



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN 3D A TRAVÉS DE MODELACIÓN ANALÓGICA Y  
RESTAURACIÓN NUMÉRICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

DANIEL ISAIÁS GONZÁLEZ GUERRA

**PROFESOR GUÍA**

CÉSAR ARRIAGADA

**PROFESOR CO-GUÍA**

LUISA PINTO L.

**MIEMBRO DE LA COMISIÓN**

REYNALDO CHARRIER

SANTIAGO DE CHILE

2008



RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TITULO DE GEÓLOGO  
POR : DANIEL GONZÁLEZ GUERRA  
FECHA : 27/10/2008  
PROF. GUIA: SR. CÉSAR ARRIAGADA

## “ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN 3D A TRAVÉS DE MODELACIÓN ANALÓGICA Y RESTAURACIÓN NUMÉRICA”

Una serie de dispositivos experimentales fueron desarrollados para comprender cómo se originan y evolucionan los estilos estructurales 3D en sistemas de fallas de rumbo. En particular se analizó la deformación que se produce en la cubierta sedimentaria frágil al modificar la geometría del basamento y la dirección del esfuerzo principal. Adicionalmente se estudió la factibilidad de restaurar numéricamente la deformación en sistemas transpresivos.

2 placas de zinc, una de ellas móvil, representan al basamento. Cortes en ángulos determinados a lo largo de estas placas ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ ) simulan curvaturas que representan discontinuidades al interior del basamento. Ésto permite el desarrollo de zonas en extensión y compresión dentro de un mismo sistema de fallas de rumbo dextral. La cobertura sedimentaria frágil se representó usando una torta de arena de 5 cm de espesor. El ángulo entre la dirección de esfuerzo principal y el sistema de fallas de rumbo se fijó en  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $45^\circ$ . Lo anterior, combinado con los ángulos de los cortes en las láminas de zinc dio como resultado una matriz de 9 experimentos.

En general se observa que en las zonas en transpresión se desarrollan flores positivas mientras que en las zonas en transtensión flores negativas. Sin embargo, la forma de estas estructuras está controlada por los parámetros testeados. La geometría 3D de la flor, ya sea en el caso positivo como negativo, es progresivamente mayor cuando el ángulo entre el esfuerzo aplicado y la discontinuidad en el basamento se acerca a  $90^\circ$ .

Junto con las fallas que forman las geometrías tipo flor, se producen fallas de rumbo, que disectan a las anteriores, estas coinciden con la dirección del esfuerzo principal. Un punto interesante de destacar es que en las zonas en transtensión pareciera haber inversión tectónica. Estas geometrías se producen cuando la dirección del esfuerzo principal es menor que el ángulo de la discontinuidad. Finalmente, la restauración realizada para el caso compresivo entrega resultados comparables con el estado no deformado, sin embargo más estudios son necesarios para determinar la cantidad de datos requeridos en sistemas transpresivos naturales.

**A mi padre, madre  
y hermanos.**

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer, en primer lugar, a mis padres, forjadores de mi personalidad y mis anhelos, a mi hermano Pato, compañero de toda la vida, a la Makita, mi hermana chica, luz de la familia.

A la Meryta, pilar fundamental de este proceso, muchas gracias por el apoyo, los consejos, el amor y la fuerza entregada.

A mis amigos y compañeros de la Mente Popular, ejemplo de lucha inagotable, a Estudiantes por Chile y todos los que luchan por una educación pública, de calidad y por un mundo mejor.

A mis profesores guía, Luisa Pinto y César Arriagada, quienes, cada uno en su estilo, han sabido entregar lo mejor de sí para la realización de este trabajo.

A mis compañeros y amigos de Geología, en todos sus generaciones y, en especial, a los que junto a mi, terminan esta etapa.

A María Rosa, Vero, el Quilo, Juanito, por su gran ayuda e infinita paciencia, siempre estuvieron dispuestos a ayudar en lo que pudieran con toda su energía.

Al Proyecto Anillo ACT-18, por cobijar y financiar este trabajo.

# Índice Temático

<b>1</b>	<b><i>CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN</i></b>	<b>10</b>
1.1	<b>Formulación del problema</b>	<b>10</b>
1.2	<b>Objetivos</b>	<b>11</b>
1.2.1	Objetivo general	11
1.2.2	Objetivos específicos	11
1.3	<b>Metodología</b>	<b>11</b>
1.4	<b>Hipótesis</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b><i>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO</i></b>	<b>13</b>
2.1	<b>Modelación analógica</b>	<b>13</b>
2.2	<b>Método de restauración</b>	<b>13</b>
2.2.1	Principios del método	13
2.2.2	Principales supuestos	14
2.2.3	Rol del Stepover	15
2.2.4	Cuenca en zonas de rumbo	15
2.2.5	Alzamiento pop-up	16
2.3	<b>ESTUDIOS ANTERIORES</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b><i>CAPITULO 3: METODOLOGÍA</i></b>	<b>20</b>
3.1	<b>Generalidades</b>	<b>20</b>
3.2	<b>Modelación analógica</b>	<b>20</b>
3.2.1	Escalamiento de los modelos	20
3.2.2	Materiales analógicos	20
3.3	<b>Aparato experimental y montaje</b>	<b>21</b>
3.4	<b>Metodología para el análisis de la deformación</b>	<b>24</b>
3.5	<b>Restauración numérica</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b><i>CAPÍTULO 4: RESULTADOS DE LOS MODELOS</i></b>	<b>29</b>
4.1	<b>Serie con 0° en ángulo de convergencia de placas</b>	<b>29</b>
4.1.1	Experimento con <i>stepover</i> de 30° (SISICRE 3)	30
4.1.2	Experimento con <i>stepover</i> de 45° (SISICRE 4)	34
4.1.3	Experimento con <i>stepover</i> de 60° (SISICRE 5)	38
4.2	<b>Serie con 30° en ángulo de convergencia de placas</b>	<b>42</b>
4.2.1	Experimento con <i>stepover</i> de 30° (SISICRE 7)	42
4.2.2	Experimento con <i>stepover</i> 45° (SISICRE 8)	47
4.2.3	Experimento con <i>stepover</i> de 60° (SISICRE 9)	51
4.3	<b>Serie con 45° en ángulo de convergencia de placas</b>	<b>55</b>
4.3.1	Experimento con <i>stepover</i> de 30° (SISICRE 12)	55
4.3.2	Experimento con <i>stepover</i> de 45° (SISICRE 13)	60
4.3.3	Experimento con <i>stepover</i> de 60° (SISICRE 14)	64
<b>5</b>	<b><i>Capítulo 5: Resultados Restauración Numérica</i></b>	<b>68</b>
5.1	<b>Restauración experimento 30° <i>stepover</i> (SISICRE 3)</b>	<b>68</b>
<b>6</b>	<b><i>CAPITULO 6: DISCUSIONES</i></b>	<b>71</b>
6.1	<b>Serie 0° en ángulo de convergencia</b>	<b>74</b>
6.2	<b>Serie 30° en ángulo de convergencia</b>	<b>76</b>
6.3	<b>Serie 45° en ángulo de convergencia</b>	<b>77</b>
6.4	<b>Análisis modelos con 30° en <i>stepover</i></b>	<b>85</b>

6.5	<b>Análisis modelos con 45° en <i>stepover</i></b>	<b>86</b>
6.6	<b>Análisis modelos con 60° en <i>stepover</i></b>	<b>86</b>
6.7	<b>Restauración numérica</b>	<b>87</b>
6.8	<b>Limitaciones de los modelos analógicos</b>	<b>89</b>
6.9	<b>Recomendaciones para próximos trabajos</b>	<b>90</b>
7	<b>Capítulo 7: Conclusiones</b>	<b>91</b>
8	<b>Referencias</b>	<b>93</b>
9	<b>Anexos</b>	<b>95</b>
9.1	<b>Anexo 1: Anotaciones del desarrollo de los modelos</b>	<b>95</b>
9.2	<b>Anexo 2: Deformación de cuerpo no rígido</b>	<b>104</b>
9.2.1	Medida de strain	106
9.2.2	Relaciones generales de <i>strain</i> en 3D	108
9.3	<b>Anexo 3: Sistema de fallas de rumbo</b>	<b>109</b>
9.3.1	Patrones estructurales	111
9.4	<b>Anexo 4: Archivos dat para la restauración</b>	<b>116</b>
9.5	<b>Anexo 5: Teoría del escalamiento</b>	<b>120</b>

## Índice de Figuras

Figura 2-1. Esquemas con la formación de un <i>pop-up</i> y una Cuenca de <i>pull apart</i> .	15
Figura 2-2. Flores positivas y negativas asociadas a curvaturas de fallas.	16
Figura 3-1. Esquema que muestra la disposición de las placas basales y del pistón para el primer montaje general.	22
Figura 3-2. Esquema que muestra la disposición de las placas basales y el pistón para el segundo montaje general.	22
Figura 3-3. Esquema que muestra la disposición de las capas de arena sobre las placas basales y la disposición del pistón.	23
Figura 3-4. Esquema que muestra la configuración de las placas basales.	23
Figura 3-5. Vista en planta de un modelo que muestra los puntos cardinales sobre los que está basada la descripción de los modelos. También muestra la dirección en que fue medido el ancho y el largo de las flores, positivas y negativas.	25
Figura 3-6. Diagrama de bloques realizado sobre la vista en planta.	26
Figura 3-7. Archivo dat.dig con los puntos que conforman los bloques a restaurar.	27
Figura 3-8. archivo dat.rot con las rotaciones que afectaron a cada bloque.	27
Figura 3-9. Archivo dat.tec con el acortamiento y la dirección con respecto al Norte del acortamiento.	28
Figura 3-10. Archivo dat.voi con los vecinos de cada bloque pre y post-deformacionales.	28
Figura 4-1. Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 3	32
Figura 4-2. Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 3 y perfiles en distintos sectores.	33
Figura 4-3. Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 4	36
Figura 4-4. Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 4 y perfiles en distintos sectores.	37
Figura 4-5. Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 5	40
Figura 4-6. Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 5 y perfiles en distintos sectores.	41
Figura 4-7. Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 7	45
Figura 4-8. Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 7 y perfiles en distintos sectores.	46
Figura 4-9. Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 8	49
Figura 4-10. Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 8 y perfiles en distintos sectores.	50
Figura 4-11. Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 9	53
Figura 4-12. Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 9 y perfiles en distintos sectores.	54
Figura 4-13. Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 12.	58
Figura 4-14. Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 12 y perfiles en distintos sectores.	59
Figura 4-15. Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 13.	62
Figura 4-16. Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 13 y perfiles en distintos sectores.	63
Figura 4-17. Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 14.	66
Figura 4-18. Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 14 y perfiles en distintos sectores.	67
Figura 5-1. Esquema de los bloques limitados por falla sobre vista en planta del modelo SISICRE 3	68



Figura 5-2. Perfil del modelo SISICRE 3 con los plegamientos marcados sobre la capa de arena roja.	68
Figura 5-3. Esquema final de los bloques confeccionados para la restauración del modelo SISICRE 3.	69
Figura 5-4. Estado inicial y final de la restauración numérica. Las flechas indican el desplazamiento de los bloques y los colores el grado de deformación, siendo la mayor deformación el color rojo.	70
Figura 6-1. Matriz mostrando los 9 experimentos de este estudio. Todas las figuras están a la misma escala. Hacia la derecha varía el ángulo de la discontinuidad del basamento y hacia abajo el ángulo de convergencia de las placas.	72
Figura 6-2. Matriz con los 9 diagramas esquemáticos del estado final, vistos en planta. En azul las discontinuidades de las placas basales en su estado final.	73
Figura 6-3: Estado inicial y final de la restauración numérica. Las flechas indican el desplazamiento de los bloques y los colores el grado de deformación, siendo la mayor deformación el color rojo.	88
Figura 6-4: Esquema final de los bloques confeccionados para la restauración del modelo SISICRE 3.	89
Figura 9-1. Deformación continua reflejada en un pliegue.	104
Figura 9-2. Deformación discontinua reflejada en una falla.	104
Figura 9-3. Cuadrado deformado mostrando deformación homogénea.	105
Figura 9-4. Cuadrado deformado mostrando deformación heterogénea.	105
Figura 9-5. Pliegue mostrando deformación heterogénea con distintos dominios estructurales con deformación homogénea.	105
Figura 9-6. Segmento de línea, en que se muestra el largo inicial y el largo final, con el cálculo de la extensión.	106
Figura 9-7. Medida de la deformación en función del cambio de ángulo.	107
Figura 9-8. Cambio de volumen de un cuerpo.	108
Figura 9-9. Elipse de <i>strain</i> mostrando la deformación de una circunferencia y las líneas en todas la orientaciones posibles.	108
Figura 9-10. Clasificación de fallas según ubicación de los esfuerzos principales (Modificado de Almendinger 1999).	109
Figura 9-11. Relación entre los límites de placas y las fallas de rumbo.	110
Figura 9-12. Pliegues en echelón formados en zona de cizalle.	112
Figura 9-13. Esquema mostrando las fallas conjugadas de Riedel.	112
Figura 9-14. Forma inicial de las grietas de tensión.	113
Figura 9-15. Bloques rotando estilo dominó.	113
Figura 9-16: Esquema de fallas Riedel mostrando las fallas P.	114
Figura 9-17. Estructura de flor positiva vista en planta y en perfil.	114
Figura 9-18: Vista en perfil de una flor negativa.	115

# 1 CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Formulación del problema

A lo largo de Chile, existen grandes estructuras de rumbo que afectan al margen continental, como lo son la zona de falla Liquiñe-Ofqui, que tiene una extensión de casi 1.000 km (Hervé, 1994) y la zona de falla de Atacama, que también puede ser reconocida por más de 1.000 km. La irregularidad de estas fallas en su traza, hacen que presente discontinuidades propicias para la generación de estructuras tipo flor, positivas o negativas

Entender la dinámica de estos procesos, ayuda a entender una buena parte de la geología estructural del margen W del continente, como influyen las discontinuidades del basamento, la dirección de los tensores de esfuerzo y su influencia en la formación de estas estructuras.

La modelación analógica surge como una herramienta simple y poderosa a la hora de entender los procesos naturales, logrando individualizar la influencia de algún parámetro, pero a la vez, presentando el desafío de entender que todos los parámetros se relacionan para influir en los procesos.

Otra herramienta poderosa es la modelación numérica, que permite cuantificar de manera más precisa los parámetros. El proceso de restauración numérica permite conocer la configuración inicial de una zona deformada.

La ventaja de unir estas dos metodologías es que el estado inicial lo conocemos, por lo que nos permite saber a ciencia cierta si la restauración está bien hecha, y, a través de esto, lograr entender de una mejor manera las estructuras que actúan en la deformación.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Comprender la influencia de las discontinuidades previas del basamento y la dirección de los tensores de esfuerzo en un sistema que reúna características transtensivas y transpresivas, a través de modelos analógicos (experimentales) y restauración numérica.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

a) Lograr un modelamiento simplificado, pero representativo de un sistema natural compresivo con subsecuente extensión debido a la geometría de la placa basal. Por lo que se pretende:

- comparar la evolución de un sistema transpresional desarrollado contemporáneamente a un sistema transtensional para distintos ángulos de oblicuidad y discontinuidad de placas basales.

b) Restaurar numéricamente los experimentos análogos para lograr entender los parámetros que más influyen en la deformación.

## **1.3 Metodología**

Para lograr resolver los objetivos planteados la metodología será la siguiente:

- Para el primer objetivo específico se desarrollaran 9 modelos análogos con materiales que tengan comportamiento similar a las rocas de la corteza frágil, los que han sido previamente verificados y utilizados en distintos laboratorios de modelación analógica. Con estos materiales se efectuará un adecuado escalamiento de los parámetros involucrados en el sistema natural.
- La corteza superior (frágil) será representada por arena con un ángulo de fricción interna cercano a los  $35^\circ$  y una densidad de  $1.400 \text{ kg/m}^3$ .

- Para cumplir con el segundo objetivo específico se utilizará un programa hecho en Lenguaje C que ocupa el principio de minimización de espacios creado en la Universidad de Rennes, Francia.

#### **1.4 Hipótesis**

Este trabajo se basa en la hipótesis de que los ángulos de curvatura de las discontinuidades del basamento y la dirección de los tensores de esfuerzo serán un parámetro influyente en el proceso de formación de estructuras de flores positivas y negativas. Por lo tanto, este estudio se basa en el análisis cualitativo y cuantitativo del efecto que producen estos ángulos en el desarrollo de estas estructuras.

## **2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Modelación analógica**

El objetivo de la modelación analógica es comprender la influencia de los parámetros, factores y mecanismos fundamentales, de un proceso natural, a través de su reproducción a escala de laboratorio. Para el caso de la litosfera, se utilizan diferentes materiales para representarla, dependiendo del comportamiento que presente. Para escalar la parte frágil se utiliza arena que cumple con los criterios de rompimiento de Mohr-Coulomb y para la parte dúctil se representa con silicona, que es un material viscoso con comportamiento newtoniano. El objetivo es entender como influye un parámetro, en específico, en la evolución de la deformación.

Para que un modelo analógico sea representativo de un sistema natural es necesario escalarlo adecuadamente y ocupar materiales que tengan comportamientos reológicos similares al sistema natural (Ver anexo 5)

### **2.2 Método de restauración**

La restauración numérica es un método usado para encontrar el estado inicial, visto en planta, de una zona de estudio deformada. Cobbold, 1979; Percevault y Cobbold, 1982 y Cobbold y Percevault, 1983 han desarrollado, para zonas de deformación continua, procedimientos numéricos para encajar bloques vistos en planta, aplicables a deformación no-plana (Bourgeois et al, 1997). Estos métodos han sido adaptados para deformación discontinua de regiones dominadas por movimiento de rumbo, fallas normales (Rouby et al., 1993a, b; Rouby et al, 1996) y fallamiento inverso (Bourgeois et al., 1997).

#### **2.2.1 Principios del método**

El objetivo de este método es reconstruir el estado inicial, no deformado, de una capa estratigráfica, generalmente plegada y afectada por fallas normales e inversas.

Bourgeois et al. (1997) plantea 3 pasos a seguir para la restauración numérica:

- 1) Se representa en una vista en planta el estado actual, deformado de la superficie estratigráfica a ser restaurada como un mosaico de bloques plegados limitados por fallas. En este mosaico, los bloques pueden ser contiguos, separados por espacios o montados sobre otros de acuerdo a la naturaleza de las fallas, rumbo, normal o inversa, respectivamente. El espacio o traslape dependerán de la magnitud del despegue de la falla.
- 2) El estiramiento de los bloques produce cambios en su forma y en el ancho del espacio o del traslape en sus límites.
- 3) El programa empaqueta los bloques desplegados usando rotaciones y traslaciones rígidas para minimizar el área total de los espacios y traslapes. Esto deriva en el mosaico restaurado.

Por comparación con el mosaico no restaurado, se pueden calcular campos de deformación, incluyendo translación y rotación finita, o azimut de la inclinación de las fallas.

### **2.2.2 Principales supuestos**

- 1) Se asume que es posible dividir la región a ser restaurada en un mosaico de bloques completamente limitados por fallas. Puede que sea necesario incluir bloques artificiales, debido a la deformación interna (Ver Metodología).
- 2) Los bloques definidos son asumidos rígidos o deformados internamente por cizalle vertical o plegamiento, fallamiento normal e inverso, respectivamente. Para el caso inverso es necesario desplegar los bloques para considerarlos rígidos.
- 3) Se asume que la superficie a ser restaurada fue plana, horizontal y continua, antes de la deformación. Para el caso de este trabajo ese supuesto se transforma en una verdad, ya que, las capas de arena cumplen esas características.

- 4) La restauración de vista en planta no restaura la componente de desplazamiento relacionado al levantamiento rígido sobre un eje horizontal o deformación a pequeña escala.

### 2.2.3 Rol del Stepover

El *stepover* es una discontinuidad entre dos fallas aproximadamente paralelas. Son muy importantes en la determinación de la ubicación de la región de subsidencia y alzamiento a lo largo del sistema de rumbo.

Si el sentido del rumbo del *stepover* es el mismo que el sentido de la falla, se formará una cuenca de *pull-apart*. Si, por el contrario, el sentido del *stepover* es opuesto al de la falla se formará un *pop-up* (Figura 2-1). Estudios sísmicos en una falla de rumbo activa, como lo es la falla Calaveras, California, muestra una tendencia distinta de los hipocentros, separando las fallas en un segmento superior (2 – 7 Km de profundidad) y un segmento inferior 2 km más abajo (4 – 10 Km de profundidad). Esto sugiere que un *stepover* en profundidad (down-dip) está presente (Reasenberg and Ellsworth, 1982).

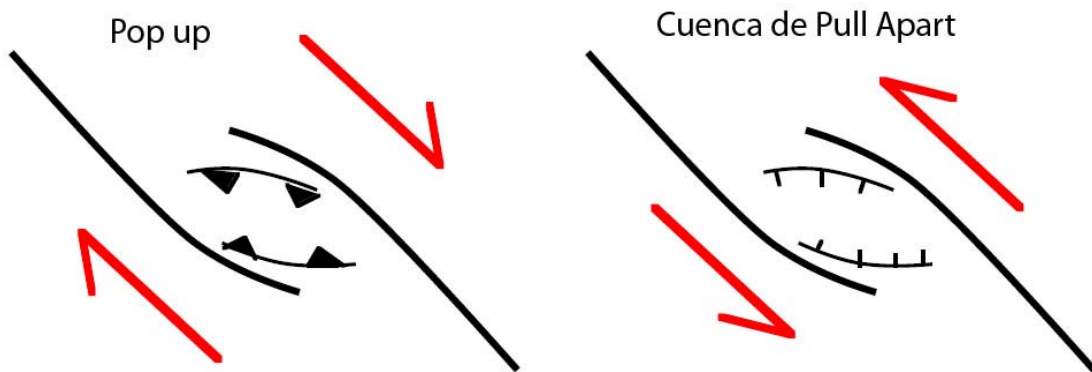


Figura 2-1. Esquemas con la formación de un *pop-up* y una Cuenca de *pull apart*.

### 2.2.4 Cuenca en zonas de rumbo

En las cuencas generadas en estas zonas, la subsidencia ocurre donde el rumbo es acompañado por una componente de divergencia, esto puede ocurrir por una curvatura o un *stepover* en la traza de la falla, generando una cuenca de *pull-apart*. Curvaturas, *stepover* (Figura 2-2).

### 2.2.5 Alzamiento pop-up

Los pop-ups y el alzamiento transpresional son parte integral de las zonas de rumbo intraplacas e interplacas. Son resultado de una componente de convergencia acompañando el rumbo (Figura 2-2).

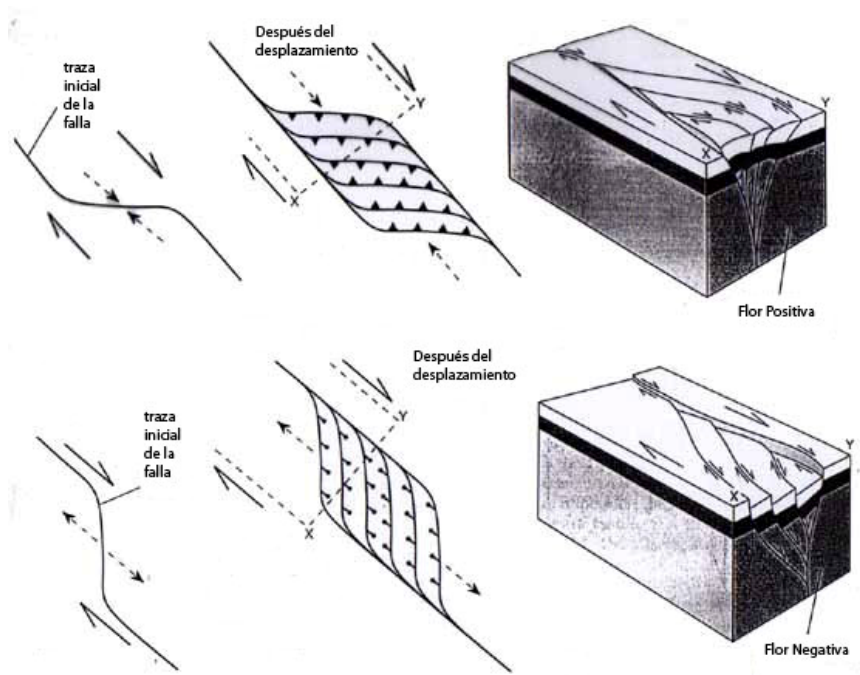


Figura 2-2. Flores positivas y negativas asociadas a curvaturas de fallas.

## 2.3 ESTUDIOS ANTERIORES

### Modelos Analógicos de restringidos con geometría stepover en sistemas de fallas de rumbo

McClay y Bonora (2001)

Estos autores, a través de modelos análogos, simularon la geometría y la evolución progresiva de estructuras *pop-up* antiforales desarrolladas en una cubierta frágil sobre restricciones con geometría *stepover* en sistemas de fallas de rumbo sinestrales *offset* en un basamento rígido, modelos que fueron realizados con y sin sedimentación sincinemática. Se describen 3 experimentos con restricciones *stepover* de 30° *underlapping*; 90° neutral, 150° *overlapping*. A través de secciones verticales y horizontales se construyó un modelo en 3-D de la arquitectura de un *pop-up*.



