiende a aumentar bajo los distintos estímulos aplicados en la muestra, lo que es esperable dada la tendencia de los medios granulares bidispersos a segregarse. También se observa que éstos tienden a saturar, con lo que se usó un ajuste exponencial de saturación para poder caracterizar la segregación y la velocidad característica de ésta.

Las observaciones llevadas a cabo en este trabajo, indican que entre los dos efectos de segregación presentes en las deformaciones, el más importante es el efecto de percolación en desmedro de la fricción. Es por esta razón que la segregación localizada no se observó en el régimen no-cohesivo, ya que debido a la dinámica vertical del sistema, cuando dos granos se friccionaban horizontalmente en un ciclo determinado, en el ciclo siguiente no necesariamente estos granos estarán en contacto horizontal (ya que los pequeños pueden haber baja-

do), es esto lo que produce el efecto de segregación no-localizada.

Para los experimentos realizados a distintos espesores de capa no se encontró un umbral tanto como para la amplitud como para los ciclos característicos, siendo estos últimos independientes del espesor. El comportamiento de segregación lineal en función del espesor, da cuenta de un gradiente lineal de segregación en la muestra. Es decir, en una muestra de espesor de capa h , la capa superior Δh siente un estímulo distinto que una capa inferior de espesor Δh , provocando una curva de segregación que si bien es similar, tiene un comportamiento linealmente decreciente.

Por otra parte se debe indicar que la hipótesis bajo la cual se llevó este trabajo resultó no ser correcta. Esto debido a que no se consideró el efecto de percolación de los granos pequeños, y resultó ser el efecto predominante en los experimentos realizados. De esta forma, la hipótesis debe ser reformulada y tal como se indicó en la sección anterior, se harán experimentos en un régimen cohesivo. La nueva hipótesis plantea que la formación de estructuras de segregación, es el resultado de una competencia entre el efecto de segregación causado por la deformación, versus el efecto de no-segregación causado por la cohesión. Esta competencia hará que el cizalle no se distribuya en toda la muestra, sino que se localice en bandas de cizalle, y serán estas bandas las que formarán las estructuras que fueron presentadas en el capítulo 3.

Apéndice A

Preparación del Experimento

- Las partículas están constantemente afectas a contaminación durante los experimentos, motivo por el cual, se realiza una limpieza periódica y meticulosa de ellas, sometiéndolas a una sonicación acústica en una piscina de acetona para remover grasas o impurezas. El proceso de sonicado se repite hasta que no se observe elementos turbios o en flotación en la solución de acetona.
- Secado en horno, a $80^{\circ}[C]$ durante 90 minutos.
- La membrana elástica de látex debe estar pre-tensa en cada experimento, y mediante guías dibujadas en la membrana, se puede asegurar el mismo nivel de tensión en cada experimento.
- Para crear la capa granular bidispersa mezclada, se usa un sistema de anillos como molde para controlar el espesor
- Depositar la mezcla sobre la membrana. Al hacerlo, se coloca un sistema de tres rejillas sobre los anillos, para causar un efecto de lluvia y así mantener el packing constante. La distribución debe ser lo más uniforme posible, para evitar el apilamiento de los granos al centro de los anillos que determinan

su espesor.

- La muestra se termina de esparcir de forma suave, para evitar dejar marcas en la superficie libre.
- Se levantan los anillos, con precaución, para evitar desarmar o marcar la superficie libre de la muestra.
- Se monta la iluminación, se conecta y se deja a la altura definida para la visualización de los granos de forma óptima.

Bibliografía

- [1] M. A. Kessler and B. T. Werner. Self-organization of sorted patterned ground. *Science*, 2003.
- [2] J.-C. Géminard and W. Losert. Frictional properties of bidisperse granular matter: Effect of mixing ratio. *PHYSICAL REVIEW E*, 2002.
- [3] Massimo Pica Ciamarra, Antonio Coniglio, and Mario Nicodemi. Shear instabilities in granular mixtures. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 2005.
- [4] Matt Harrington, Joost H. Weijs, and Wolfgang Losert. Suppression and emergence of granular segregation under cyclic shear. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 2013.
- [5] Sam Meyera, Chaoming Songb, Yuliang Jinb, Kun Wangb, and Hernán A. Makseb. Jamming in two-dimensional packings. *arXiv*, 2010.
- [6] Hector Alarcón, Osvanny Ramos, Loïc Vanel, Franck Vittoz, Francisco Melo, and Jean-Christophe Géminard. Softening induced instability of a stretched cohesive granular layer. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 2010.
- [7] Hector Alarcón, Jean-Christophe Géminard, and Francisco Melo. Effect of cohesion and shear modulus on the stability of a stretched granular layer. *PHYSICAL REVIEW E*, 2012.

- [8] Azadeh Samadani and A. Kudrolli. Segregation transitions in wet granular matter. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 2000.