Como conclusión se establece que los *pop-up* con forma *lozenge* son característicos de los *underlapping stepovers*, mientras que los *pop-up* romboidales lo son de *stepover* neutrales y fuertemente sigmoidales son característicos de los *stepover overlapping*.

En las secciones cruzadas los *pop-up* son mayormente asimétricos, donde las fallas que los limitan mantean hacia el sistema de fallas del basamento.

## **Estado del arte en modelación analógica en el departamento de Geología de la Universidad de Chile.**

Diferentes estudios se han llevado a cabo en el laboratorio de modelación analógica del departamento de Geología de la Universidad de Chile, a diferentes escalas, desde modelos diseñados para simular el comportamiento del sistema astenósfera-litósfera hasta la corteza frágil. A continuación se presenta un resumen de los trabajos realizados para memorias de título y tesis de magíster. Esto a modo de aporte para entender lo que se puede conseguir con el laboratorio.

## **Influencia de la erosión en la evolución de un sistema compresivo, modelos análogos y aplicación al orógeno andino.**

Carlos Venegas (2004)

Este trabajo tiene como objetivos, comprender la influencia de la erosión en la evolución de la deformación de un sistema compresivo de gran escala, utilizando modelos analógicos, y aportar antecedentes para el entendimiento de la evolución morfo-estructural del orógeno andino, durante el Cenozoico Superior.

Se concluye que la erosión juega un papel que no es despreciable en la evolución de un sistema compresivo, ya que provoca una concentración en la deformación y del acortamiento en una estructura principal, mientras que sin ella, se propaga en numerosas estructuras. Los experimentos con erosión dan un resultado mucho más simétrico con respecto a la discontinuidad de velocidad. Y los modelos resultan con un relieve más sobresaliente cuando se aplica erosión.

Aplicando los resultados al orógeno andino, se puede decir que el desarrollo de los Andes está influenciado por la erosión. Se concluye que el altiplano formado en los Andes Centrales se formó bajo un régimen de escasa erosión y al N y S la erosión influyó mucho en la formación, localizando la deformación, dando como resultado una cordillera más angosta.

### **Modelación Análoga de la deformación en el margen continental entre 33°-34°S con distintos parámetros de convergencia.**

Francisca Albert (2006)

A través de este trabajo se pretende comprender cómo influyeron los parámetros tectónicos (velocidad de convergencia, acoplamiento del sistema y configuración estructural pre-existente) en la deformación de un sistema en régimen compresivo para una configuración morfoestructural dada.

Para esto se realizó un modelo que se compone de una o dos cuñas rígidas con la inclinación hacia el interior de la torta de arena (representando la Cordillera de la Costa y la Cordillera Frontal), una zona frágil-dúctil entre las cuñas (Cordillera Principal), la presencia de un trapecio de sílica sobre la zona dúctil (cámara magmática) y una depresión de comportamiento frágil (Depresión Central) situada entre las cuñas y la base dúctil siendo todas estructuras paralelas entre sí.

Se concluye que la velocidad de convergencia tiene una incidencia en la tasa de deformación, pero no en el estilo de la misma. Para una configuración con un ángulo de oblicuidad de 45° genera una deformación transcurrente concentrada en la zona de la cámara magmática. Para un ángulo de oblicuidad de 30° el estilo de deformación es muy similar al modelo con convergencia ortogonal. Un mayor acoplamiento del sistema provoca una distribución homogénea de la deformación. La presencia de cuñas rígidas provoca fallamiento inverso con vergencia hacia las cuñas. La presencia de una cámara magmática induce a concentrar la deformación en esta zona.

Además se concluye que las morfoestructuras tienen una participación importante sobre la evolución de la deformación.

**Modelación Analógica de la influencia de la sedimentación en la inversión tectónica. Aplicación a las formaciones Cenozoicas Abanico y Farellones (33°-36°S), Chile Central.**

Carolina Muñoz (2007)

Los objetivos de este trabajo fueron: comprender de qué manera influye la sedimentación en el desarrollo de una cuenca extensional y en el proceso de inversión tectónica utilizando el método experimental de modelación analógica, además de, aportar antecedentes que permitan entender la evolución y geometría de la cuenca extensional eocena?-miocena temprana y su posterior proceso de inversión tectónica miocénica, en la Cordillera Principal de los Andes de Chile Central, entre los 33° y 36°S.

Se concluye que el parámetro de la carga sedimentaria es influyente sobre la deformación, ya que el depocentro de la cuenca se hace más profundo en la medida que contenga más carga en su interior, y en el momento de la inversión, esta será de un menor porcentaje mientras mayor se la carga, debido a que ejerce carga sobre las estructuras normales y dificulta su reactivación. Además se establece que la influencia es la misma si se aplica durante la extensión, o bien, durante la compresión.

Haciendo analogía con la Cuenca invertida de Abanico se concluye que la asimetría en el espesor y edad de los depósitos en ambos bordes de la cuenca, se debería al desarrollo de una cuenca asimétrica por diferencia de cargas en ambos bordes, iniciando su desarrollo en el borde oriental. Las fallas asociadas al desarrollo de la cuenca fueron reactivadas como inversas de alto ángulo.

## **3 CAPITULO 3: METODOLOGÍA**

### **3.1 Generalidades**

Los modelos análogos han sido utilizados desde fines del siglo XIX. Han resultado ser una buena herramienta para el entendimiento de la influencia de los factores naturales.

En este trabajo se busca complementar estos análisis, a través, de la restauración numérica, para lograr entender y cuantificar la cantidad de deformación producida durante el desarrollo de los modelos analógicos, además de probar la validez del método.

### **3.2 Modelación analógica**

#### **3.2.1 Escalamiento de los modelos**

Para la serie de modelos que serán analizados en este trabajo, tomando en cuenta que no representan un sector de la corteza en particular, se ha escalado el modelo para que 1 cm represente 1 km en la realidad (McClay, 1990).

#### **3.2.2 Materiales analógicos**

Diferentes modelos analógicos han sido realizados, utilizando diversos materiales tan diversos como arena, arcilla, plasticina, silicona, miel, etc. Todos estos materiales han sido ampliamente probados en diferentes laboratorios y por muchos autores.

Para que el modelo sea representativo de la realidad se deben utilizar materiales cuyo comportamiento mecánico sea lo más similar posible al comportamiento de las rocas. El comportamiento general de la litósfera se puede simplificar, dependiendo del nivel que queramos modelar, en 2 tipos de deformación:

- Una deformación continua, en otras palabras, un comportamiento dúctil, que puede ser asociado a los niveles más bajos de la litósfera, o bien, a capas más dúctiles de la corteza sedimentaria (evaporitas, lutitas, etc).

- Una deformación discontinua, con comportamiento frágil, que correspondería a los niveles más superficiales de la corteza.
- Para simular el comportamiento dúctil se utiliza silicona, que presenta un comportamiento newtoniano ante la deformación, se deforma sin fallarse. Su viscosidad depende de la temperatura y varía de  $10^4$ - $10^5$  Pa/s.
- Para la simulación del comportamiento frágil se utiliza arena de cuarzo, la que se deforma fallándose. Su diámetro es inferior a 500  $\mu\text{m}$  con una distribución normal de los granos, es no cohesiva, su ángulo de fricción interna es de  $35^\circ$  y su densidad es  $1.400 \text{ kg/m}^3$ . La deformación asociada a las zonas frágiles está controlada por la fricción y se evidencia a través de fallas, siguiendo el comportamiento de Morb-Coulomb de aumentar su resistencia al cizalle con la profundidad.

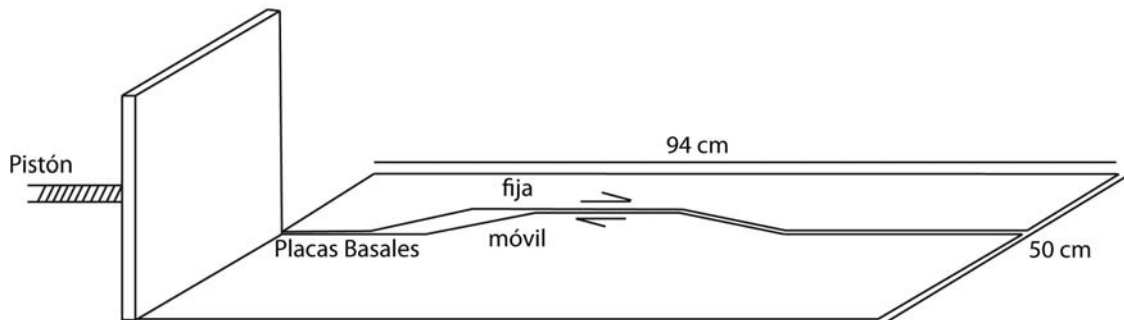
### **3.3 Aparato experimental y montaje**

Para realizar los experimentos necesarios para este estudio, se realizaron 2 montajes generales, uno de los cuales se subdivide en dos. Todo esto para lograr la correcta disposición de los dispositivos para obtener 3 ángulos diferentes de convergencia entre las placas.

En general, el aparato de experimentación comprendió un motor, que actúa como pistón, que a través de reductores mecánicos y la combinación de ellos se logra controlar la velocidad, siendo su movimiento en ambos sentidos. Solidaria al pistón, una muralla, a la que se encontraba adherida una placa metálica de 0,3 mm de espesor, con geometría stepover con diferentes ángulos, para generar una discontinuidad de velocidad (DV) para simular las discontinuidades del basamento (Fig. 3-4). Esta placa se movía con respecto a otra placa fija. Además se puede agregar un dispositivo de metal entre el pistón y la muralla capaz de rotar, que permite un movimiento oblicuo, con un ángulo definido. Todo este aparato experimental se montó sobre una mesa con una cubierta de vidrio (Fig. 3-2).

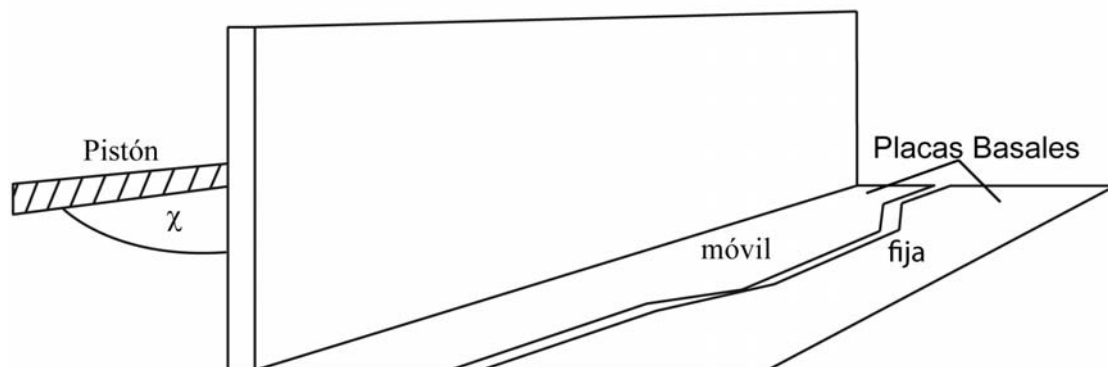
El primer montaje general consta del pistón con la muralla el cual está adosado al lado más angosto la placa móvil (Fig. 3-1), las medidas son 94 cm de largo por 50 cm de ancho. La

forma está condicionada por la dirección de movimiento necesario para la primera serie de modelos.



**Figura 3-1.** Esquema que muestra la disposición de las placas basales y del pistón para el primer montaje general.

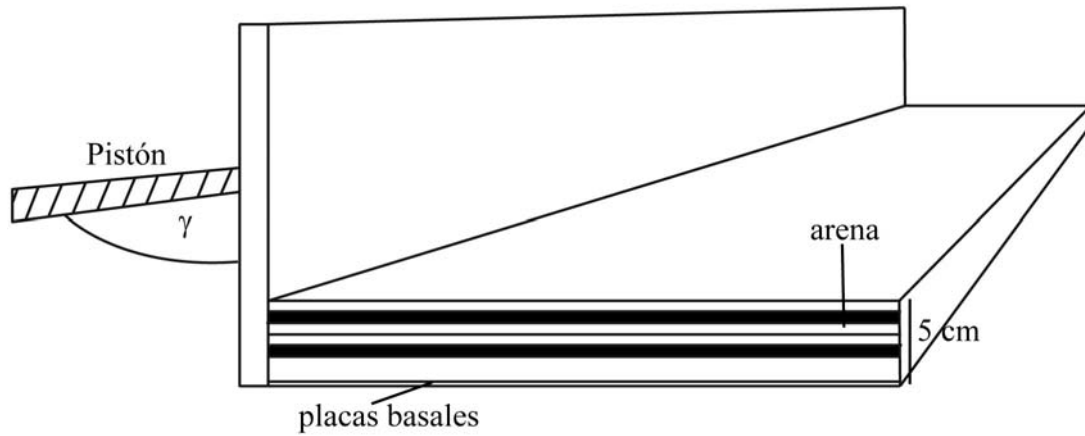
El segundo montaje general consta del pistón con la muralla, sobre la cual está adherida una placa móvil por su lado más largo, esto para lograr generar el movimiento oblicuo necesario para las 2 últimas series de modelos. Sus dimensiones eran 100 cm de largo por 50 cm de ancho.



**Figura 3-2.** Esquema que muestra la disposición de las placas basales y el pistón para el segundo montaje general.

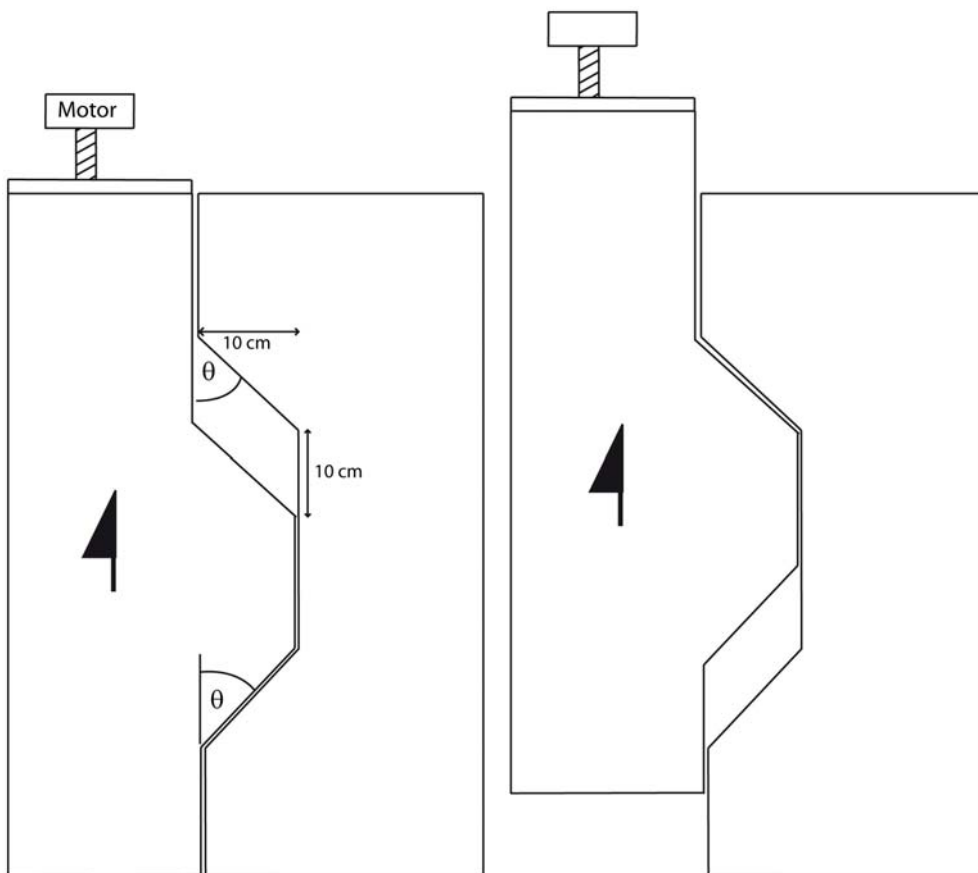
Todos los experimentos de este estudio se han realizado a escala de corteza frágil (corteza superior), por lo que se utilizó arena, la que fue puesta en capas de colores alternantes blanco y negro (Fig. 3-3). El ancho y el largo de la torta de arena corresponden a las dadas para los montajes generales, con un espesor de 5 cm separado en 5 capas de arena (Fig. 3-3).

Los límites de los bordes más delgados del aparato experimental se mantienen libres para impedir la compactación de la arena en estos lugares (Fig. 3-3).



**Figura 3-3.** Esquema que muestra la disposición de las capas de arena sobre las placas basales y la disposición del pistón.

El desplazamiento fue aplicado con una velocidad de 3 cm/h durante 200 min, en 3 series con diferentes ángulos entre la pared y el pistón ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $45^\circ$ ), alcanzando los 10 cm de desplazamiento. Cada serie consta además de 3 experimentos con diferentes ángulo de discontinuidad en la geometría *stepover* ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ ) (Fig. 3-4) para cuantificar la influencia de ambos ángulos en la distribución de la deformación.



**Figura 3-4.** Esquema que muestra la configuración de las placas basales.

### 3.4 Metodología para el análisis de la deformación

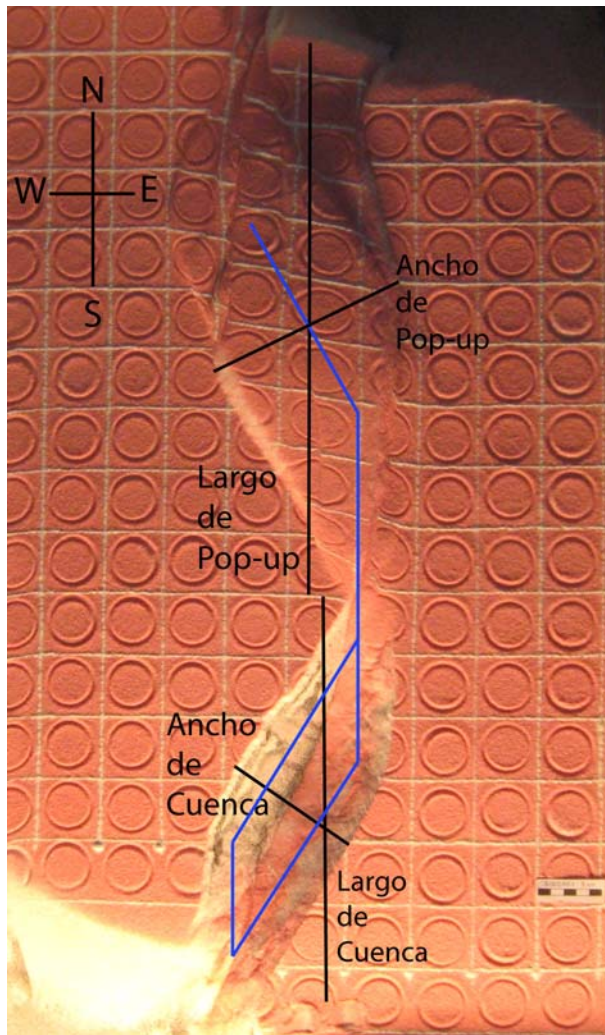
El análisis de la deformación asociada a cada experiencia se realiza de dos modos principales: Estudiando la evolución temporal en superficie, a través de marcadores (cuadrícula y círculos sobre la torta de arena), siendo registrada en fotografías tomadas cada 5 minutos, y también, al final de cada experiencia se realizaron cortes transversales al modelo, con la arena previamente humedecida, para, sumado al estado final en planta, analizar el estado final de las estructuras formadas durante la experiencia.

Los perfiles fueron realizados a través de todo el largo de las estructuras generadas, cada 3 cms., siendo perpendiculares a la dirección de movimiento principal, ya que, en este sentido, se aprecian mejor las estructuras en su conjunto, debido a que, en ningún sentido se pueden cortar todas las estructuras perpendiculares a su rumbo.

Se realizaron comparaciones de las características geométricas y temporales de los *pop-up* y de las cuencas generadas en los distintos modelos. En el caso de las características geométricas se utilizaron los perfiles, además de la imagen en planta para calcular el ancho de las estructuras, medidos perpendicularmente a la curvatura del *stepover*, y el largo, medidos paralelo al movimiento de rumbo principal (Fig. 3-5). Para el análisis temporal se estudia el tiempo de aparición de las estructuras principales, a través del análisis de la evolución temporal de los experimentos (Ver Anexo 1).

Se adoptó un sistema de referencias para ubicar espacialmente las estructuras, haciendo coincidir el sentido del movimiento de rumbo principal con el sentido N-S, dejando el E y el W como se conoce (Fig. 3-5).





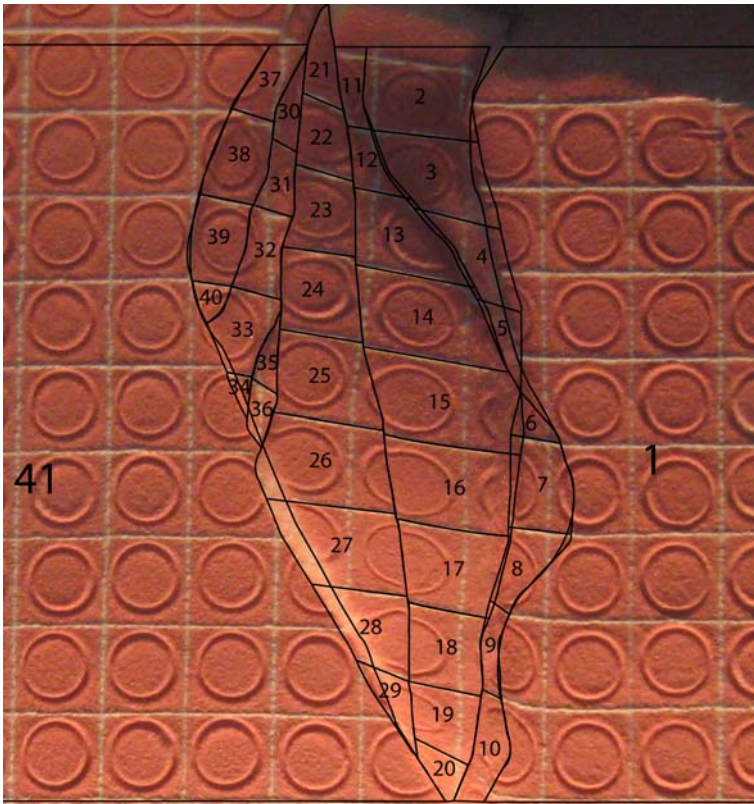
**Figura 3-5.** Vista en planta de un modelo que muestra los puntos cardinales sobre los que está basada la descripción de los modelos. También muestra la dirección en que fue medido el ancho y el largo de las flores, positivas y negativas.

### 3.5 Restauración numérica

La restauración numérica se realiza con un programa creado en la Universidad de Rennes, a través del lenguaje C, y funciona a través de métodos de minimización de espacios.

El estudio con el método de restauración numérica fue echo sobre el primer modelo de la primera serie, o sea, con un ángulo de  $0^\circ$  entre las placas,  $30^\circ$  en la curvatura del *stepover* y sólo para la zona de la flor positiva, debido a que no es posible realizarlo con la cuenca *pull-apart*, por la deformación que sufrió por la alta subsidencia que la caracterizó.

Para realizar la restauración se eligió nivel de arena superior (rojo) (Fig. 3-6), y se confeccionó el mapa con los bloques limitados por fallas. Además fue necesario cuantificar la deformación interna sufrida por estos bloques.

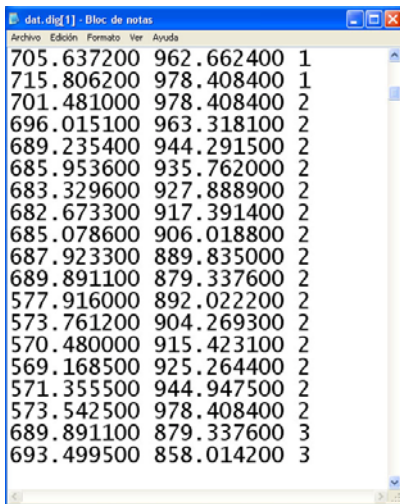


**Figura 3-6.** Diagrama de bloques realizado sobre la vista en planta.

Los bloques grandes fueron divididos en bloques más pequeños utilizando límites artificiales. Estos bloques se separan por la cantidad de deformación interna que presentan, esto dado por la elipse de strain generada por los círculos previamente marcados en la arena. Para el plegamiento no se consideraron los perfiles debido a que no son una vista perpendicular a los pliegues, por lo que tenemos un plegamiento aparente.

Con el diagrama de bloques realizado, se confeccionaron 4 archivos, que entregaron los datos necesarios para que el programa realizara los cálculos matemáticos, a través de iteraciones. Estos archivos fueron:

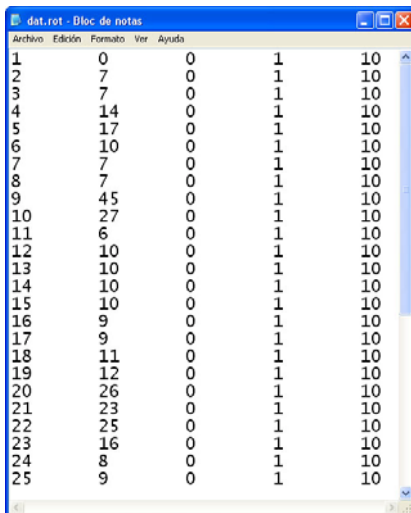
1. Dat.dig: entrega los datos de los puntos que componen cada bloque definido (Fig. 3-7).



Point ID	Coordinate 1	Coordinate 2	Block
705.637200	962.662400	1	
715.806200	978.408400	1	
701.481000	978.408400	2	
696.015100	963.318100	2	
689.235400	944.291500	2	
685.953600	935.762000	2	
683.329600	927.888900	2	
682.673300	917.391400	2	
685.078600	906.018800	2	
687.923300	889.835000	2	
689.891100	879.337600	2	
577.916000	892.022200	2	
573.761200	904.269300	2	
570.480000	915.423100	2	
569.168500	925.264400	2	
571.355500	944.947500	2	
573.542500	978.408400	2	
689.891100	879.337600	3	
693.499500	858.014200	3	

**Figura 3-7.** Archivo dat.dig con los puntos que conforman los bloques a restaurar.

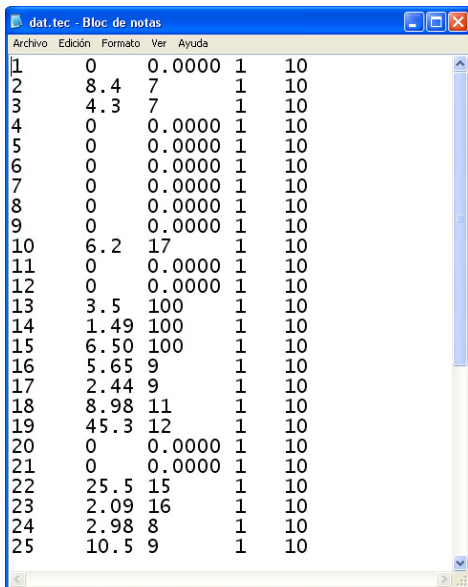
2. Dat.rot: entrega el dato con la cantidad de rotación de los bloque, si es conocida. También se define si no se conoce la rotación, es posible entregar la edad de la rotación (Fig. 3-8).



Point ID	Rotation	0	1	Age
1	0	0	1	10
2	7	0	1	10
3	7	0	1	10
4	14	0	1	10
5	17	0	1	10
6	10	0	1	10
7	7	0	1	10
8	7	0	1	10
9	45	0	1	10
10	27	0	1	10
11	6	0	1	10
12	10	0	1	10
13	10	0	1	10
14	10	0	1	10
15	10	0	1	10
16	9	0	1	10
17	9	0	1	10
18	11	0	1	10
19	12	0	1	10
20	26	0	1	10
21	23	0	1	10
22	25	0	1	10
23	16	0	1	10
24	8	0	1	10
25	9	0	1	10

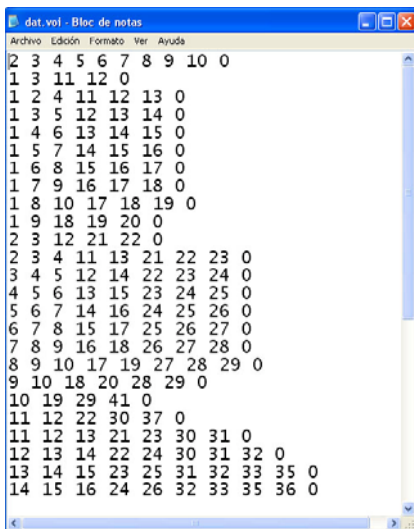
**Figura 3-8.** archivo dat.rot con las rotaciones que afectaron a cada bloque.

3. Dat.tec: entrega los datos de acortamiento y la dirección de acortamiento de cada bloque. Es posible, también, entregar la edad de la deformación (Fig. 3-9).



**Figura 3-9.** Archivo dat.tec con el acortamiento y la dirección con respecto al Norte del acortamiento.

4. Dat.voi: define los vecinos de cada bloque pre y post-deformación (Fig. 3-10).



**Figura 3-10.** Archivo dat.voi con los vecinos de cada bloque pre y post-deformacionales.

## 4 CAPÍTULO 4: RESULTADOS DE LOS MODELOS

En este capítulo se presentan los modelos realizados para este trabajo con la respectiva variación de los parámetros involucrados.

La idea general de estos modelos consiste en dejar un parámetro fijo y variar otro, para analizar su influencia en la deformación. Por lo que se dividieron los modelos en 3 series caracterizadas por el ángulo de convergencia entre las placas ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $45^\circ$ ) (Figs. 3-1, 3-2 y 3-3). Cada una de estas series consta de 3 experimentos que se caracterizan por el ángulo de la curvatura del *stepover* ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ ) (Fig. 3-4).

Los modelos realizados en este estudio tienen la característica general de que solo una placa estaba en movimiento y lo hacía en relación a otra placa que permanecía fija, esto tiene directa incidencia en la formación de las estructuras, debido a que la discontinuidad de velocidad generada por la placa móvil genera sólo una falla principal, que permanece activa durante todo el movimiento, mientras que en la zona de la placa fija, la falla se produce por el esfuerzo generado por el material transportado por la placa móvil y se produce una falla que permanece activa hasta que es más fácil producir otra falla, imbricando, ésta última, a la anterior.

Cabe destacar que la numeración dada a las fallas representa el orden en que fueron apareciendo en el modelo, por lo que, por ejemplo, la falla F1 afloró antes que F2.

### 4.1 Serie con $0^\circ$ en ángulo de convergencia de placas

Para esta serie, de 3 experimentos, se utilizó el primer montaje general descrito (ver Capítulo 3), que era el que permitía un ángulo de convergencia de placas de  $0^\circ$  fijo para toda la serie.

Esta serie se caracterizó por la formación de una cuenca de *pull-apart* con forma romboidal en el S. La formación de este graben se caracterizó por su rápida subsidencia, debido a la gran cantidad de extensión para la zona tan pequeña que fue afectada, y un *pop-up*, también con forma romboidal, en el N. Se diferenciará el estudio entre la cuenca y el *pop-up*, en que, para

el primer caso, será más bien cualitativo, debido a la dificultad para tomar datos exactos en la configuración final, al contrario del segundo caso, en que, será cualitativo y cuantitativo.

En una vista en planta de los experimentos se observa que las estructuras generadas coinciden muy bien con las discontinuidades de las placas basales, en la zona S, se observa la asimetría de la cuenca, con una falla principal al W y un set de fallas al E. En el N se aprecia una asimetría de la flor positiva, la que cambia en el centro del *stepover* compresional (Figs. 4-2, 4-4 y 4-6).

#### **4.1.1 Experimento con *stepover* de 30° (SISICRE 3)**

- a) La cuenca tiene forma romboidal (Figs. 4-1 y 4-2) con sus lados coincidiendo con la orientación de la discontinuidad en las placas basales. El ancho es de 10,8 cm y su largo es de 41,3 cm. La profundidad promedio fue de 4,2 cm.

Está limitada por 2 zonas de falla, que en su sector W consiste en una falla principal, F1, de manteo promedio de 50° al E y en el sector E, de un set de 3 a 5 fallas normales en dominó, con un manteo promedio de 60° al W. Todas estas fallas tienen una componente de rumbo dextral.

- b) El *pop-up* resultante tiene una forma romboidal con un largo de 47,7 cm, 16,3 cm de ancho y un alzamiento promedio de 1,7 cm (Figs. 4-1 y 4-2).

Está limitado por 4 zonas de fallas, NE, SW, SE y NW, que concentran la mayor parte de la deformación. Estas fallas tienen un origen en la discontinuidad de velocidad producida por la placa móvil, por lo que forma una estructura de flor positiva, con rotaciones de aproximadamente 10° en el sentido horario y fallas de rumbo dextrales con componente inversa, de rumbo NS (Fig. 4-1).

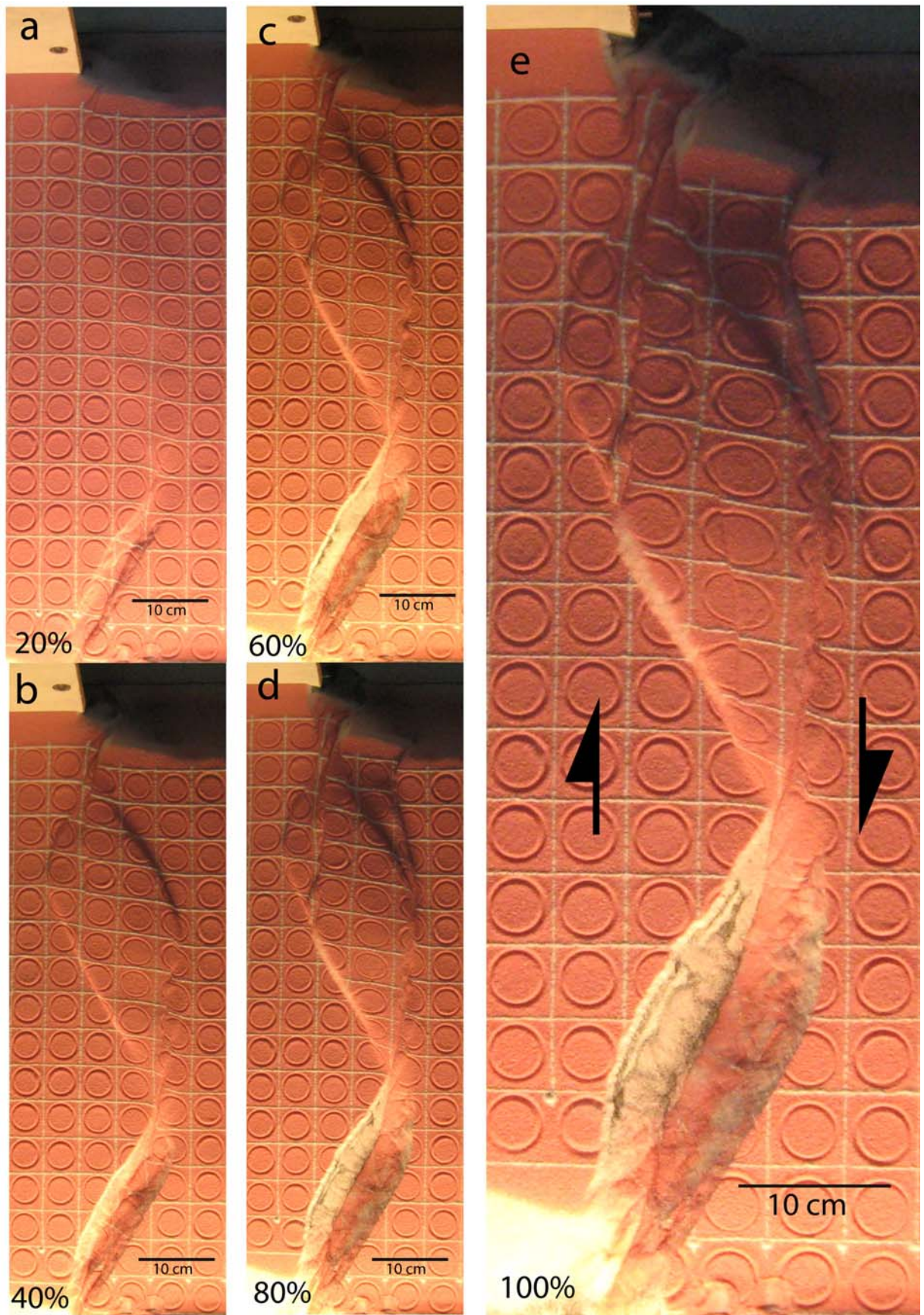
La zona de falla que limita el *pop-up* en su zona NE consiste en un abanico de fallas, que imbrican las fallas anteriores. Esto se debe a que sólo una placa estuvo en movimiento. Estas fallas son F4 y F7, inversas con vergencia NE. En la zona SW es sólo una falla la que controla el alzamiento, F5, inversa con vergencia SW. En las zonas SE y NW las fallas son de rumbo dextral con una fuerte componente inversa. En

la primera zona, SE, aflora la falla F6 con vergencia E, en la segunda, NW, aflora F3 y F10, ambas de rumbo dextral e inversas con vergencia NW. En el lado W de la flor se ligan las fallas F4 y F7 con F6 y, en la zona W, F3 y F5 también se unen.

Las fallas de rumbo que cortan la flor en sentido NS son las fallas F9, que en su zona S se ramifica formando la falla F11, y F12, que controlan el movimiento en el rumbo.

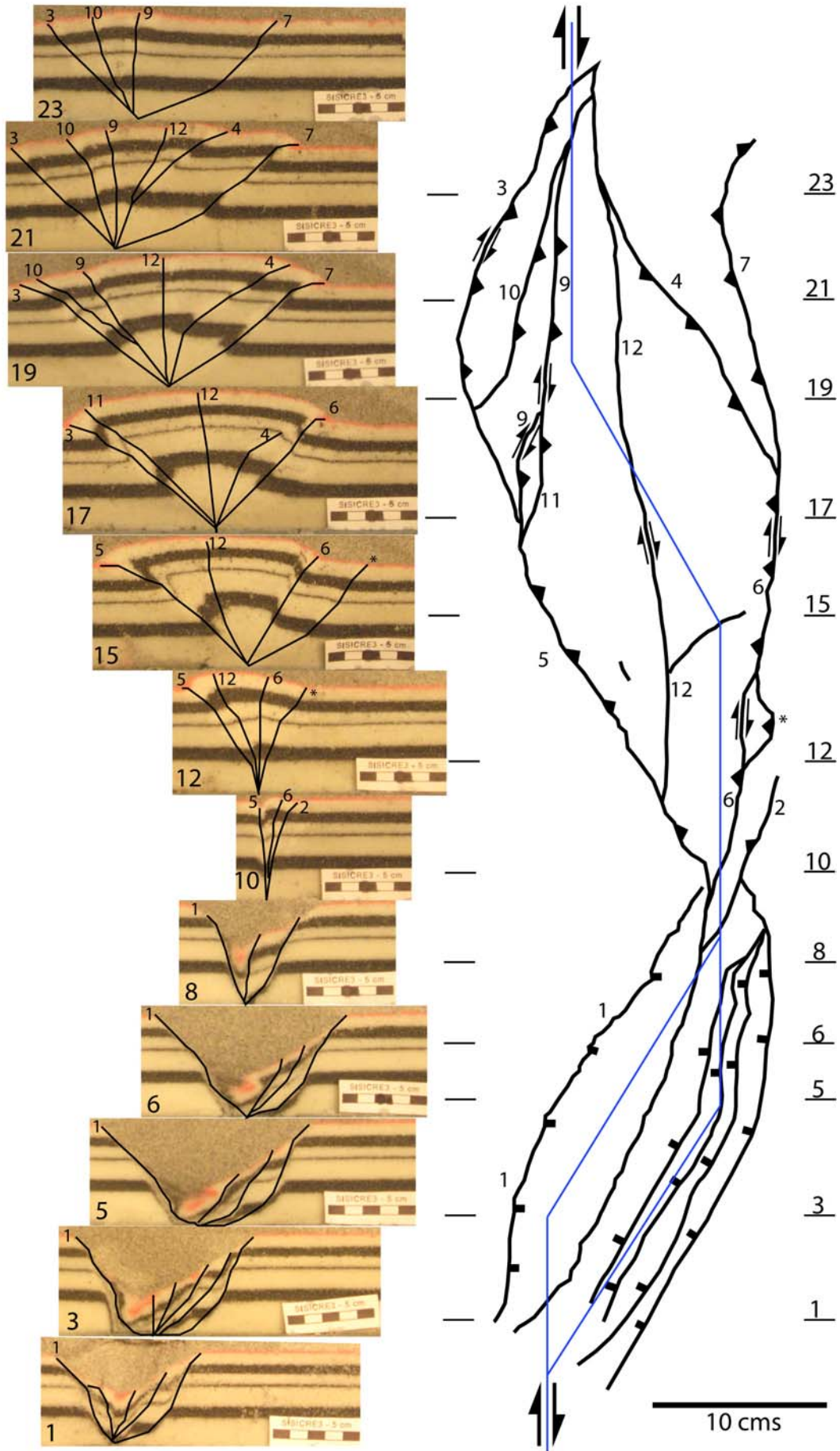
- c) En el desarrollo del modelo se observó que después de un 5% de desplazamiento comienza a formarse la cuenca con la aparición de la falla F1, después del 20% (Fig. 4-1a) se nota claramente un abombamiento en la zona del *stepover* compresional y las fallas normales que limitan la cuenca. Luego de 30% de desplazamiento se forman fallas F2 y F3, que junto con las fallas F5 y F6 al SW y NE, respectivamente, limitan el pop-up. Luego de 40% de desplazamiento (Fig. 4-1b) una nueva falla al E, F6 que controla el movimiento en el rumbo, desactivando la falla F2. Hasta este momento el bloque limitado por las fallas, hasta ahora descritas, ha rotado en sentido horario aproximadamente los 10° que vemos en el final del modelo. Luego aparece la falla F9 en la zona NW del bloque central del pop-up. En la mitad del experimento se aprecia que F9 está fuertemente activa, aunque con menos desplazamiento que F6, y muestra un comportamiento inverso adicional al de rumbo. En la zona NE aflora falla F7, desactivándose F4 y al W de F9 aparece la falla F10. Luego de esto, se mantienen las mismas fallas activas, hasta que después de un 70% de movimiento del pistón, se unen las fallas F4 y F6. F9 en su parte S se ramifica en la falla F11, la cual desactiva la rama anterior. Luego del 90% de desplazamiento, aparece la falla F12 al W de F11. Esta configuración el modelo continúa activa hasta completar los 100% de desplazamiento (Fig. 4-1e).





**Figura 4-1.** Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 3. El % indica la cantidad de desplazamiento del modelo sobre una distancia de 10 cm.





**Figura 4-2.** Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 3 y perfiles en distintos sectores.

#### 4.1.2 Experimento con *stepover* de 45° (SISICRE 4)

- a) La cuenca tiene una forma romboidal, pero un poco más cuadrada que la del modelo anterior, con los lados coincidiendo con los ángulos de las discontinuidades del basamento, con un ancho de 14,3 cm, un largo de 32,3 cm y una profundidad promedio de 4,3 cm (Figs. 4-3 y 4-4).

Está limitada por dos zonas de falla que van paralelas a la discontinuidad de velocidad producida por las placas basales. La del lado W es una falla principal, F2, de manteo promedio 45° al E. A su vez la zona de falla E consiste en un dominó de 3 a 5 fallas, F3, F4 y F6, con un manteo promedio de 60° al W (Figs. 4-3 y 4-4). Todas las fallas tienen una componente de rumbo dextral.

- b) El *pop-up* tiene un forma romboidal con un largo de 43,8 cm, 19 cm de ancho, y un alzamiento promedio de 1,9 cm (Figs. 4-3 y 4-4).

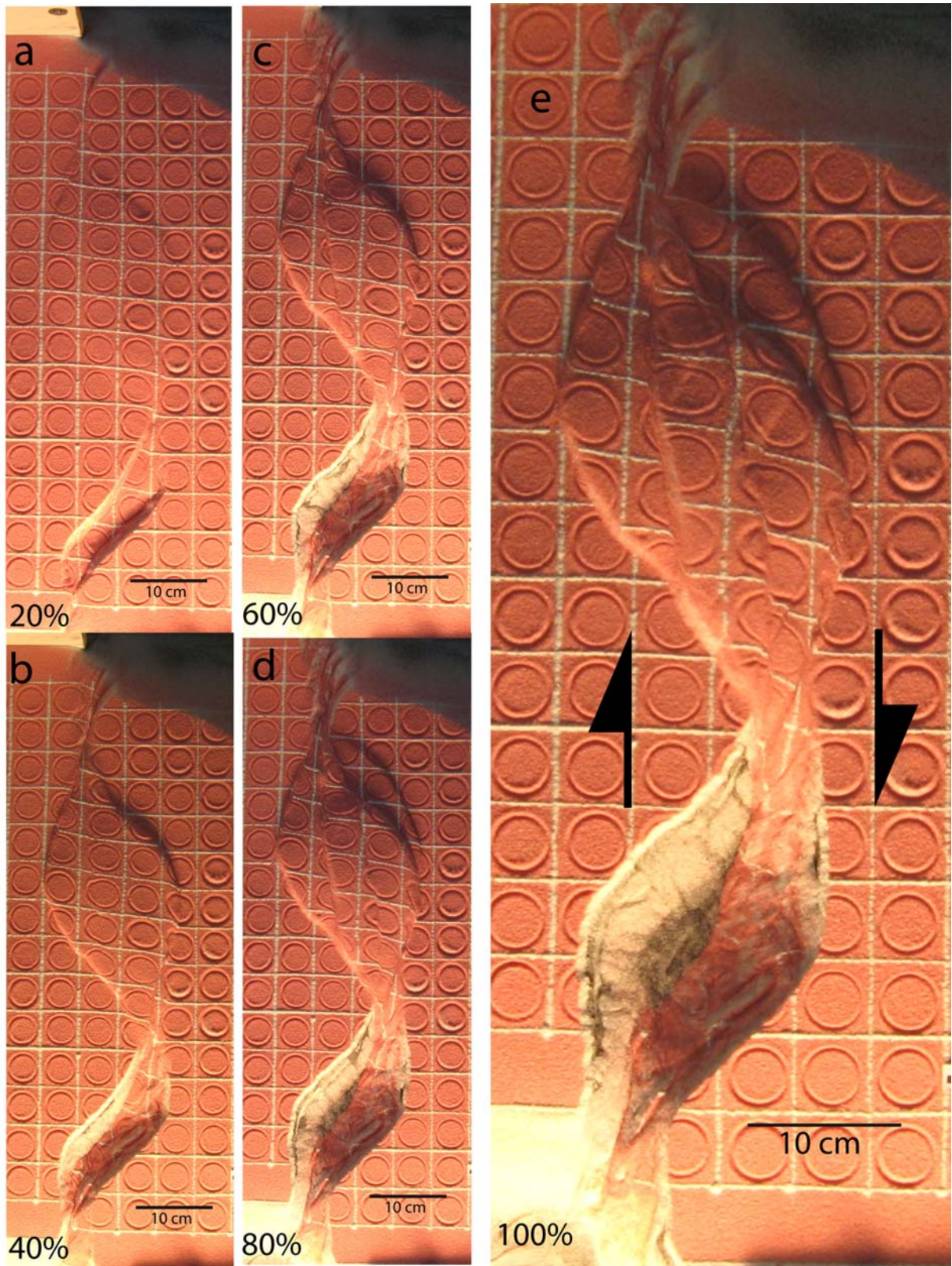
Está limitado por 4 zonas de fallas acordes a la discontinuidad de velocidad producida por el movimiento de las placas (Fig. 4-3). La zona de falla NW representada por la falla F7, tiene componente inversa, con vergencia al NW, y de rumbo dextral. Ésta se une más al S con la zona de falla SW de característica inversa, con vergencia al SW, representada por la falla F9. Esta falla se forma por el movimiento de la placa basal. La zona SE, se compone de una falla inversa, F10, con vergencia al E, y de rumbo dextral que va paralela al movimiento de la placa que en esta zona es NS. En la zona N se desarrollan 2 fallas inversas, F8 y F13, ambas con vergencia al NE, en que la segunda imbrica a la primera, producidas por la convergencia de las placas en la zona de la curvatura del *stepover*.

Todas las fallas tienen origen en la discontinuidad de velocidad provocado por las placas basales, generando una estructura de flor positiva. El centro del *pop-up* rotó en sentido horario entre 6° y 12° (Fig. 4-3). Los bloques rotados están limitados, por las fallas del borde de la flor positiva y por fallas de rumbo dextrales que cruzan en sentido NS la estructura, todas con un origen común en la discontinuidad de velocidades (Fig. 4-4). Estas fallas son F11 y F12, de vergencias W y E, respectivamente. Afloran además las fallas F15 y F16, de rumbo sinestrales, que acomodan la deformación producida por las fallas de rumbo. Estas fallas están

ubicadas en el bloque central limitado por las fallas F11 y F12 en su zona S y N, respectivamente (Figs. 4-3 y 4-4). También se forman las fallas F14 y F17, de rumbo dextrales, de sentido NE-SW, en el bloque limitado por las fallas F12, F10 y F8, en la zona S y N, respectivamente.

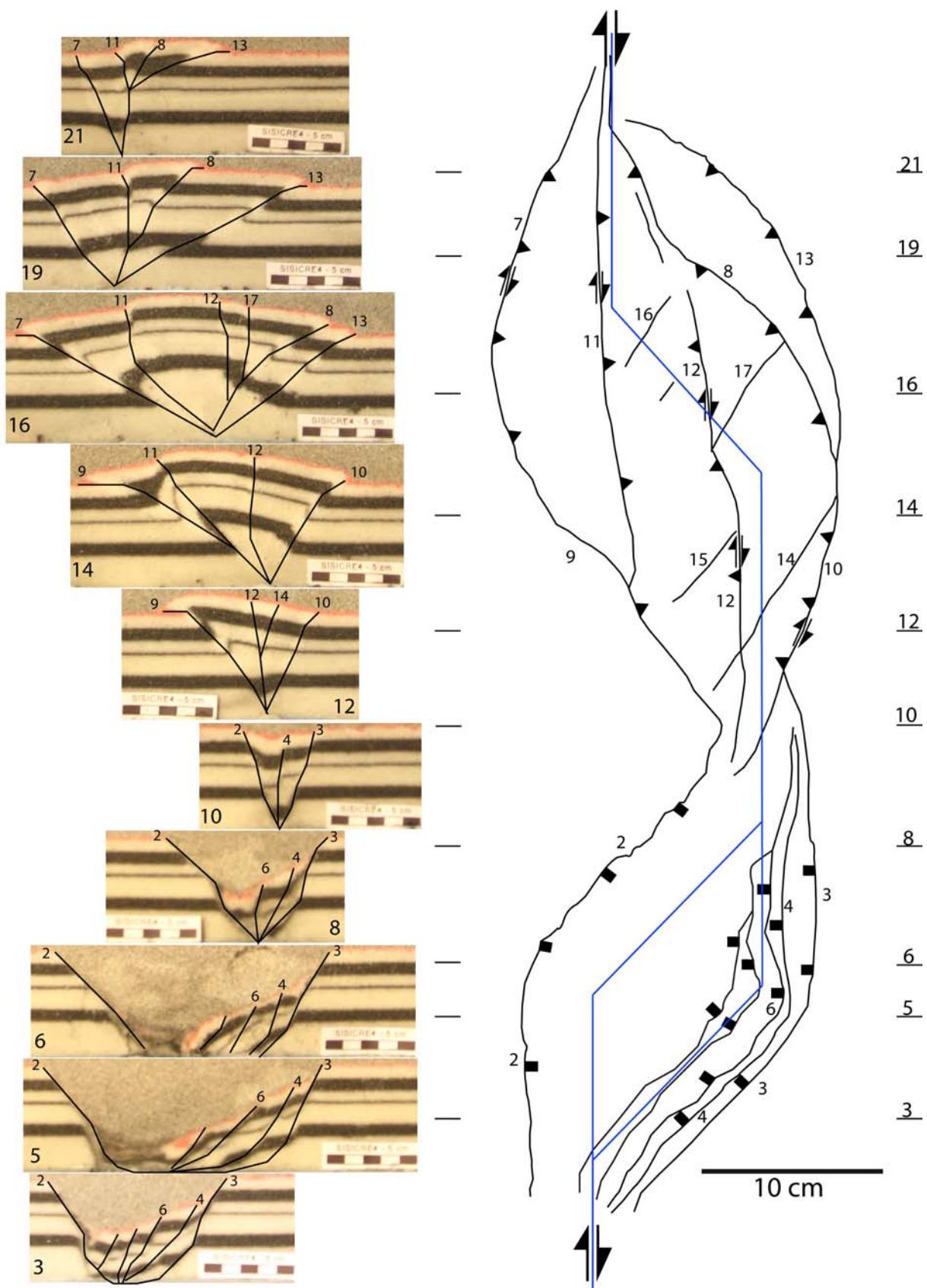
- c) Durante el desarrollo del experimento, y antes del 5% de desplazamiento, aparece la falla F1, de rumbo, concordante con el movimiento de rumbo principal y se comienza a desarrollar la cuenca de *pull-apart* con la aparición de la falla F2. Luego del 10%, la cuenca continúa su desarrollo con la aparición de la falla F3, opuesta a F2, y luego, la falla F4, justo al desactivarse F3. También comienza a abombarse la zona de compresión. Después de 20% de desplazamiento (Fig. 4-3a) F2 se extendió hacia el N y se formó una nueva falla en el lado E de la cuenca, la falla F6. En la zona N del modelo, aflora falla F7 en el NW y falla F8, en zona NE. Después de un 30% de movimiento de las placas, el *pop-up* queda completamente limitado por fallas al aflorar fallas F9, en el SW y F10, en el SE. Hasta este momento el bloque limitado por las fallas F7, F8, F9 y F10, ha rotado en sentido horario, aproximadamente 6°. Alcanzado el 40% de desplazamiento (Fig. 4-3b), se aprecia claramente una falla de rumbo, F11, que apareció un poco después de los 3 cm (30%). Esta falla corta el *pop-up* en un sentido NS cesando en gran parte la rotación del bloque que quedó en el lado E de la falla. Luego del 50%, F11 presenta una clara componente inversa. Cuando se alcanza el 60% de desplazamiento (Fig. 4-3c), comienza a desarrollarse la falla F12. Hasta este momento, el bloque limitado por el borde E de la flor y la falla F11 rotó hasta completar 12°. Con el 70% completado, aflora la falla F13, en zona NE, desactivándose la falla F8. Siguen las mismas fallas activas (Fig. 4-3d), hasta que, completado el 90% de desplazamiento comienzan su actividad las fallas F14 y F15. Después del 100% de desplazamiento se observa que aparecieron las fallas F16 y F17 (Fig. 4-3e).





**Figura 4-3.** Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 4. El % indica la cantidad de desplazamiento del modelo sobre una distancia de 10 cm.





**Figura 4-4.** Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 4 y perfiles en distintos sectores.

### 4.1.3 Experimento con *stepover* de 60° (SISICRE 5)

- a) La cuenca, de forma romboidal, tiene una forma aún más cuadrada que la del modelo anterior, con sus lados coincidiendo con los ángulos de la discontinuidad de las placas basales. Tiene un ancho de 14,7 cm, un largo de 22 cm (Figs. 4-5 y 4-6) y una profundidad promedio de 4,5 cm. Está limitada por dos zonas de falla, que van solidarias a la discontinuidad en el basamento. Por el W una falla principal F4, de manteo promedio 50° E y por el E un dominó 3 a 4 fallas, F2 y F3 de manteo 60° W (Fig. 4-6). Todas estas estructuras tienen una componente de rumbo dextral.
- b) El *pop-up* tiene forma romboidal con un largo de 40,1 cm, 24,2 cm de ancho, y un alzamiento promedio de 2,1 cm. (Figs. 4-5 y 4-6).

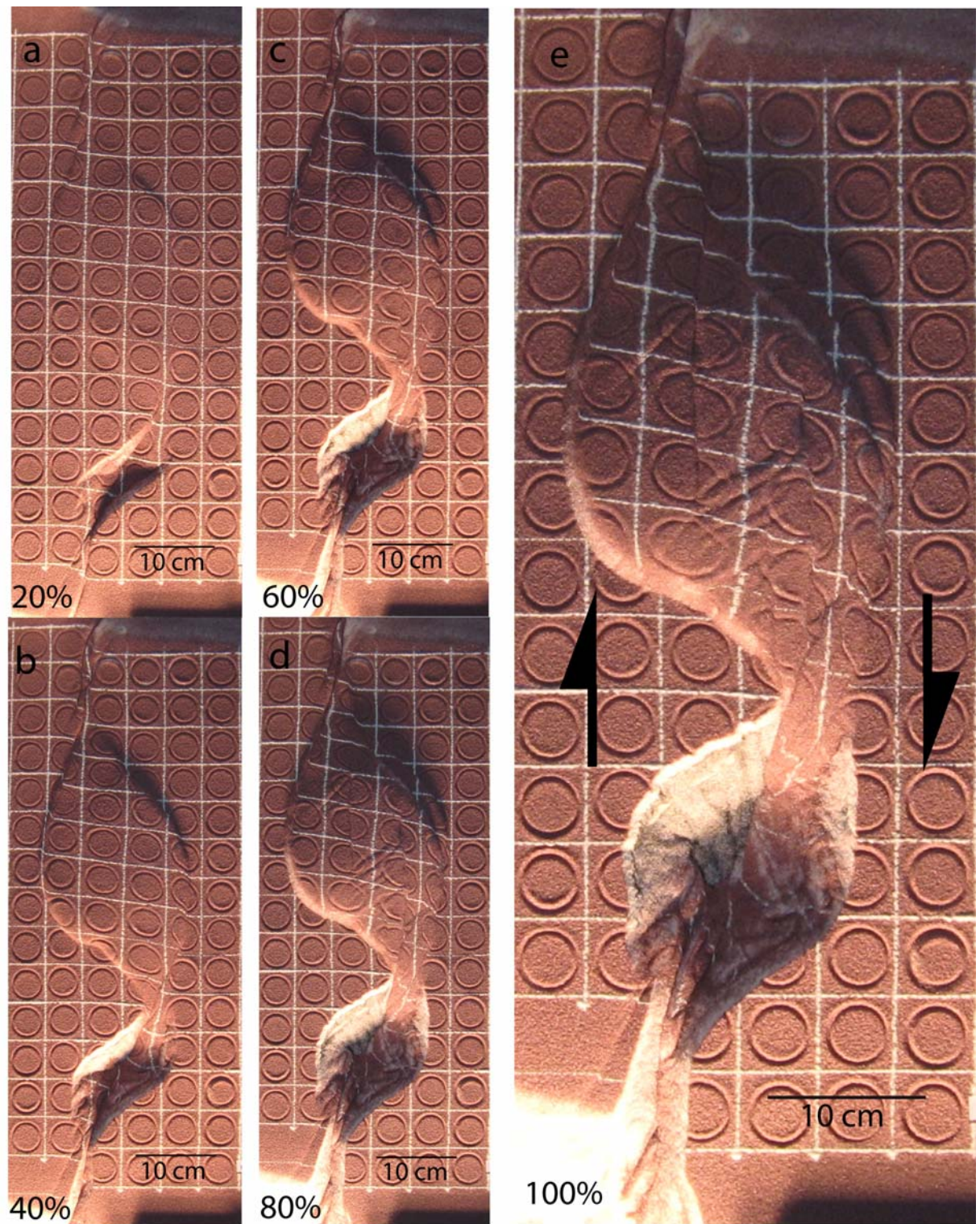
Está limitado por 4 zonas de fallas acordes a la discontinuidad de velocidad producida por el movimiento de las placas. Estas se pueden agrupar en: zonas de fallas inversas, que estarían por el NE y SW, y zonas de falla inversas y de rumbo dextrales, ubicadas en el NW y SE (Figs. 4-5 y 4-6). El primer grupo está relacionado con la convergencia de las curvaturas, en la zona NE consiste en un abanico de 3 fallas, F8, F12 y F17, de vergencia NE, y en la zona SW de una falla principal F9, de vergencia SW. El segundo grupo está afectado por el movimiento en el rumbo, además del acortamiento, en la zona NW aflora la falla F7, de vergencia NW y en la zona SE, F10, de vergencia E.

El centro del *pop-up* fue rotando hasta ser cortado por fallas de rumbo dextrales con cierta componente inversa (Fig. 4-5). Estas 2 fallas de rumbo, F11 y F13, van en sentido NS, paralelo al movimiento de rumbo principal. Esta rotación fue, en sentido horario, entre 12 y 15° (Fig. 4-5). Aparecieron fallas de rumbo sinestrales, F\* y F\*\*, entre las fallas de rumbo NS y al W de F13, respectivamente (Figs. 4-5 y 4-6). Además aflora la falla F15, de rumbo dextral al SE de F11.

- c) En el desarrollo del modelo se aprecia que 5% de desplazamiento aflora la falla F1 de rumbo acorde al movimiento de rumbo principal. Luego se forma la cuenca con la aparición de las fallas F2, F3 (en echelón) y F4. Luego de 10% se aprecia claramente la cuenca formada con la extensión al N y al S de las fallas mencionadas anteriormente y comienza el abombamiento en zona de compresión. Luego de 20% de

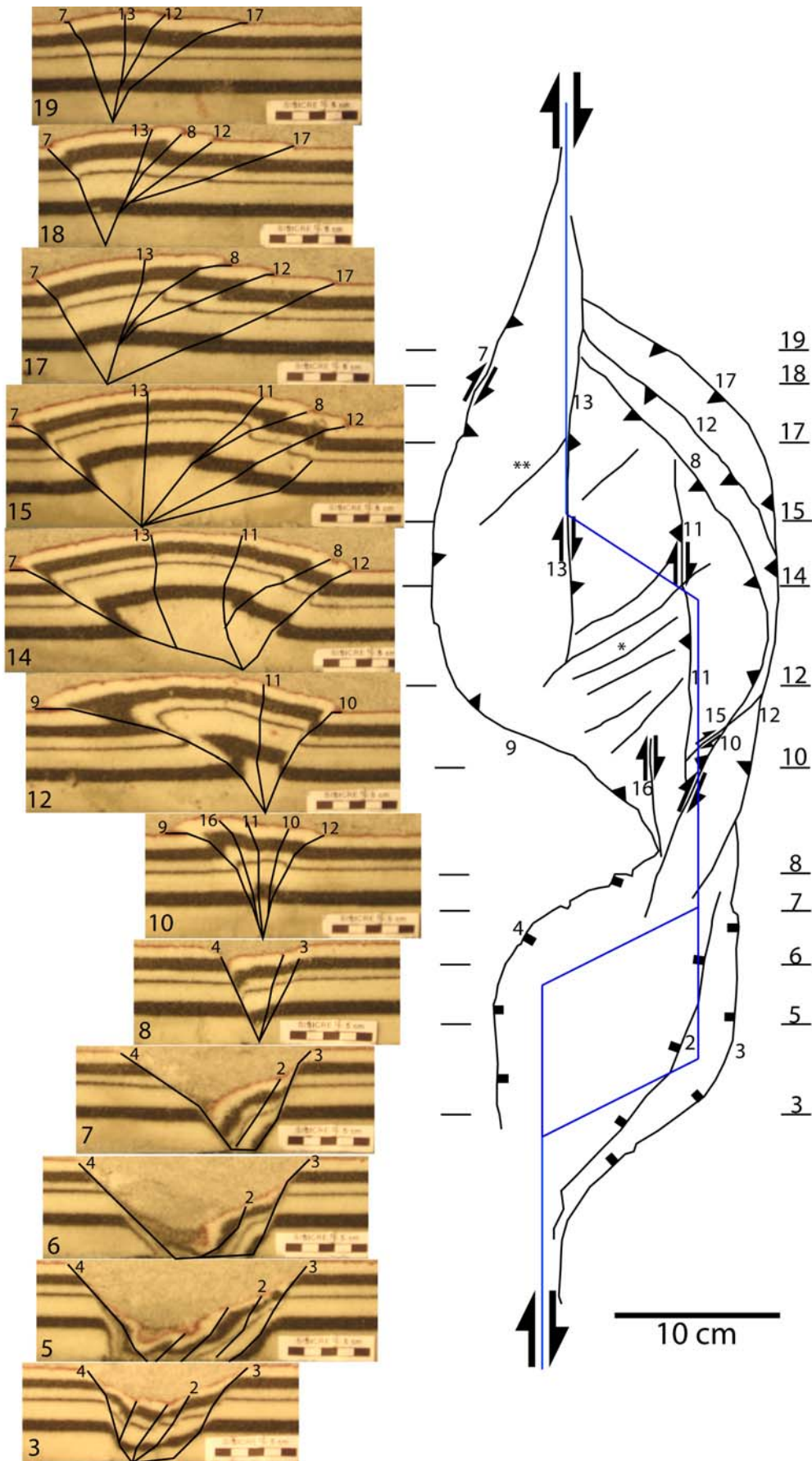
desplazamiento (Fig. 4-5a) afloran las fallas: F7 y F8. Con 30% de desplazamiento se aprecia el afloramiento de las fallas F9 y F10. Después del 40% de desplazamiento (Fig. 4-5b), aflora la falla F11. Hasta aquí, el *pop-up*, ha rotado 11° en sentido horario. Después de completado la mitad del movimiento de las placas, aparecen las fallas F\* y falla F\*\*. Cumplido el 60% del desplazamiento programado (Figura 4-5c), aparecen las fallas: F12 y F13, y la falla F11, cruza toda la flor en sentido N-S mostrando una componente inversa. Hasta aquí el centro del *pop-up* rotó hasta los 15° en sentido horario y el lado W de la falla 13, hasta los 12°. Cuando va 70% de desplazamiento se observan las fallas F15 y F16. Continúa la misma configuración de fallas activas (Figura 4-5.d) hasta que completado el 90% del desplazamiento aflora la falla F17. Luego, continúa el modelo del mismo modo hasta completar el 100% del desplazamiento (Fig. 4-5e).





**Figura 4-5.** Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 5. El % indica la cantidad de desplazamiento del modelo sobre una distancia de 10 cm.





**Figura 4-6.** Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 5 y perfiles en distintos sectores.

## 4.2 Serie con 30° en ángulo de convergencia de placas

En esta serie, de 3 experimentos, se utilizó el segundo montaje general descrito en la metodología (ver Capítulo 3), lo que permitió obtener un ángulo de convergencia entre las placas basales de 30°. Para lograr la convergencia de placas con los ángulos requeridos se tuvo que modificar la placa móvil en su curvatura del *stepover* en la zona S. Esto se hizo para evitar que las placas se montaran.

Esta serie se caracterizó por la generación de 2 *pop-up*, uno N y uno S, limitados por una zona de fallamiento de rumbo, definida por las placas basales (Figs. 4-7, 4-8, 4-9, 4-10, 4-11 y 4-12). Para el caso del *stepover* con 30° y 45° se aprecia en los perfiles (Figura 4-10 y Figura 4-12) fallas con componente normal e inversa, éste, sobre el *stepover* transtensional.

Los *pop-up* del N tienen forma sigmoidal o romboidal y sus lados coinciden con los ángulos de la discontinuidad basal (Figs. 4-8, 4-10 y 4-12). Se produce una falla producto del movimiento de la placa basal y un abanico de fallas en el lado de la placa fija. En el N están limitados por una falla inversa con leve componente de rumbo, con una clara curvatura. Al E y W, se desarrollan fallas inversas con componente de rumbo dextral y al S una zona de fallas de rumbo dextrales. En la zona N lo afecta una falla de rumbo dextral de entre 40 y 50° de rumbo (Figs. 4-7, 4-8, 4-9, 4-10, 4-11 y 4-12).

En el lado S, las flores positivas conforman una figura romboidal, están cruzados por una serie de fallas de rumbo y están limitados por fallas inversas con componente de rumbo dextral (Figs. 4-7, 4-9 y 4-11).

Todas las fallas tienen su origen en la discontinuidad de velocidad, producida por el movimiento de la placa móvil (Figs. 4-8, 4-10 y 4-12).

### 4.2.1 Experimento con *stepover* de 30° (SISICRE 7)

- a) El *pop-up* de la zona N tiene un largo de 81,3 cm, un ancho de 23,9 cm y un alzamiento máximo promedio de 2,2 cm (Figs. 4-7 y 4-8).

Está limitado por 4 fallas, en su sector N. F9, que es una continuación de F3, es una falla inversa con vergencia al NW que tiene una suave curvatura, por el lado W. F3 es una falla principal, inversa y de rumbo dextral, que tiene una vergencia hacia el SW, que coincide muy bien con el ángulo del *stepover*, en su lado E (Figs. 4-7 y 4-8). Está limitado por una abanico de 2 o 3 fallas inversas con componente de rumbo dextral, F4 y F13, que continúan muy bien la discontinuidad de las placas y F18, con vergencia hacia el E. Por el lado S está limitado por F1, falla de rumbo dextral, que es cortada por F6, otra falla de rumbo dextral, que tiene sentido NE-SW. F1 presenta una componente inversa, al W de F6, tiene vergencia N y, al E, vergencia S. En su zona N lo cortan 3 fallas de rumbo dextrales: F12, F16 y F21, las 3 de sentido NE-SW y en el S lo corta F6 de rumbo dextral de sentido NE-SW (Figs. 4-7 y 4-8). También afloran dos set de fallas de rumbo sinestrales en la parte N y S, que son las fallas F19 y F20, respectivamente. El bloque central está rotado 8°, en sentido horario (Fig. 4-7).

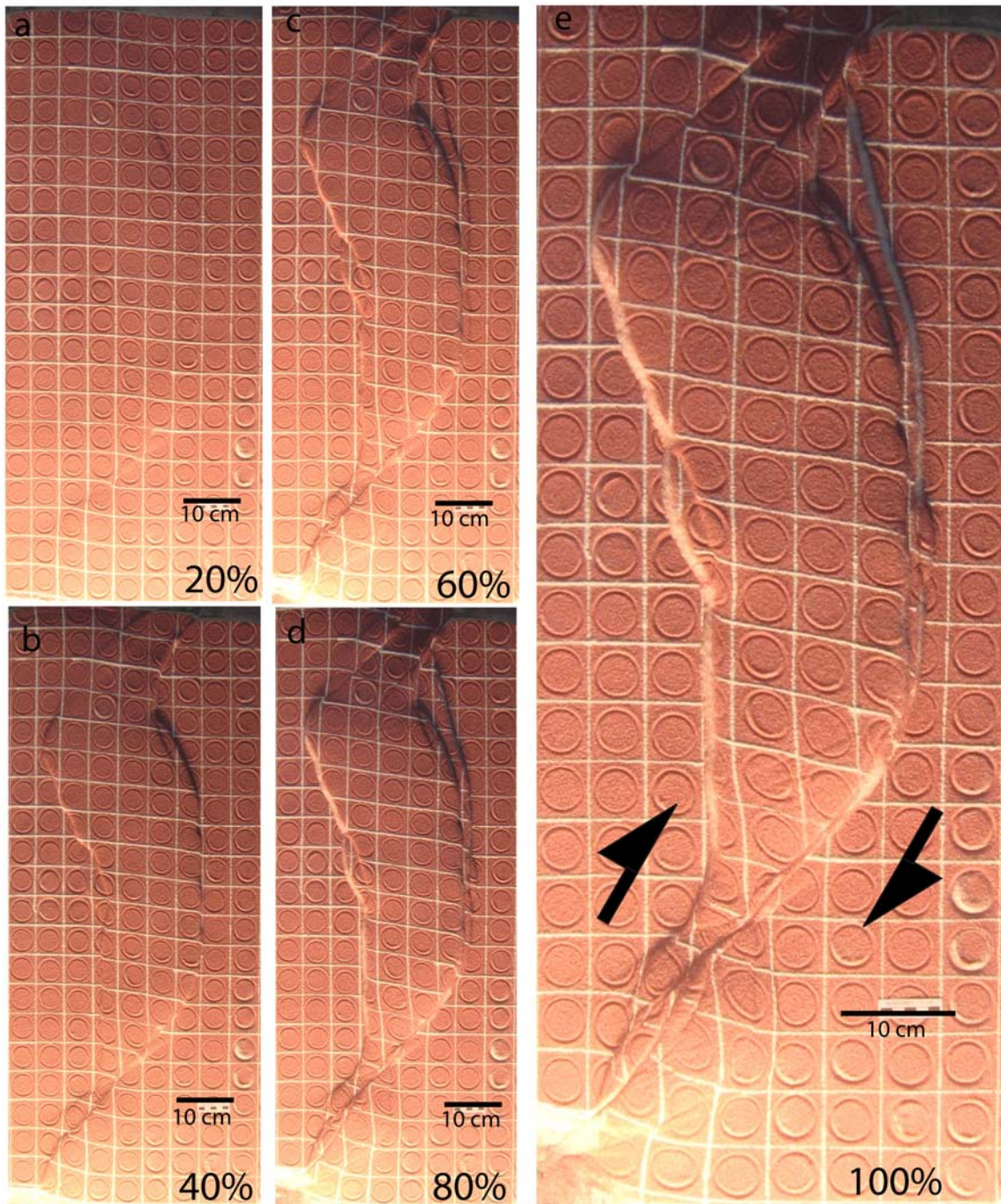
- b) El *pop-up* del S mide 20,3 cm de largo por 14 cm de ancho con un alzamiento máximo promedio de 1,2 cm (Figs. 4-7 y 4-8).

Está limitado por fallas inversas con componente de rumbo y fallas de rumbo. Por el N, está limitado por la falla F1, de rumbo dextral, la que está cortada por la falla F6, de rumbo dextral. Por el S y el E, el límite del *pop-up* lo constituye la falla F17, inversa y de rumbo dextral, de forma curva. Por el lado W es la falla F5, inversa de vergencia W y con componente de rumbo (Figs. 4-7 y 4-8). El bloque central está cortado por falla F6, de rumbo dextral, de sentido NE-SW, además de las fallas de rumbo F10 y F14, de dirección NNE-SSW, y con leve componente inversa de vergencia W. Los bloques limitados por estas fallas están rotados 15° en sentido horario (Fig. 4-7).

- c) En el desarrollo del experimento se observó que luego del 5% de desplazamiento de la placa móvil, aflora la falla F1. Con el 10% completado, se aprecia claramente un abombamiento en zona N. Al llegar al 20% (Fig. 4-7a) aflora la falla F2, justo después lo hace la falla F3, por lo que al completar el 30% de desplazamiento, F3 se ha extendido hacia el centro del modelo, afloraron la falla F4, que se extiende hacia el S, y las fallas F5 y F6, que se extienden hacia el N, desactivándose F1. Luego del 40% de desplazamiento (Fig. 4-7b) se observan aflorando las fallas F9 y F10, y en este momento aflora la falla F11, completado la mitad del desplazamiento aflora F12. Cumplido el 60% (Fig. 4-7c) aflora la falla F13, extendiéndose hacia el S, y la falla F14. Con un 70% afloran las fallas F16 y F13 que se extienden aún más hacia el S.

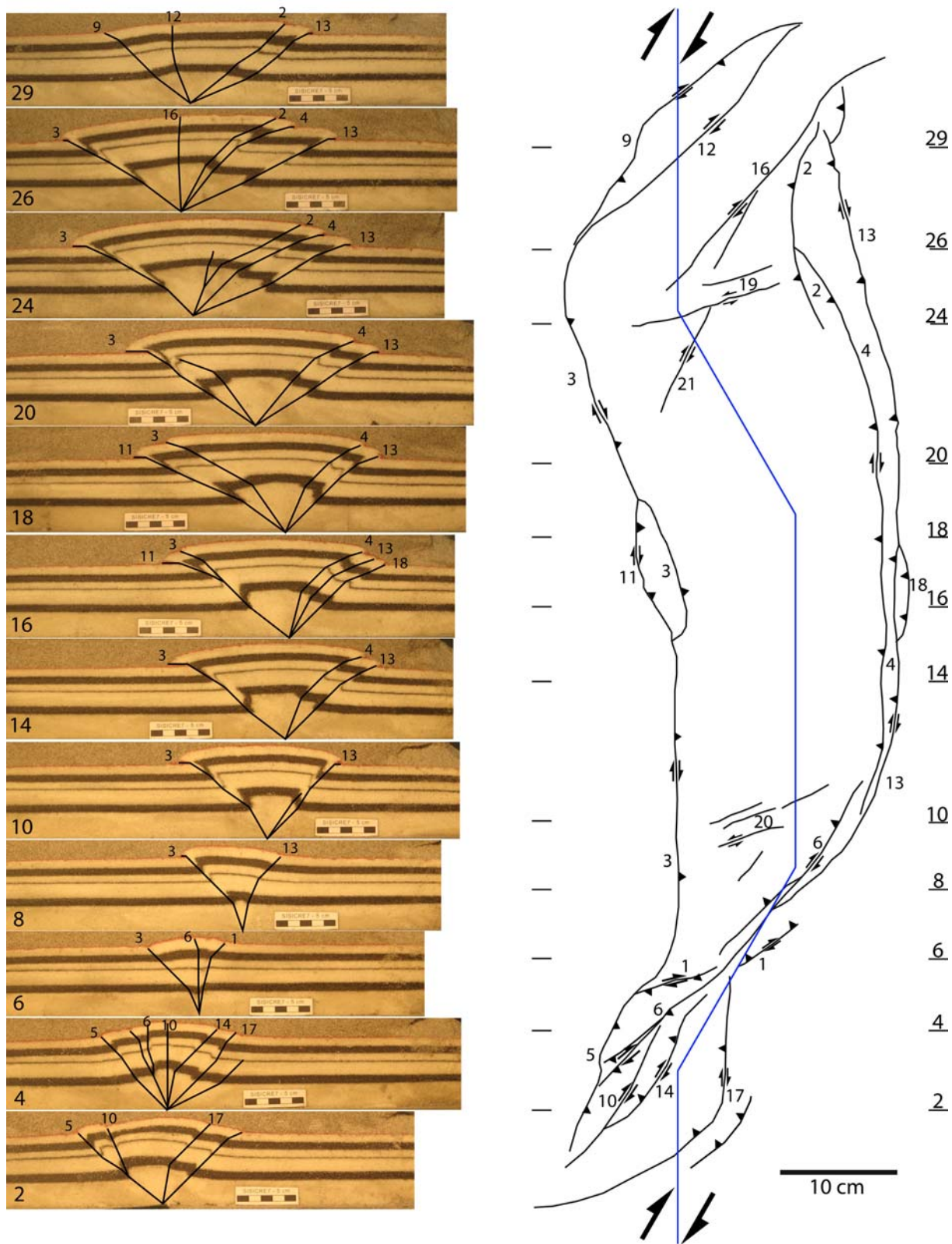
Luego del 80% de desplazamiento (Fig. 4-7d) afloran las fallas F17, F18, F19 y F20, para luego, seguir así hasta completar el 100% del desplazamiento programado, que es cuando aflora la falla F21. La rotación del bloque del *pop-up* del N, fue a un ritmo constante llegando hasta el final de la experiencia a rotar 10° en sentido horario (Fig. 4-7e).





**Figura 4-7.** Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 7. El % indica la cantidad de desplazamiento del modelo sobre una distancia de 10 cm.





**Figura 4-8.** Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 7 y perfiles en distintos sectores.

#### 4.2.2 Experimento con *stepover* 45° (SISICRE 8)

- a) El *pop-up* del N tiene forma sigmoidal o romboidal, alargado hacia el S, con un ancho de 26 cm y 74 cm de largo, posee un alzamiento promedio de 2 cm (Figs. 4-9 y 4-10).

Está limitado por fallas inversas y fallas inversas con componente de rumbo, por el N y por el E está limitado por la falla F3, inversa con vergencia al W y de rumbo dextral. Esta se curva en la zona N, hacia el E en un ángulo mayor que el experimento anterior, Por su lado E, está limitado por un set de 2 o 3 (dependiendo del lugar) fallas inversas en abanico. Estas fallas son F2, F6, F10 y F15, con vergencia hacia el E. Por el W, está limitado por la falla principal F3, inversa, que se curva siguiendo la discontinuidad del *stepover* y tiene una vergencia hacia el W. Por el S está limitado por una falla de rumbo dextral, F1 de sentido ENE-WSW, cortada por otra, F6, de rumbo dextral de sentido NE-SW. F1 tiene componente inversa, cuya vergencia varía en el rumbo, siendo de vergencia N al W de F6 y de vergencia S al E de F6 (Figs. 4-9 y 4-10).

El *pop-up* es cruzado por una falla principal de rumbo dextral en su zona N, F13, con rumbo 60°E y otra en el S, F6, además otras pequeñas en todo su largo, y una falla de acomodación, antitética, de sentido EW (F4). El bloque central está rotado 10° en sentido horario (Fig. 4-9).

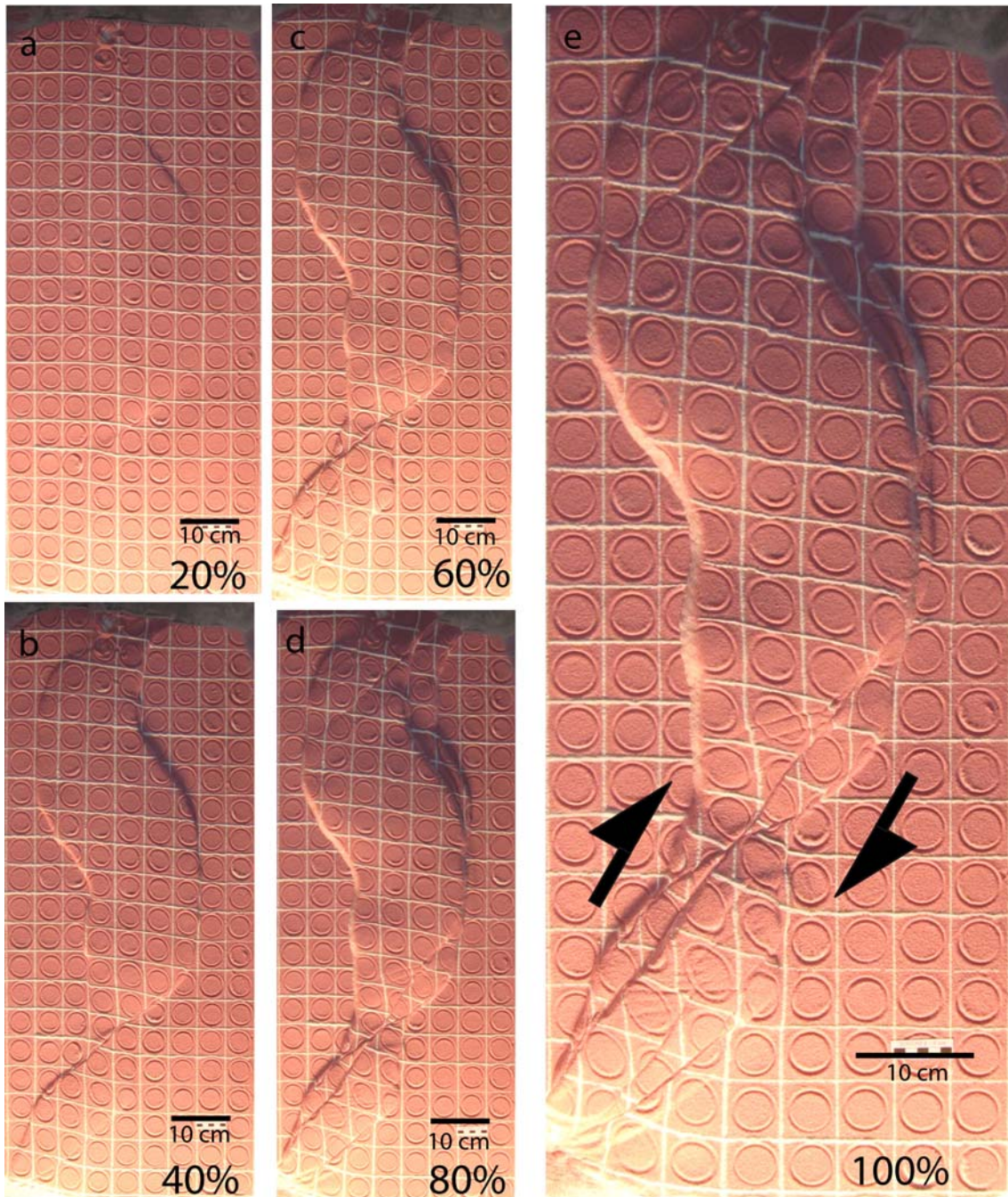
- b) El *pop-up* del S tiene forma de almendra con un ancho de 14,3 cm, un largo de 28,3 cm, y su alzamiento máximo promedio es 1,2 cm (Figs. 4-9 y 4-10).

Está limitado por fallas de rumbo y fallas de rumbo con componente inversa. Por el N lo limita la falla F1. Esta falla F1 con vergencia al N se extiende hacia el S, curvándose, presentando una vergencia W y limitando el *pop-up* por el W. Por el E, lo limita F8, una falla inversa de vergencia E con componente de rumbo dextral. Por el S está limitado por la 2 fallas de rumbo con componente inversa de vergencia SE, que corresponden a F5 y F20 (Figs. 4-9 y 4-10).

El *pop-up* es cruzado por un set de fallas de rumbo, siendo la más importante F6, que presenta además una componente inversa y F14. Se presentan también, fallas antitéticas de sentido EW, que acomodan la deformación entre las fallas dextrales. El bloque central de esta estructura está rotado 25° en sentido horario (Fig. 4-9).

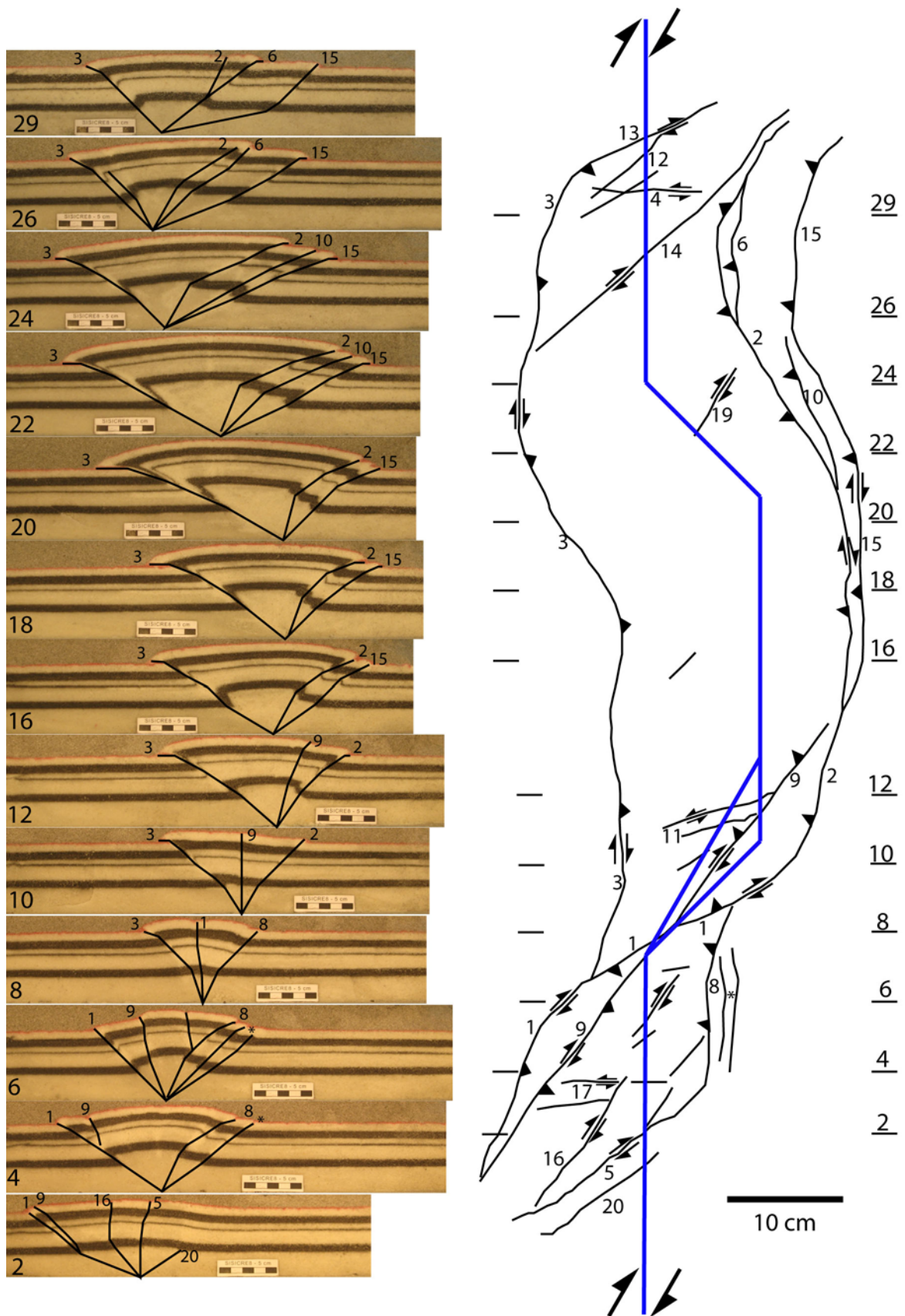
c) En el transcurso del modelo se observa que completado el 10% de desplazamiento se aprecian las primeras características del movimiento dextral, y ya completado el 15% aflora la falla F1. Con el 20% completado (Fig. 4-9a) afloran las fallas F2 y F3. Luego F1 comienza a presentar componente inversa, con 2 vergencias opuestas. Cuando se completó el 30% del desplazamiento F1, F2 y F3 se han extendido al S, y F2 también lo hace al N. Además, aflora la falla F4 en el *pop-up* del N y la falla F5 en el *pop-up* del S. Completado el 40% de desplazamiento (Fig. 4-9b) afloran las fallas F8 y F9. En la mitad del desarrollo del experimento afloran las fallas F10 y F11, y F9 se extiende y corta a F1 hacia el N. Al llegar al 60% de desplazamiento (Fig. 4-9c) se aprecian claramente las fallas F13, F14 y F15. En esta etapa también comienza a aflorar la falla F16. Completado el 70% del desplazamiento aflora la falla F17 y la falla 16 se extiende hacia el N. Al completar el 80% del movimiento de la placa (Fig. 4-9d), F15 se extiende hacia el S y comienza a aflorar la falla F19. En el 90% de desarrollo, aflora la falla F20, para posteriormente continuar la misma configuración de fallas activas hasta el fin del modelo (Fig. 4-9e).





**Figura 4-9.** Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 8. El % indica la cantidad de desplazamiento del modelo sobre una distancia de 10 cm.





**Figura 4-10.** Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 8 y perfiles en distintos sectores.

### 4.2.3 Experimento con *stepover* de 60° (SISICRE 9)

- a) El *pop-up* de la zona N tiene forma romboidal alargada hacia el S, con un ancho de 27,3 cm, un largo de 66,6 cm y un alzamiento máximo promedio de 2,2 cm (Figs. 4-11 y 4-12).

Está limitado por fallas inversas y fallas inversas con componente de rumbo. Por el N está limitado por la falla F2, inversa, de vergencia NW, y de rumbo dextral que tiene una curvatura, aún mayor que el modelo anterior. Hacia el S, F2 se curva siguiendo la curvatura de la discontinuidad basal, presentando una vergencia, principalmente, W, limitando la flor positiva por el sector poniente. Por el E, la flor está limitada por un set de 3, 4 e incluso 5 fallas inversas, dependiendo del sector. Estas fallas son F1, F4, F5, F9, F11 y F18, todas con vergencia E, que afloran, principalmente en el centro-norte de la estructura. Por el S, está limitado por la falla F3, de rumbo dextral, que tiene componente inversa con vergencias al N y al S, en sus lados W y E, respectivamente, estos lados están limitados por la falla F6 (Figs. 4-11 y 4-12).

Está cruzado por 4 fallas de rumbo dextrales de orientación NE-SW. Estas fallas son: F6, F7, F13 y F17, la primera aflora en la zona S, la segunda en el N y las otras 2, en la zona central. El bloque central está rotado 13° en sentido horario (Fig. 4-11).

- b) El *pop-up* de la zona S tiene forma romboidal y presenta un largo de 30 cm y 16,8 cm de ancho, su alzamiento máximo promedio es de 1,7 cm (Figs. 4-11 y 4-12).

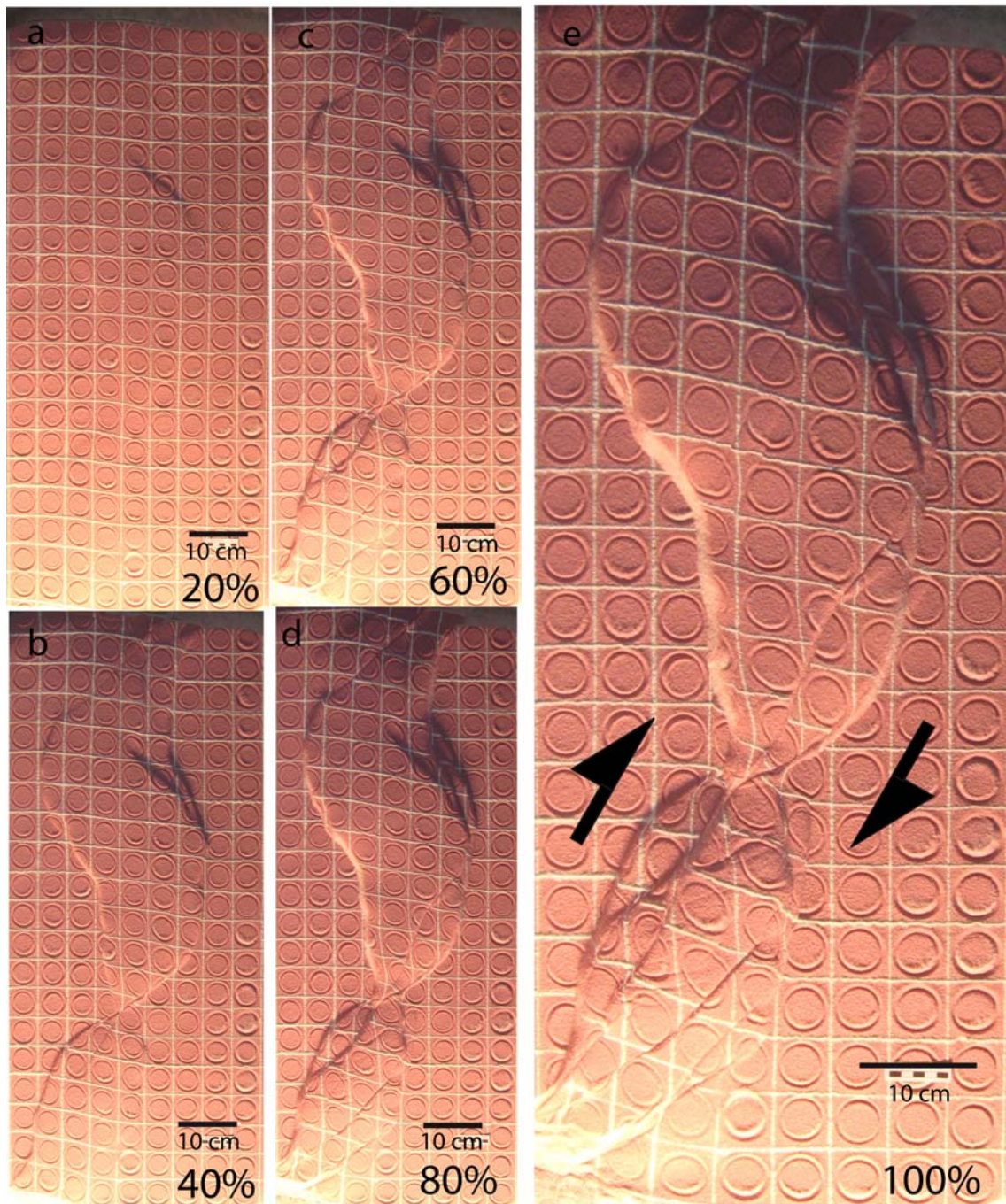
El *pop-up* está limitado por fallas inversas con componente de rumbo. Por el norte está limitado por la falla F3 (ver descripción anterior), que se hacia el S se curva y presenta un vergencia W, limitando el *pop-up* por el W. Por el E está limitado por falla inversas con componente de rumbo: F\* y F14, dispuestas en abanico. Hacia el S, el límite es la falla F8' (Figs. 4-11 y 4-12).

Está cortado por fallas de rumbo dextral de sentido NE-SW. Una de ellas es la falla F6, que además tiene componente inversa y coincide con los 30° del ángulo de oblicuidad. Otra es la falla F8 y F8' afloran en la zona S. Entre las fallas de rumbo dextrales se presentan fallas de rumbo sinestrales que acomodan la deformación (Figs.

4-11 y 4-12). El bloque central presenta una rotación máxima de  $25^\circ$  en sentido horario (Fig. 4-11).

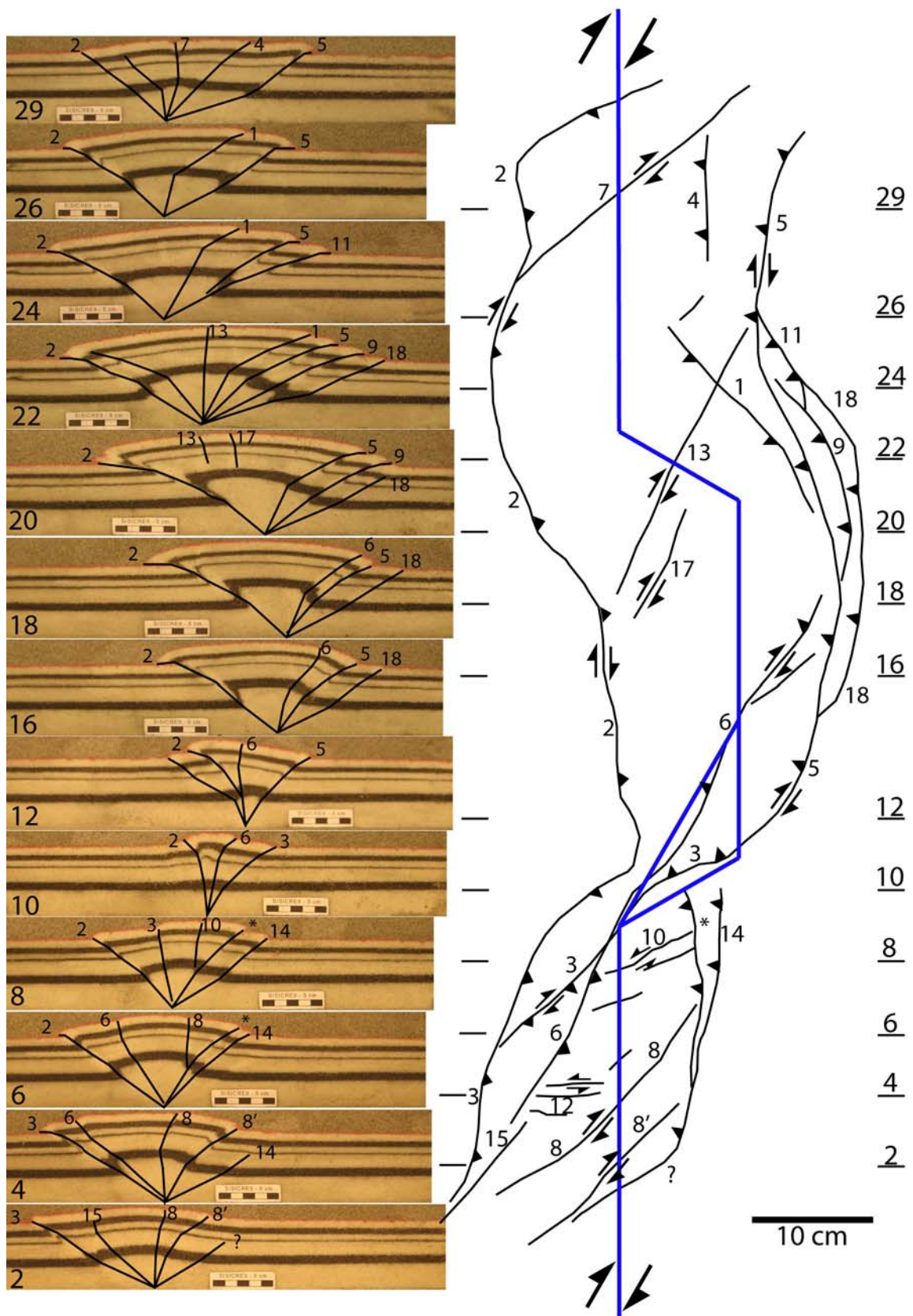
- c) Durante el desarrollo de la experiencia se aprecia que con el 10% de desplazamiento de las placas basales, comienza a percibirse el movimiento de rumbo y abombamientos en zonas N, centro y S. Con un 15% cumplido aflora falla F1 y con el 20% (Fig. 4-11a) se ve aflorar la falla F2 y justo después aflora la falla F3. Con el 30% del movimiento de las placas completado se aprecia que F2 se ha extendido hacia el N y hacia el S, y F3 lo ha hecho hacia el S. Siguiendo la discontinuidad de la placa basal, afloran las fallas F4 y F5. Al 35% del desplazamiento, afloran las fallas F6 y F7. Con el 40% cumplido (Fig. 4-11b) han aflorado las fallas F8 y F\*, y justo después aflora falla F8' y F6 corta a F3 y se extiende hacia el N. Hasta aquí el bloque del pop-up ha rotado  $10^\circ$ . Todo sigue igual hasta completar la mitad de la experiencia, momento en que aflora la falla F9, para mantener esta configuración hasta con el 65% de desplazamiento. En esta etapa se ven aflorar las fallas F10 y F11. Con el 70% aflora la falla F12. Entre el 75% y 80% de desplazamiento (Fig. 4-11d) se ven aflorar las fallas F13, F14 y F15 y justo después aflora la falla F17, hasta que con el 90% completado aflora falla F18. El modelo continúa con la misma configuración hasta completar el 100% de desplazamiento de las placas basales (Fig. 4-11e).





**Figura 4-11.** Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 9. El % indica la cantidad de desplazamiento del modelo sobre una distancia de 10 cm.





**Figura 4-12.** Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 9 y perfiles en distintos sectores.

### 4.3 Serie con 45° en ángulo de convergencia de placas

Para esta serie de 3 experimentos se utilizó el segundo montaje general descrito en la metodología (Ver Capítulo 3), el cual es similar a la serie anterior, variando el ángulo de convergencia entre placas a 45°. Al igual que los modelos de la serie anterior, hubo que variar el ángulo de la curvatura del *stepover* de la placa móvil en el último modelo de esta serie, para evitar que las placas se monten.

Esta serie se caracterizó por la generación de 2 *pop-up*, uno al N y otro al S, limitados por una zona de falla de rumbo, definida por la ubicación del *stepover* del S (Figura 4-13, 4-14, 4-15, 4-16, 4-17 y 4-18). En el experimento con 60° en el ángulo de la curvatura del *stepover* se aprecia, en la vista en perfil, que sobre el *stepover* transtensional se producen fallas que componente normal e inversa (Figura 4-18).

Los *pop-up* del N tienen forma sigmoidal, alargada hacia el S y sus lados coinciden con los ángulos de la discontinuidad basal (Figura 4-13, 4-14, 4-15, 4-16, 4-17 y 4-18). Son de gran tamaño, abarcando ambas curvaturas de las placas basales. Por el N están limitados por fallas de rumbo dextral influenciadas directamente por las condiciones de borde, por el E y el W están limitados por fallas inversas con componente de rumbo dextral y al S por una falla de rumbo dextral. Son cortados por fallas de rumbo dextral de sentido NE-SW.

Los *pop-up* del S presentan una forma romboidal y son acotados por el S por las condiciones de borde, al N lo limitan las zonas de fallas de rumbo, y por los lados E y W por fallas inversas con componente de rumbo (Figura 4-13, 4-14, 4-15, 4-16, 4-17 y 4-18).

Todas las fallas tienen su origen en la discontinuidad de velocidad, producida por el movimiento de la placa móvil (Figs. 4-14, 4-16 y 4-18).

#### 4.3.1 Experimento con *stepover* de 30° (SISICRE 12)

- a) El *pop-up* de la zona N tiene un largo de 78 cm, un ancho de 28 cm y un alzamiento máximo promedio de 2,1 cm (Figura 4-13 y 4-14).

Está limitado por fallas de rumbo dextral y por fallas inversas con componente de rumbo. Por el N está limitado por la falla F5, de rumbo dextral, de sentido ENE-WSW que está influenciada por las condiciones de borde. Por el S está limitado por la falla F6, de rumbo dextral, que presenta sentido ENE-WSW. Por el lado W está limitado por una falla principal, F2, inversa con componente de rumbo dextral, con vergencia W, que sigue las curvaturas de la placa basal y se une con la falla F3, del *pop-up* del S. Por el E su límite está constituido por un set de 2 o 3 fallas inversas con vergencia E, éstas fallas, dependiendo del lugar del modelo en que se esté son: F1, F8, F9, F14, F15 y F16. F1 se une con F4 en el S (Figura 4-13 y 4-14).

La flor positiva limitada por las fallas anteriormente mencionadas está afectado por 2 fallas de rumbo dextral en su zona N, éstas son F10 y F17, de sentido NE-SW y 1 en su zona S, la falla F18. Presenta un rotación máxima de  $7^\circ$  en sentido horario (Fig. 4-13).

- b) El *pop-up* del S tiene forma romboidal con un ancho de 16 cm y un largo de 23 cm, con un alzamiento máximo promedio de 1,8 cm (Figura 4-13 y 4-14).

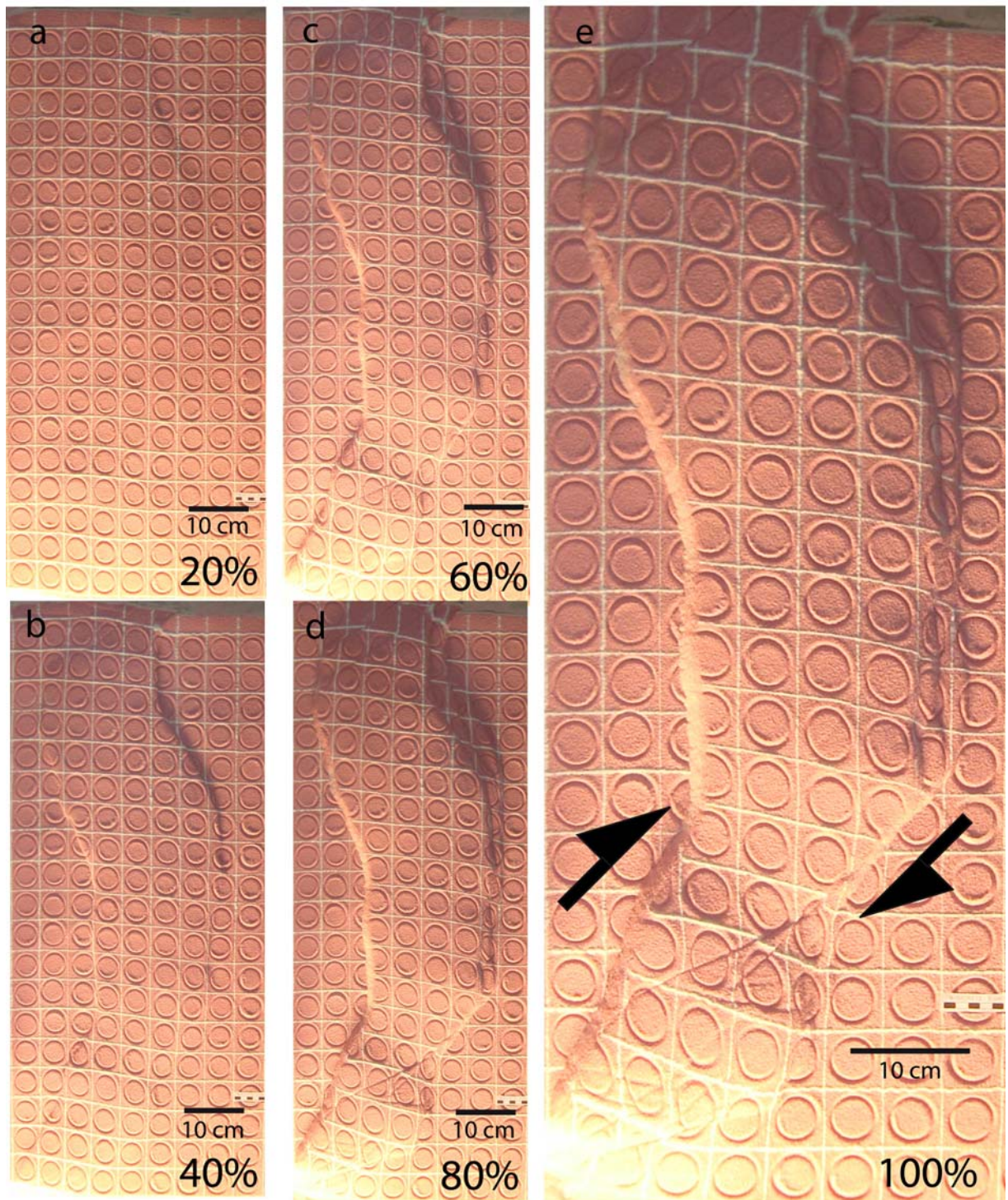
Está limitado por fallas de rumbo dextral y fallas inversas con componente de rumbo dextral. Por el N está limitado por la falla F6, que, a su vez, lo separa del *pop-up* del N. Por el S su límite es la falla F7, de rumbo dextral que tiene un sentido ENE-WSW. Por el E el límite es la falla F4, inversa con vergencia E, con componente de rumbo dextral que se une con la falla F7. Por el W lo limita la falla F3 que presenta un sentido NE-SW (Figura 4-13 y 4-14).

Esta flor positiva está cruzada por fallas de rumbo dextral de sentido NE-SW como la falla F12. Entre estas fallas de rumbo afloran fallas de rumbo sinestrales, de sentido WNW-ESE, que acomodan el movimiento de rumbo principal. Presenta una rotación máxima de  $22^\circ$  en sentido horario (Figura 4-13).

- c) En el transcurso de este modelo se observa que con el 10% del desplazamiento completado comienza a notarse el movimiento de rumbo y el abombamiento en todo el modelo, con el 20% cumplido (Figura 4-13a) afloran, primero la falla F1 y luego, la falla F2. Con el 30% de avance aflora la falla F3, que sería la continuación de F2, además aflora la falla F4. Con el 40% del desplazamiento completado (Figura 4-13b),

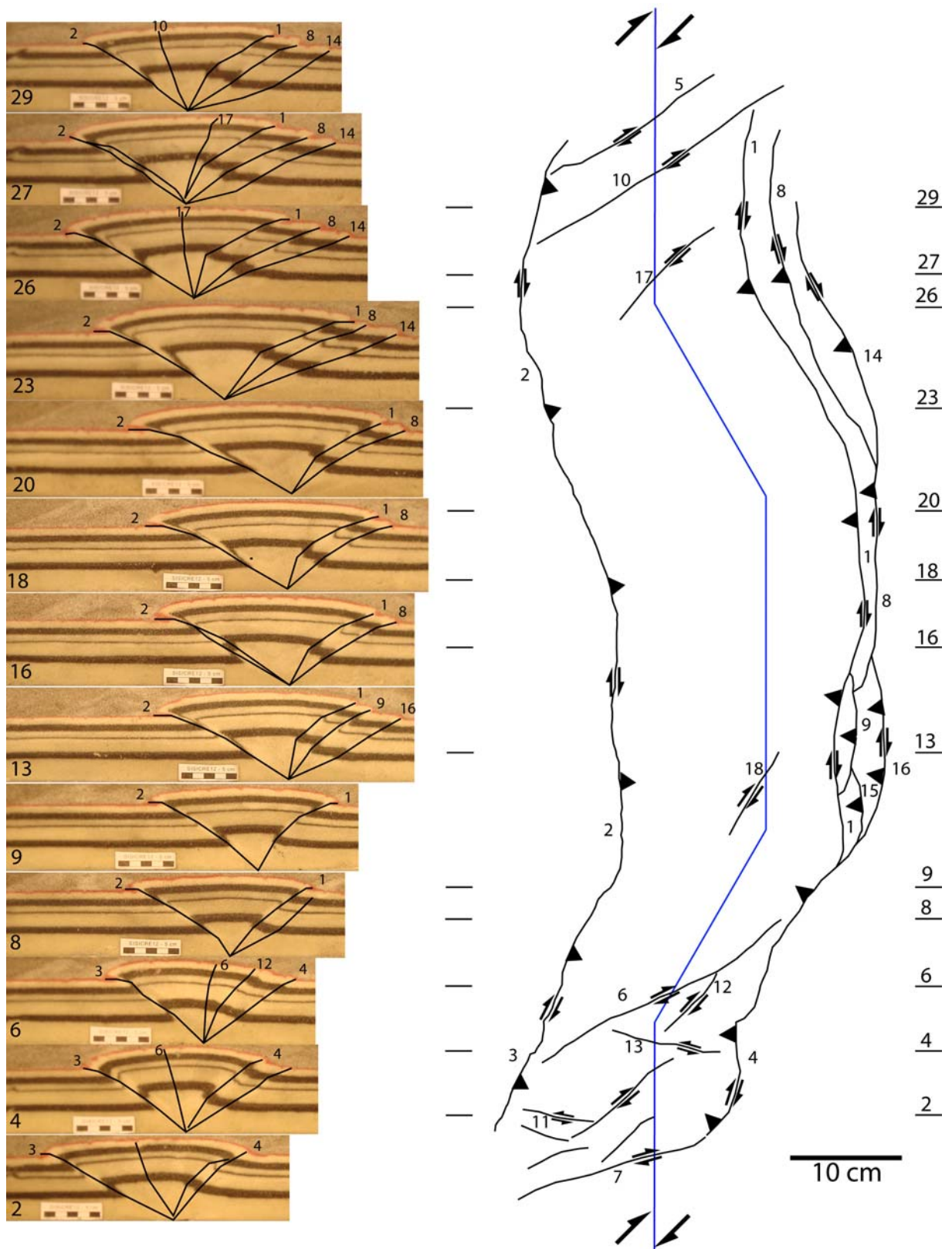


aflora la falla F5, limitando la flor positiva del norte por el N, y la falla F6, al norte de F3 y F4. Con la mitad del modelo realizado, han aflorado la falla F7, limitando la flor positiva del S por el sector S, y las fallas F8 y F9 al E de F1. Con el 60% completado (Figura 4-13c), aflora la falla F10 en la zona N y con el 70% ya han aflorado las fallas F11, F12, al S de F6, F13, en el S y F14 y F15 al E de las fallas F8 y F9, respectivamente. El modelo continúa con esta configuración hasta que se cumple el 85% del desplazamiento de la placa basal, momento en que aflora la falla F16, al E de F9 y F15. Justo antes de completar el 100% afloran las fallas F17 y F18 (Figura 4-13e).



**Figura 4-13.** Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 12. El % indica la cantidad de desplazamiento del modelo sobre una distancia de 10 cm.





**Figura 4-14.** Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 12 y perfiles en distintos sectores.

### 4.3.2 Experimento con stepover de 45° (SISICRE 13)

El *pop-up* de la zona N tiene forma sigmoidal alargado hacia el S, con un ancho de 29,4 cm y un largo de 76,1 cm, presenta un alzamiento máximo promedio de 2,4 cm (Figs. 4-15 y 4-16).

Está limitado por fallas de rumbo en el N y S y por fallas inversas con componente de rumbo dextral al E y W. Por el N lo limita una falla de rumbo dextral, F\*, de sentido ENE-WSW, que está condicionada por las condiciones de borde. Por el S está limitado por la falla F4, de rumbo dextral, con sentido NE-SW. Por su lado W, está limitado por la falla F2, una falla principal, inversa de vergencia W, con componente de rumbo dextral, que aflora solidaria a las curvaturas de la placa basal. Por el E está limitado por un set de 3 o 4 fallas inversas con vergencia E y dispuestas en abanico. Estas fallas dependiendo de la localización en la flor positiva son F1, F7, F8, F10, F12 y F16. F1 se une con F6 en el S y F2 se une con F3 (Figs. 4-15 y 4-16).

La flor positiva limitada por estas fallas, es afectada por 2 fallas de rumbo dextral, la fallas F14 en el N y la falla F11 en el S, además de las fallas F9, de rumbo sinistral que acomodan el movimiento de rumbo principal. Presenta una rotación máxima de 10° en sentido horario (Fig. 4-15).

El *pop-up* del S tiene forma romboidal con un ancho de 18 cm y un largo de 31,4 cm, presenta un alzamiento máximo promedio de 1,8 cm (Figs. 4-15 y 4-16).

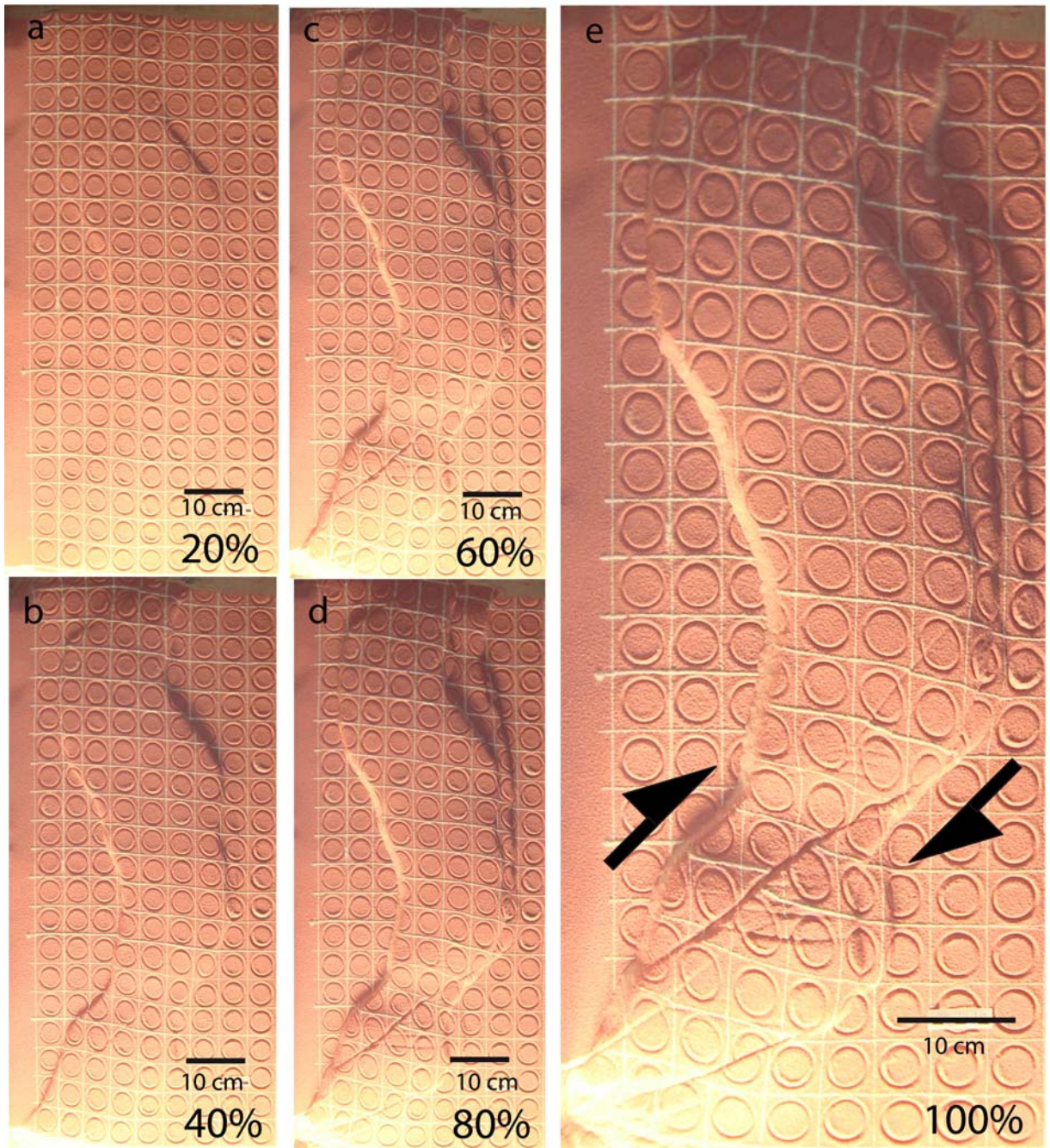
Al igual que en el N, está limitado por fallas de rumbo dextrales y fallas inversas con componente de rumbo dextral. Por el N está limitado por la falla F4, de rumbo dextral, de dirección NE-SW, al S su límite es una falla de rumbo dextral, F\*\*, la cual, está afectada por las condiciones de borde. Por el W, está limitado por la falla principal F3, inversa con vergencia al W, con componente de rumbo dextral, que se une con F2, presenta una dirección NNE-SSW. Por el E su límite son 2 fallas inversas con vergencia E, dispuestas en abanico, que presentan una componente de rumbo dextral, estas fallas son F6 y F15, y su dirección NS (Figs 4-15 y 4-16).

La flor positiva limitada por estas fallas está cortada por fallas de rumbo dextral de dirección NE-SW, como la falla F13. Este movimiento es acomodado por fallas de rumbo sinestrales

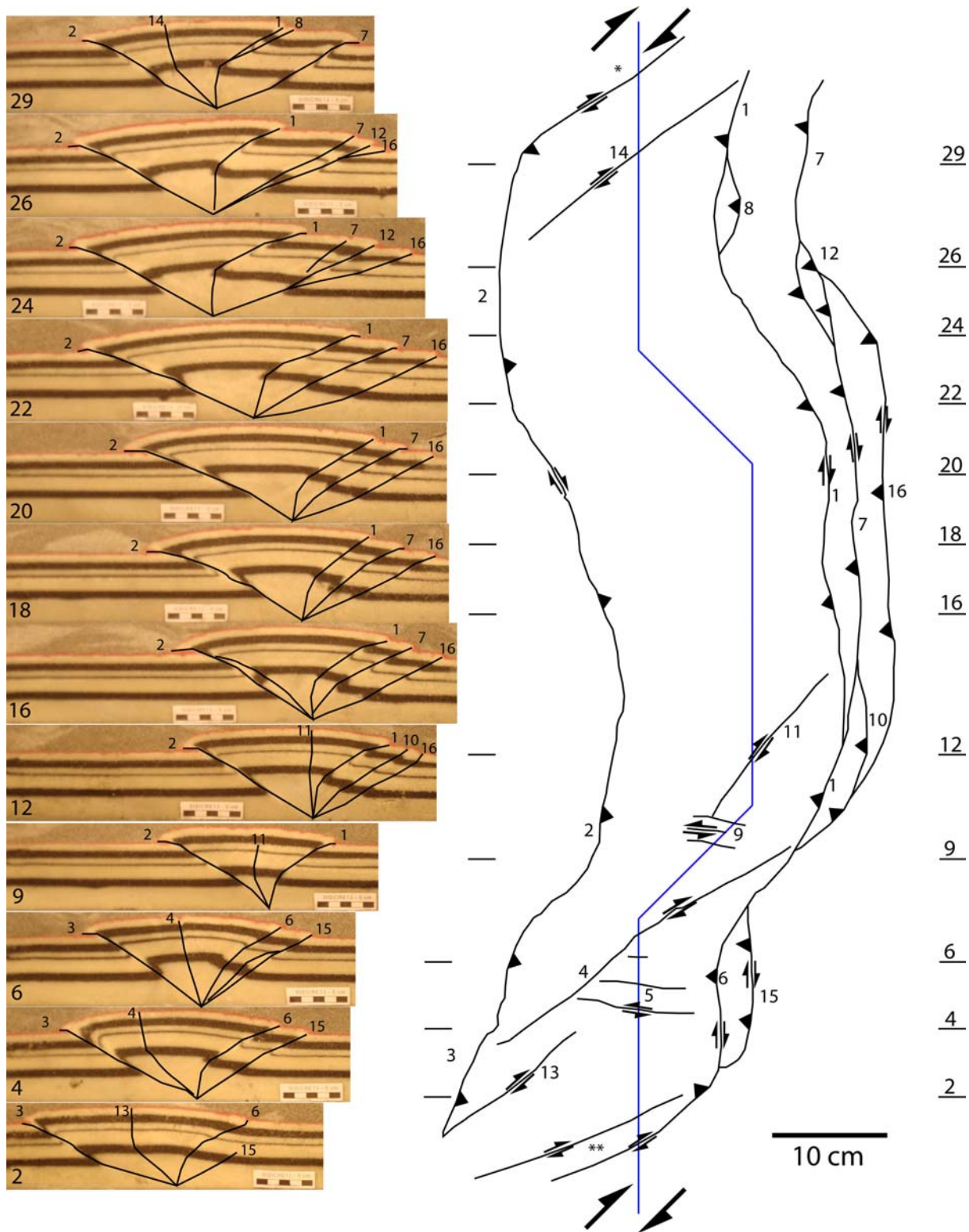
que se disponen entre las fallas de rumbo. Presenta una rotación máxima de 18° en sentido horario (Fig. 4-15).

Durante el desarrollo de la experiencia se aprecia que completado el 10% del modelo comienza a notarse el movimiento de rumbo principal y el abombamiento en todo el modelo. Con el 20% de desplazamiento completado (Fig. 4-15a) afloran las fallas F1 y F2, que se extienden hacia el S. Después del 30% aflora la falla F3, la cual se une con F2. Completado el 35% afloran las fallas F\*\* en la zona S del modelo, limitándolo por este sector, también aflora la falla F4. Cuando se cumple el 40% de la experiencia (Fig. 4-15b) aflora la falla F5, acomodando el movimiento de rumbo dextral, también lo hace la falla F6 que se une con F2, limitando el *pop-up* del S por el E, y aflora la falla F7 formando un abanico con F1. Con la mitad del desplazamiento completado aflora la falla F8 y F7 continúa activa. Luego del 60% del desplazamiento cumplido (Fig. 4-15c) afloran las fallas F5, que acomodan el desplazamiento en el rumbo, F4 se extiende hacia el NE y afloran las fallas F9, similares a F5. Con el 70% completado aflora la falla F10 limitando por el SE el *pop-up* del N. Una vez completado el 80% de la experiencia (Fig. 4-15d) han aflorado las fallas F11, F12, F13 y F14. Luego del 90% afloran las fallas F15 y F16, para seguir con esta configuración hasta completar el 100% del desplazamiento (Fig. 4-15e)





**Figura 4-15.** Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 13. El % indica la cantidad de desplazamiento del modelo sobre una distancia de 10 cm.



**Figura 4-16.** Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 13 y perfiles en distintos sectores.



### 4.3.3 Experimento con *stepover* de 60° (SISICRE 14)

El *pop-up* del N tiene forma sigmoidal alargado hacia el S, con un ancho de 32,6 cm y un largo de 71,5 cm, con un alzamiento máximo promedio de 2,4 cm (Figs. 4-17 y 4-18).

Está limitado por fallas inversas con componente de rumbo y fallas de rumbo dextral. Por el N está limitado por la falla F\*, de rumbo dextral con dirección ENE-WSW, por el S está limitado por 2 fallas de rumbo dextrales, F7 y F15 de sentido NE-SW. Por el W su límite es la falla principal F2, inversa de vergencia W con una componente de rumbo dextral, falla que se une a F4 en el S. Por el E está limitado por un set de 2 o 3 fallas inversas con vergencia E, con una componente de rumbo dextral, estas fallas dependiendo del lugar en que se esté del modelo son, F1, F6, F8 y F14. F1 se une por el S con F3. Las fallas limitantes de la flor positiva, por el W y el E, van concordantes con las curvaturas de las placas basales (Figs. 4-17 y 4-18).

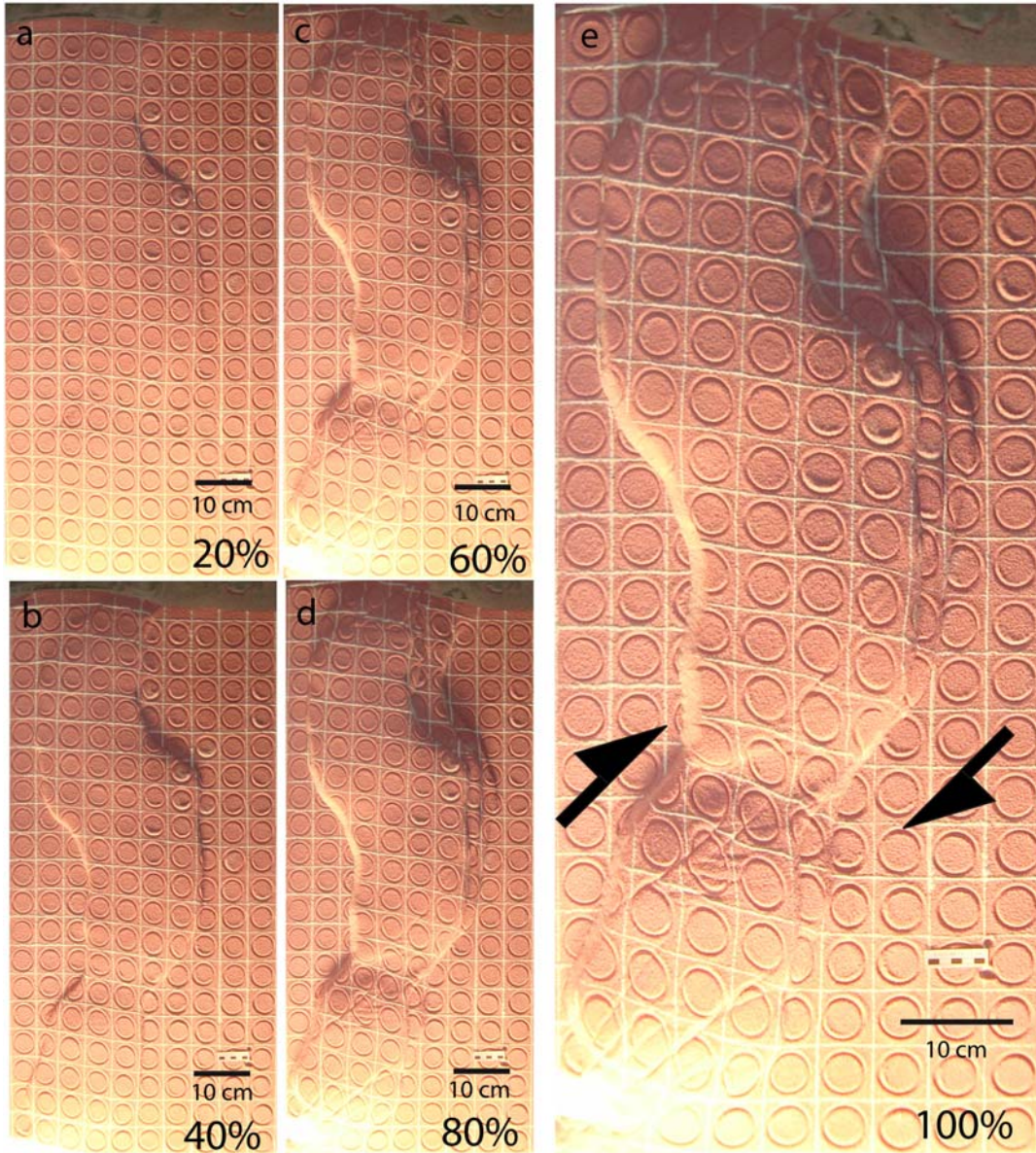
La flor positiva definida por las fallas anteriormente descritas es afectada por fallas de rumbo dextral, F\* en N y F12 en S, además de fallas de rumbo sinistral, F11, que acomodan el movimiento de rumbo principal. Presenta una rotación máxima de 12° en sentido horario (Fig. 4-17).

El *pop-up* del S tiene forma romboidal truncado en el S, tiene un ancho de 19,7 cm y un largo de 32,2 cm, con un alzamiento máximo promedio de 2,3 cm (Figs. 4-17 y 4-18).

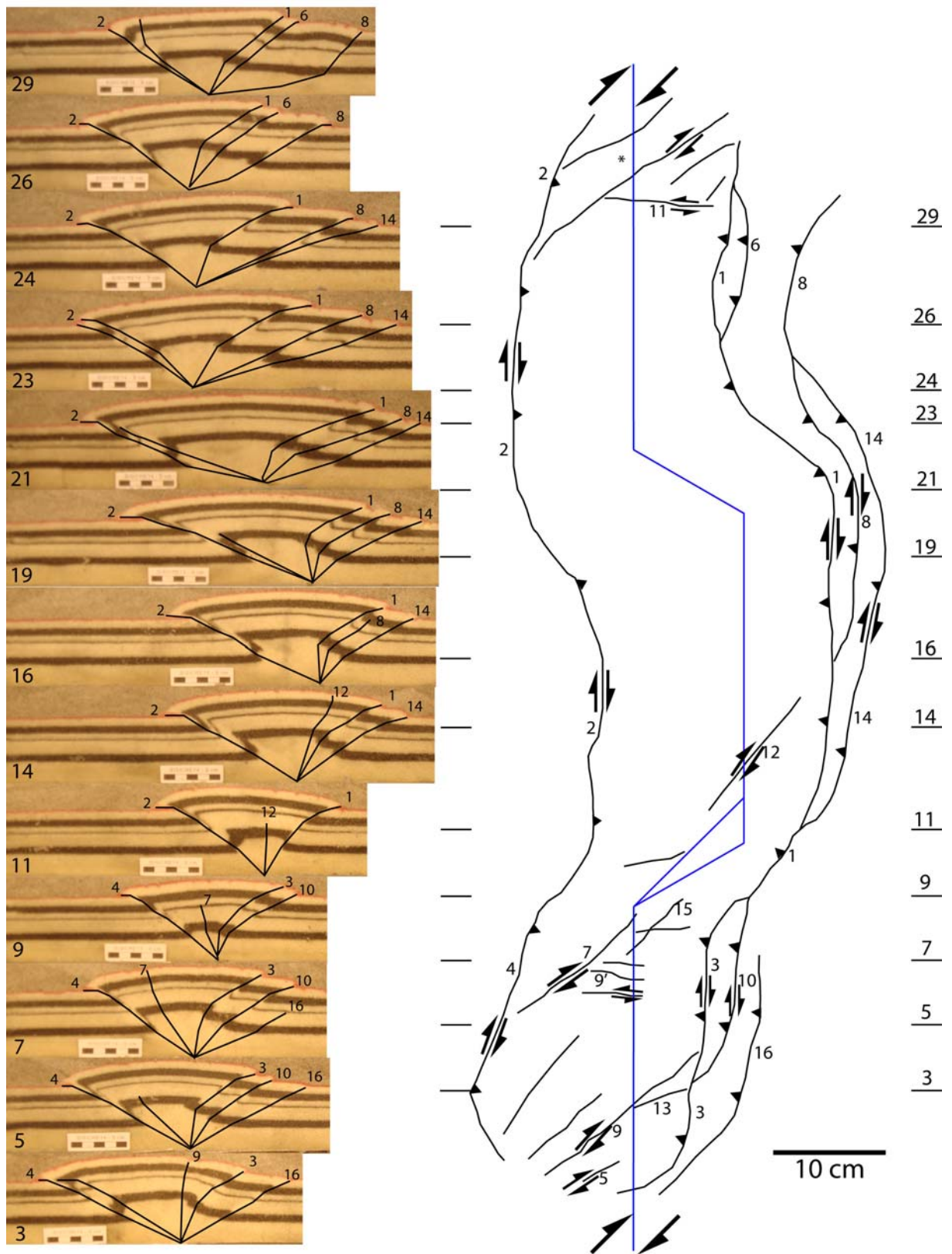
Está limitado por fallas de rumbo dextral y fallas inversas con componente de rumbo dextral. Por el N lo limita la falla F7 y la falla F15, ambas de rumbo dextral con orientación NE-SW. Por el S está limitado la falla F5, de rumbo dextral de orientación ENE-WSW. Por el W lo limita la falla principal F4, inversa de vergencia W, con componente de rumbo dextral, que hacia el N se une a F2. Por el E está limitado por un set de 2 o 3 fallas, que dependiendo del lugar en que se encuentre en el modelo son F3, F10 y F16. F3 se une a F1 hacia el N, la orientación de estas fallas es aproximadamente NS (Figs. 4-17 y 4-18).

La flor positiva es afectada por fallas de rumbo dextral, de orientación NE-SW como la falla F19 y de orientación ENE-WSW como F13, además de fallas antitéticas que acomodan la deformación en el rumbo. Presenta una rotación de 15° en sentido horario (Fig. 4-17).

Durante el desarrollo del experimento se aprecia con el 10% del desplazamiento completado se nota el movimiento en el rumbo y comienza a notarse el abombamiento en todo el modelo. Con el 20% completado (Fig. 4-17a) aflora la falla F1 en el NE y la falla F2 en el NW y al llegar al 30% han aflorado las fallas F3 y F4, ésta última se une a F2. Con el 40% del desplazamiento realizado (Fig. 4-17b) afloran las fallas F5 y F6, ésta última al E de F1, y un poco después aflora la falla F7. En la mitad del modelo aflora la falla F8, al E de F1. después de completado el 60% del modelo (Fig. 4-17c) han aflorado las fallas F9', F9 y F10 en el *pop-up* del S. esta configuración se mantiene hasta completar el 80% de desplazamiento (Fig. 4-17d), momento en que aflora la falla F12. Luego, con el 85% completado afloran las fallas F13 y F14. El modelo continúa igual, hasta que, justo antes de completar el 100%, aflora la falla F16, completando la configuración final (Fig. 4-17e).



**Figura 4-17.** Secuencia de fotografías que muestran la evolución del experimento SISICRE 14. El % indica la cantidad de desplazamiento del modelo sobre una distancia de 10 cm.



**Figura 4-18.** Diagrama esquemático en planta del estado final del experimento SISICRE 14 y perfiles en distintos sectores.

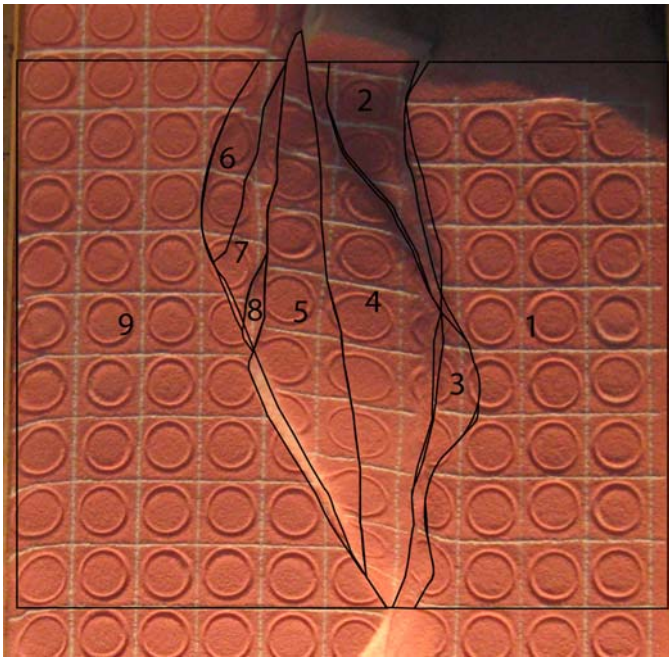


## 5 Capítulo 5: Resultados Restauración Numérica

La restauración numérica fue realizada sobre el primer modelo de la primera serie, en la que el ángulo de convergencia entre las placas es  $0^\circ$  y la curvatura es de  $30^\circ$ . Esta restauración estará constreñida a la flor positiva que se formó en los diferentes modelos.

### 5.1 Restauración experimento $30^\circ$ *stepover* (SISICRE 3)

Al separar la flor positiva en bloques limitados por fallas resultaron 9 bloques (Figura 5-1). Los bloques del 2 al 8 presentaban rotación en sentido horario, además de un plegamiento, visto principalmente en perfil (Figura 5-2), el bloque 1 no presenta deformación y es el bloque que permaneció fijo. El bloque 9 no presenta deformación y fue el bloque que se desplazó los 10 cm hacia el N.

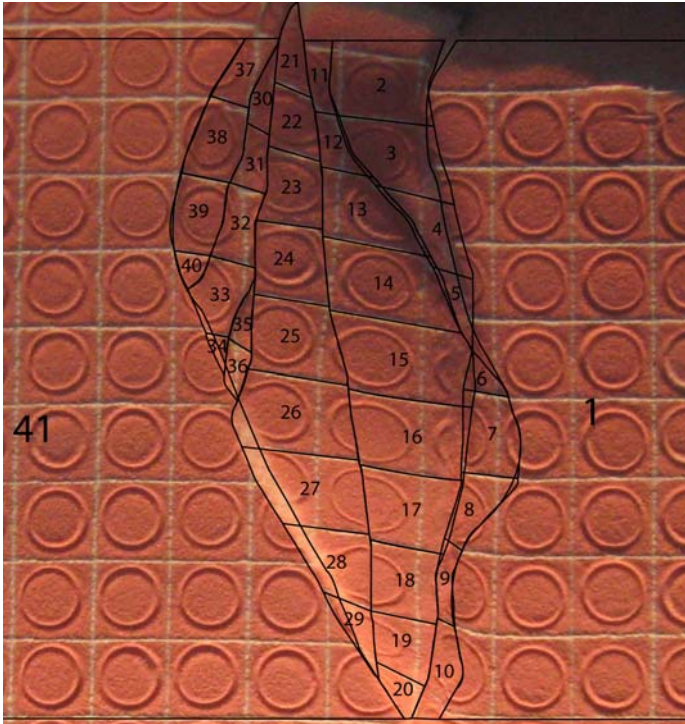


**Figura 5-1.** Esquema de los bloques limitados por falla sobre vista en planta del modelo SISICRE 3



**Figura 5-2.** Perfil del modelo SISICRE 3 con los plegamientos marcados sobre la capa de arena roja.

A través del cuadrículado inicial y de los círculos marcados en la arena, se aprecia una diferencia en la deformación y en la rotación dentro de un mismo bloque (Figura 5-1), por lo que es necesario separar estos bloques limitados por fallas en bloques limitados por la deformación. Luego de esta separación el resultado son 41 bloques separados por fallas y por cantidad de rotación y deformación (plegamiento) (Figura 5-3).



**Figura 5-3.** Esquema final de los bloques confeccionados para la restauración del modelo SISCRE 3.

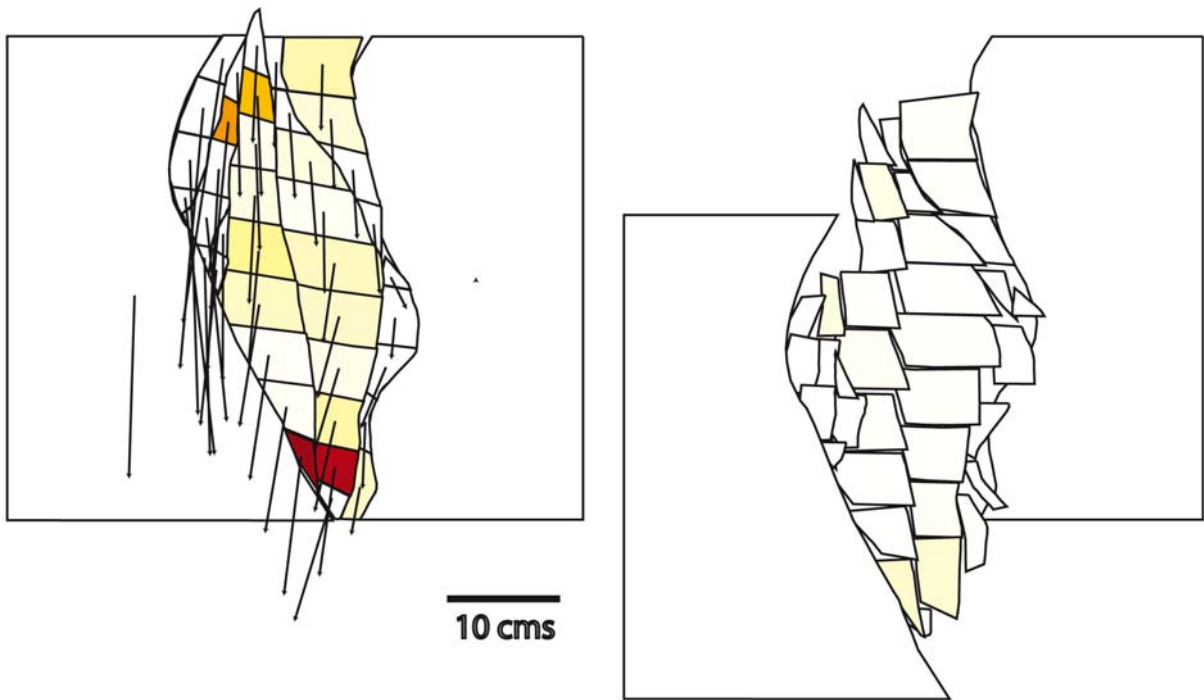
Se confeccionaron los archivos con la información necesaria para que el programa ejecute la restauración con ésta configuración final de bloques dando como resultado un configuración muy parecida al estado inicial de la torta de arena (Fig. 5-4).

Los bloques se rotaron y se extendieron, deshaciendo la deformación presentada por los bloques y se minimizaron los espacios producidos por la superposición de capas dadas por las fallas inversas (Fig. 5-4).

El desplazamiento de las fallas de rumbo fue invertido presentando, en la falla del E, una coincidencia notable con la realidad, no así en la falla del E, que su desplazamiento en la restauración fue demasiado grande comparado con el movimiento real de la falla. Las fallas inversas con componente de rumbo presentan un desplazamiento, en el rumbo, mayor en la



restauración que en el modelo analógico. Los bloques del W se trasladan mucho hacia el S arrastrando el bloque del W que no sufre deformación (Fig. 5-4).



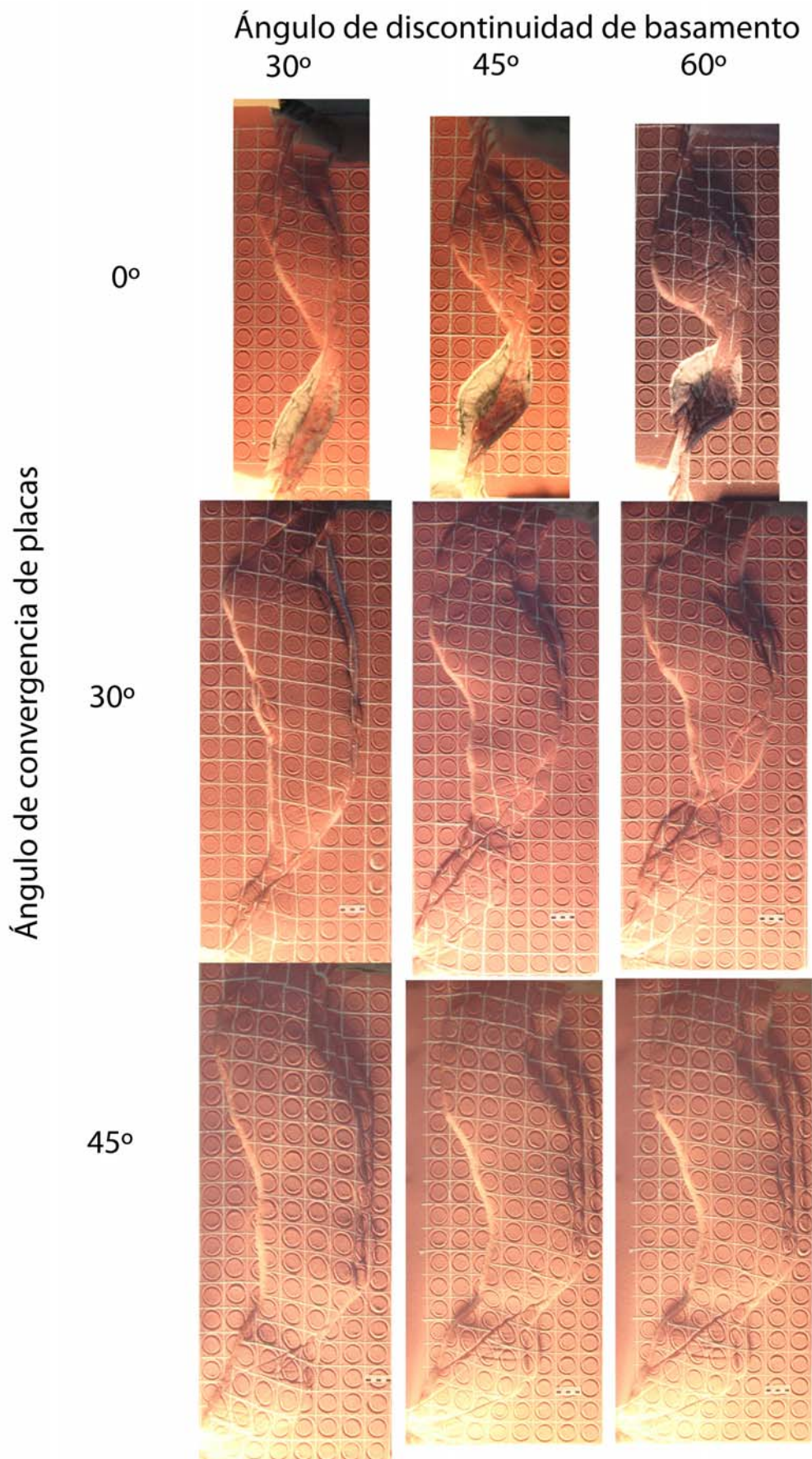
**Figura 5-4.** Estado inicial y final de la restauración numérica. Las flechas indican el desplazamiento de los bloques y los colores el grado de deformación, siendo la mayor deformación el color rojo.

## 6 CAPITULO 6: DISCUSIONES

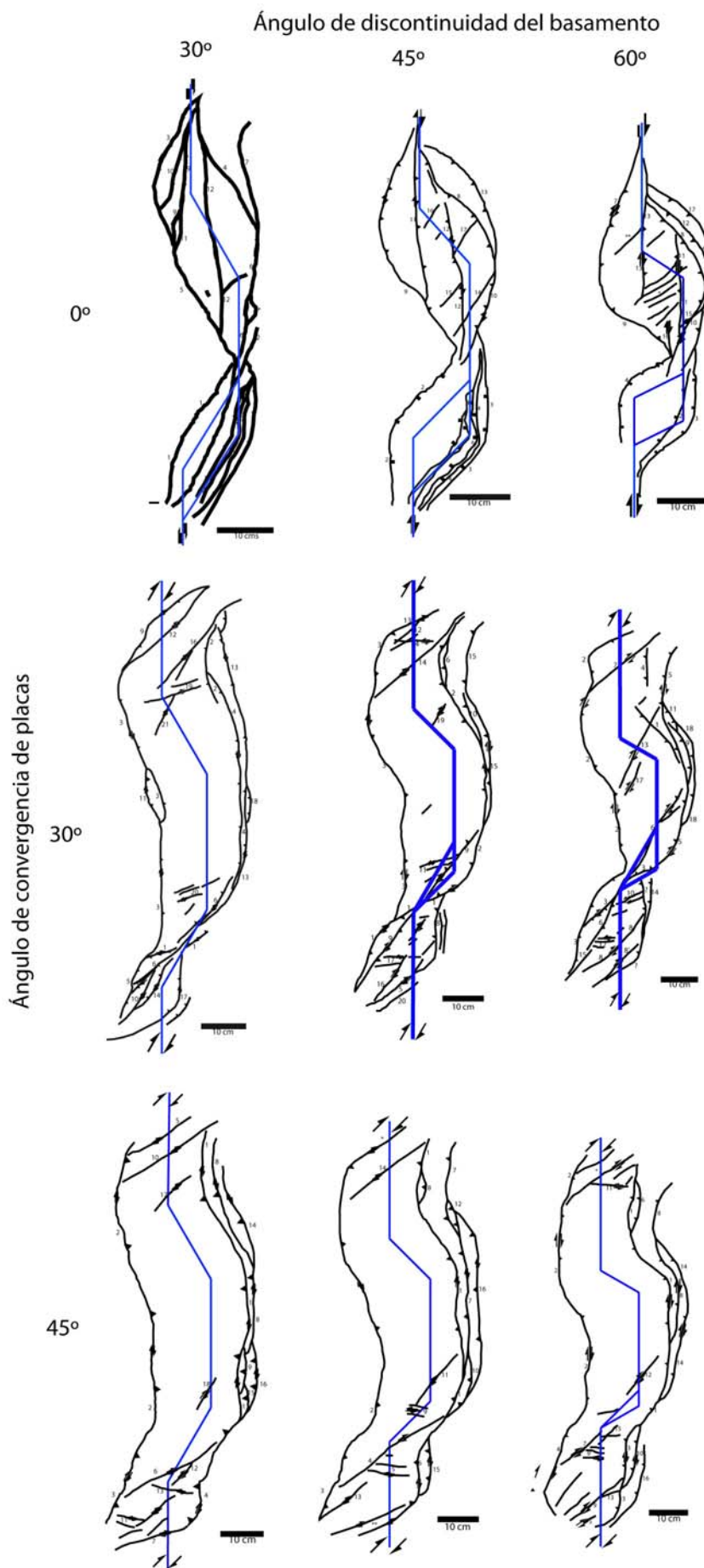
En todos los modelos realizados para este trabajo se utilizaron placas metálicas basales con geometría *stepover*, las que variaban el ángulo de la curvatura. Esta geometría fue diseñada para modelar transpresión y transtensión. Las discontinuidades simulan discontinuidades previas existentes en el basamento, que serían las responsables de la formación de estructuras de flor positiva y flor negativa.

El otro parámetro estudiado fue el ángulo de convergencia entre las placas metálicas que simulan el basamento, que varió entre  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $45^\circ$ , éste parámetro busca representar diferentes ángulos de los esfuerzos principales con respecto a las discontinuidades pre-existentes.

Como el dispositivo consistía en 2 placas metálicas fue necesario adaptar una de las 2 para que no se montaran durante la convergencia de las placas, esto fue necesario para las series 2 y 3, en que el ángulo de convergencia era distinto de 0. La placa elegida fue la placa móvil por lo que en la segunda y tercera serie la curvatura de la placa realmente es de  $30^\circ$  y  $45^\circ$ , respectivamente, en sus 3 modelos.



**Figura 6-1.** Matriz mostrando los 9 experimentos de este estudio. Todas las figuras están a la misma escala. Hacia la derecha varía el ángulo de la discontinuidad del basamento y hacia abajo el ángulo de convergencia de las placas.



**Figura 6-2.** Matriz con los 9 diagramas esquemáticos del estado final, vistos en planta. En azul las discontinuidades de las placas basales en su estado final.

## 6.1 Serie 0° en ángulo de convergencia

En esta serie de modelos los resultados fueron, para las 3 experiencias, un *pop-up* en el N y una cuenca de *pull-apart* en el S. Las cuencas están limitadas por el W por una falla principal, producto del movimiento de la placa basal, y por el E un set de 3 o 4 fallas. Los *pop-up*, que, al ser vistos en los cortes de perfil, presentan una estructura de flor positiva, están formados por zonas de fallas inversas y zonas de fallas inversas con componente de rumbo y son afectados, principalmente, por 2 fallas de rumbo de disposición NS (Figura 6-1 y Figura 6-2).

Tanto para las cuencas de *pull-apart* como para los *pop-up* formados en esta serie, las fallas limitantes de estas estructuras coinciden con la curvatura de las discontinuidades de velocidad, por lo que, a mayor ángulo de curvatura, mayor será el ángulo entre las fallas limitantes de las estructuras, por el E y el W, ya sea en transtensión o transpresión (Figs 4-2, 4-4, 4-6, Figura 6-1Figura 6-2).

Las cuencas de *pull-apart* generadas en esta serie de modelos fueron afectadas por una extensión demasiado grande como para describirlas y analizarlas cuantitativamente. Con el escalamiento del modelo sólo era necesaria una extensión de 2 cm, por lo que con los 10 cm de desplazamiento de la placa móvil la cuenca colapsó y se deformaron las fallas normales generadas, de todas maneras, el ángulo de estas fallas normales puede ser medido sin mayores complicaciones. Se utilizó esta cantidad de desplazamiento para lograr formar estructuras notables para la zona del *pop-up* y poder analizarlas en conjunto con la zona de transtensión. El ancho de la cuenca aumenta a medida que el ángulo del *stepover* lo hace (Tabla 6-1), esto, medido perpendicular a la curvatura.

El largo la cuenca disminuye con el aumento del ángulo de la curvatura (Tabla 6-1), reflejando el área abarcada por las diferentes curvaturas, ya que, en la curvatura de 30° ocupa mayor espacio en la dirección NS, que la curvatura de 45° y, más aún, que la de 60°. Una situación similar ocurre para los *pop-up*.

De la profundidad alcanzada por las cuencas no se puede decir mucho, debido al colapso sufrido durante la extensión, lo que generó diversas remosiones de arena que fueron rellenado la cuenca. Lo mismo ocurre con el ángulo de las fallas normales que limitan las cuencas, ya que, no muestran un patrón definido de comportamiento.

Como se menciona anteriormente, el largo de los *pop-up* disminuye con el aumento del ángulo de la discontinuidad del basamento. El ancho de las flores positiva es directamente proporcional al ángulo de la discontinuidad, este ancho fue medido perpendicular a la curvatura y, además, en la dirección de los perfiles EW (Tabla 6-1), reflejando, claramente, el aumento del área abarcada por estas estructuras.

Una característica distintiva de los *pop-up* es la elevación que alcanzan debido a la compresión. De la tabla 6.1 se desprende que al aumentar el ángulo de la curvatura, aumenta, también, el alzamiento máximo promedio. Ésto está respaldado, también, por el rechazo de las fallas que limitan la flor. Este parámetro fue medido en los perfiles cuidando que el ángulo entre la falla y el perfil fueran similares para evitar distorsiones por el manteo aparente.

Lo mismo ocurre con el número de fallas formadas en el lado de la placa fija que aumentan su cantidad con el aumento del ángulo, por lo que se desprende que mientras más grande es el ángulo, o sea, mientras más cerca de la perpendicularidad, mayor será el número de fallas creadas, debido a una mayor componente inversa en comparación con la de rumbo.

La rotación de los bloques limitados por las fallas, ya sean de rumbo, inversas o una mezcla de ambas componentes presenta un incremento considerable con el aumento del ángulo del *stepover* (Tabla 6-1), esto también se ve reflejado en la formación de fallas antitéticas de acomodación de la deformación que es mayor en el modelo con 60° de curvatura.

El orden de aparición de las fallas es siempre el mismo, a pesar de los cambios en el ángulo. La primera falla en aparecer es la falla que limita la flor positiva por el sector NW, luego lo hace la falla del NE, para seguir con la falla del SW y limitar la flor completamente por fallas con el afloramiento de la falla de SE. Las fallas de rumbo sufren una variación en su afloramiento en el último modelo de la serie (SISICRE 5), ya que en los 2 primeros aparece primero la falla del W, pero en último lo hace primero la falla del E.

Respecto del desplazamiento de las fallas de rumbo que afectan las flores positivas, se puede decir que no se aprecia un patrón constante en los diferentes modelos, por lo que, no se puede establecer un comportamiento definido con respecto a la variación del ángulo de la curvatura.



## 6.2 Serie 30° en ángulo de convergencia

Esta serie de modelos dio como resultado, para las 3 experiencias, 2 *pop-up* limitados por una zona de fallamiento de rumbo. En ambos casos están compuestos por fallas de rumbo y fallas inversas con componente de rumbo (Ver Capítulo 4).

El largo del los *pop-up* del N va disminuyendo en la serie, mientras que el largo de las flores positivas del S aumenta (Tabla 6-2), esto se debe a que el límite entre ambas estructuras está dado por la curvatura del S y, debido a que con el aumento del ángulo, disminuye, también, el área ocupada por el *stepover*.

El ancho de los *pop-up* aumenta, en ambos casos, N y S, con el aumento del ángulo de la curvatura, ya sea medido perpendicular a la curvatura o en la dirección de los perfiles (Tabla 6-2).

El alzamiento alcanzado por las estructuras es directamente proporcional al ángulo del *stepover* en el *pop-up* del S, cosa que no ocurre en la estructura generada en el N (Tabla 6-2), en la que no es posible establecer una relación directa, lamentablemente esta relación no puede ser corroborada por los perfiles, ya que no presentan una secuencia clara de un aumento en el rechazo de las fallas.

Las fallas limitantes de los *pop-up* del N coinciden con las discontinuidades de las placas basales, salvo en su lado N y en menor medida por el S. Por el N, la flor, tiende a cerrarse hacia el NE, con un rumbo, representado por la falla N (Tabla 6-2), que va en aumento a medida que aumenta el ángulo del *stepover*. Por el S, la falla que limita ambas flores presenta una disminución del rumbo a medida que aumenta el ángulo de la discontinuidad y no coincide con la curvatura de las placas basales. La falla que corta a la falla de rumbo que limita ambos *pop-up* también va disminuyendo su rumbo, con el aumento del ángulo de la discontinuidad.

Para los *pop-up* del S, las fallas de rumbo que los limitan por el S coinciden con la dirección de convergencia de las placas basales, pero no se puede decir mucho más debido a que están afectadas por las condiciones de borde. Por el E tienen una dirección NS y por el W presentan la misma dirección NNE-SSW (Figs. 4-14, 4-16, 4-18Figura 6-2).

En el caso de las fallas de rumbo generadas en los modelos, es posible distinguir un aumento en la cantidad de deformación absorbida por ellas a medida que aumenta en ángulo de la deformación (Tabla 6-2), esto se da en todas las fallas de rumbo analizadas en las diferentes experiencias.

En los 2 primeros modelos de la serie la primera falla en aparecer es la falla de rumbo que separa ambos *pop-up*, luego lo hace la falla que limita las flores por el E (se asume como una sola falla, la limitante de las flores, ya sea por el E como por el W), para luego, hacerlo la falla limitante del W. A continuación aflora la falla que corta a la falla que separa ambos *pop-up* ((cont) Tabla 6-2). Para el último modelo, la primera falla en aflorar es la que la falla del E, luego lo hace la del W y después la falla que separa ambas flores positivas.

Se aprecia que a medida que aumenta el ángulo del *stepover*, la falla que limita los *pop-up* aflora cuando ha pasado más tiempo ((cont) Tabla 6-2). Caso contrario ocurre para las fallas que limitan por el E y por el W. A medida que aumenta el ángulo de la discontinuidad, las fallas de rumbo tardan más tiempo en aparecer, mientras que las inversas lo hacen más rápido.

La cantidad de fallas que afloran por el límite E aumenta con el aumento del ángulo del *stepover*, siendo su máximo notable en el modelo en que el ángulo entre la discontinuidad de las placas y la convergencia es  $90^\circ$ .

En los modelos en que el ángulo de la convergencia es menor que el de la discontinuidad se aprecia, en los perfiles (Figura 4-10Figura 4-12), fallas con componente normal e inversa. Esto puede ser a causa de una inversión de la falla producto de la compresión sufrida en la zona del *stepover* transtensivo. Se observa que hay un aporte de masa que ocupa el espacio dejado por el límite entre las componentes normal e inversa (Figura 4-10Figura 4-12), por lo que podría tratarse de una nueva falla con características de rumbo.

### **6.3 Serie $45^\circ$ en ángulo de convergencia**

Al igual que la serie anterior, el resultado de las experiencias dio como resultado la generación de 2 *pop-up*, limitados por una falla de rumbo. Estas estructuras, que al ser vistas en los cortes de perfil muestran una estructura de flor positiva, son caracterizadas por ser limitadas por fallas de rumbo y por fallas inversas con componente de rumbo (Ver Capítulo 4).

El largo del *pop-up* del N disminuye con el ángulo del *stepover*, mientras que el largo del *pop-up* del S aumenta (Tabla 6-3), esto, a causa del área ocupada por los distintos *stepover*, que disminuye con el aumento del ángulo, y como el límite entre las 2 flores positivas es el *stepover* del S, el espacio para la flor del N disminuye, mientras que para la flor del S, aumenta.

El ancho de las flores positivas, ya sean del N o del S, aumenta solidario con el aumento del ángulo del *stepover* (Tabla 6-3).

Las flores positivas presentan un alzamiento creciente en conjunto con el aumento del ángulo del *stepover*, esto se cumple ya sea midiendo el ancho perpendicular a la curvatura o en el sentido de los perfiles (Tabla 6-3). Lo anterior, es confirmado por el rechazo de las fallas medidas, que aumenta con el aumento del ángulo de discontinuidad basal (Tabla 6-3).

Las fallas limitantes de los *pop-up* del N coinciden con las discontinuidades de las placas basales excepto las del N y del S (Figs. 4-14, 4-16, 4-18 y Figura 6-2), ya que, las primeras, coinciden con el ángulo de convergencia, por lo que la flor positiva se cierra en ese sentido, el rumbo de esta falla no es afectado por la curvatura, ya que está lejos del área afectada por ella. Por el S la falla de rumbo que limita los *pop-up* disminuye su rumbo con el aumento del ángulo de discontinuidad (Tabla 6-3).

Para el *pop-up* del S las fallas que lo limitan por el S van en sentido NE-SW sin coincidir totalmente con el ángulo de la convergencia. No se puede decir mucho más de estas fallas, debido a que, están afectadas por las condiciones de borde del modelo. Por el E, las fallas que lo limitan, aumentan con el incremento del ángulo de curvatura de las placas basales.

Para las fallas de rumbo generadas en los *pop-up* del N se aprecia un aumento en el desplazamiento con el incremento del ángulo del *stepover* ((Cont) Tabla 6-3). Para el *pop-up* del S no hay un patrón claro de influencia.

El orden de aparición de las fallas es similar en los 3 modelos de esta serie. La primera falla en aflorar es la que limita a las flores positivas, tanto del N como del S (asumiendo como una sola falla que limita a ambos *pop-up*), por el E, luego lo hace la falla que los limita por el W,

para, posteriormente, aflorar la falla de rumbo que separa ambos *pop-up*. El resto de las fallas lo hace aleatoriamente en los distintos modelos ((Cont) Tabla 6-3).

Es posible observar que no hay un patrón claro en el tiempo de formación de las fallas.

En el experimento en que el ángulo de convergencia de placas es menor que el de la discontinuidad (SISICRE 14), se aprecia, en la vista en perfil (Figura 4-18), fallas con componente normal e inversa, al igual que en la serie anterior. Ésto ocurre sobre la geometría *stepover* transtensional, el análisis es el mismo visto en el punto anterior.







**(cont) Tabla 6-2:** Resumen con las principales mediciones de los modelos de la serie de 30° en la convergencia entre placas. S7: SISICRE 7; S8: SISICRE 8; S9: SISICRE9; S: *Pop-up* del S; N: *Pop-up* del N;  $\gamma$ : ángulo de convergencia de placas;  $\theta$ : ángulo de discontinuidad de la placa basal. Los datos en las filas gris claro son datos generales para el modelo, filas en gris oscuro representa perfil entre *pop-up*.

		acortamiento por fallas (cm)				desplazamiento fallas rumbo (cm)						T° aparición de fallas (min)								
		W	E1	E2	E3	1	2	N	Centro	S	1	2	N	Centro	S	W	E1	E2	E3	
	$\gamma=30^\circ$						N	S												
	S7 $\theta=30^\circ$					1,6	4,9	2,3	0,6	0,2	2,5	10	55	140	195	105	45	40	50	110
S	2	0,4	0,2	0,3																
	4	0,3	0,4																	
	6	0																		
N	8	0,7																		
	14	1,6	0,7	0,8																
	20	2,5	0,5	0,8																
	26	1,2	1	1,4																
	S8 $\theta=45^\circ$					1,4	2	2,6	1	0,4	0,6	30	80	115	160	120	40	35	90	115
S	2	0,4																		
	6	0,3	0,4	0,3	0,1															
	8	0,6																		
N	10	1,3	0,2																	
	16	1,5	0,8	0,4																
	22	2,7	0,8	0,2	1															
	26	0,8	0,3	0,2	1,1															
	S9 $\theta=60^\circ$					1	1,8	1,4	1,3	0,3	0,8	45	70	70	150	75	40	30	55	175
S	4	1,2	0,7																	
	8	0,4	0,66	0,45																
	10	1,2	0,5																	
N	12	2,7	0,6	0,17																
	16	1,3																		
	22	0,4	0,2	0,9	1,1															
	26	0,7	0,16	1,7																

**Tabla 6-3:** Resumen con las principales mediciones de los modelos de la serie de 45° en la convergencia entre placas. S12: SISICRE 12; S13: SISICRE 13; S14: SISICRE14; S: *Pop-up* del S; N: *Pop-up* del N. Los datos en las filas gris claro son datos generales para el modelo, filas en gris oscuro representa perfil entre *pop-up*.

		largo	ancho	ancho	alzamiento	alzamiento	rotación	rumbos de fallas de rumbo				acortamiento por fallas (cm)			
		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	promedio (cm)	(°)	1°	N	Centro	S	W	E1	E2	E3
	$\gamma=45^\circ$														
	<b>S12 <math>\theta=30^\circ</math></b>							60	55	30	55				
S	2	23	19	16	1,6	1,8	22					0,9	0,3		
	4		19,3		2						0,9	0,6			
	8		18		1,4						1,1	0,8			
N	16	78	22,3	28	2,3	2,1	7					2,3	0,7	0,5	
	23		27,8		2,8						2,4	0,7	0,3	0,7	
	27		24		2,3						1,5	0,7	1	0,2	
	<b>S13 <math>\theta=45^\circ</math></b>							55	50	40	50				
S	4	31,4	22,8	18	2,2	1,8	18					1	0,7	0,4	
	6		20,1		2						1,65	0,38	0,45		
	9		16,3		1,6						1,4	1			
N	16	76,1	24,2	29,4	2,5	2,4	10					2,8	0,4	0,85	0,3
	22		32		2,9						2,1	1	1,1	0,45	
	26		28,6		2,6						2	1	0,25	1,5	
	<b>S14 <math>\theta=60^\circ</math></b>							50	55	40	45				
S	5	32,2	23,1	19,7	2,5	2,3	15					2	0,7	0,55	0,12
	7		21,3		2,3						1,8	0,85	0,9	0,1	
	11		17,9		2,2						2,5	1,3			
N	16	71,5	23,3	32,6	2,7	2,4	12					3	0,7	0,2	0,5
	21		31,3		2,9						2,4	0,5	0,68	0,25	
	24		27,8		2,9						2,1	1,4	0,9	0,4	

(Cont) **Tabla 6-3:** Resumen con las principales mediciones de los modelos de la serie de 45° en la convergencia entre placas. S12: SISICRE 12; S13: SISICRE 13; S14: SISICRE14; S: *Pop-up* del S; N: *Pop-up* del N. Los datos en las filas gris claro son datos generales para el modelo, filas en gris oscuro representa perfil entre *pop-up*.

		desplazamiento fallas rumbo (cm)				T° aparición de fallas							
		1	N	Centro	S	1	N	Centro	S	W	E1	E2	E3
	$\gamma=45^\circ$												
	<b>S12 <math>\theta=30^\circ</math></b>	0,5	0,2	0,1	0,2	80	105(190)	195	130	40	35	95	135
S	2					F6	F10(F17)	F18	F13	F2	F1	F8	F14
	4												
	8												
N	16												
	23												
	27												
	<b>S13 <math>\theta=45^\circ</math></b>	1,9	0,36	0,3	0,15	70	155	145	155	35	35	80	170(150)
S	4					F4	F14	F11	F13	F2	F1	F7	F16(F12)
	6												
	9												
N	16												
	22												
	26												
	<b>S14 <math>\theta=60^\circ</math></b>	0,7	1,1	0,3	0,2	85		160	115	40	40	100	170
S	5					F7	F*	F12	F9	F2	F1	F8	F14
	7												
	11												
N	16												
	21					3				2	1		
	24												

El análisis de las 3 series por separado nos proporciona información sobre la evolución de los experimentos manteniendo fijo el parámetro de la convergencia entre las placas, por lo tanto, se estudia la influencia del ángulo de discontinuidad. Al unir las 3 series de modelos formamos una matriz (Figura 6-1), por lo que, el análisis también puede hacerse manteniendo fijo el ángulo de discontinuidad del basamento y variando el ángulo de convergencia de las placas.

#### **6.4 Análisis modelos con 30° en *stepover***

Los modelos a analizar se diferencian por el ángulo de convergencia de las placas, siendo de 0°, 30° y 45°, con el ángulo de *stepover* constante de 30°.

Se aprecia una fuerte diferencia en las estructuras formadas sobre el *stepover* del S, debido a la forma del movimiento relativo entre las placas, en la experiencia con 0° en la convergencia se forma una zona extensional dando paso a la correspondiente cuenca de *pull-apart* (Figs. 4-1, 4-2, Figura 6-1Figura 6-2), en la serie con convergencia de 30° se forma una zona de rumbo por el movimiento paralelo de las 2 placas (Figs 4-7, 4-8, Figura 6-1Figura 6-2). Y en el modelo con 45° en la convergencia se forma una zona de compresión al ser el ángulo de la convergencia mayor que el de la curvatura (Figs 4-13, 4-14, Figura 6-1Figura 6-2).

En la zona N coinciden los 3 modelos en la formación de un *pop-up*, que en la zona NE presenta un aumento de las fallas inversas con el aumento del ángulo entre la curvatura y la convergencia de las placas. Manteniendo sólo una falla principal por el W, las fallas de rumbo que afectan los *pop-up* tienen un rumbo similar a la convergencia (Figs 4-2, 4-8, 4-14, Figura 6-1Figura 6-2).

El cierre del *pop-up* por el N sigue la dirección de la convergencia (Figs 4-1, 4-2, 4-7, 4-8, 4-13, 4-14, Figura 6-1Figura 6-2).

La rotación de los bloques tiende a disminuir con el aumento del ángulo de convergencia (Tabla 6-1Tabla 6-2Tabla 6-3).

El alzamiento es directamente proporcional al ángulo de convergencia (Tabla 6-1Tabla 6-2Tabla 6-3)

## 6.5 Análisis modelos con 45° en *stepover*

Las estructuras formadas sobre el *stepover* del S presentan un comportamiento variable con el ángulo de convergencia. Con 0° en la convergencia se forma una cuenca de *pull-apart* (Figs 4-3, 4-4, Figura 6-1Figura 6-2), en el caso de los 30° en la convergencia se forman estructuras con características de inversión, en el que un misma falla presenta un rechazo diferente a lo largo de la falla, siendo menor hacia abajo (Figs 4-10 y Figura 6-2). Hay que tener en cuenta que lo que se mueve con 30° es una curvatura de 30° y no una de 45°. En la convergencia de 45° presenta una zona de rumbo entre las placas (Figs. 4-15, 4-16, Figura 6-1Figura 6-2).

En la zona N, los 3 modelos coinciden en la formación de un *pop-up*, que en su zona NE presenta un aumento de las fallas, debido al ángulo entre la convergencia y la curvatura del *stepover*, por el W se mantiene la falla principal que coincide con las curvaturas de las placas basales (Figs 4-4, 4-10, 4-16 yFigura 6-2).

Las fallas de rumbo que cruzan los *pop-up* tienden a seguir la dirección de la convergencia de las placas (Figs. 4-5, 4-6, 4-11, 4-12, 4-17, 4-18, Figura 6-1Figura 6-2).

El cierre del *pop-up* coincide con el ángulo de la convergencia entre las placas, siendo, en el último modelo, afectada por las condiciones de borde (Figs 4-3, 4-4, 4-9, 4-10, 4-15, 4-16, Figura 6-1Figura 6-2).

La rotación va disminuyendo a medida que aumenta el ángulo de convergencia, ya que aumenta el ángulo entre la curvatura y la convergencia, lo que genera una convergencia más ortogonal en el *stepover* del N. El alzamiento aumenta con el ángulo de convergencia (Tabla 6-1Tabla 6-2Tabla 6-3).

## 6.6 Análisis modelos con 60° en *stepover*

Las estructuras formadas sobre el *stepover* del S, presenta un comportamiento similar a la serie analizada anteriormente, en el experimento con una convergencia de 0° se forma una cuenca de *pull-apart* (Figs 4-5, 4-6, Figura 6-1Figura 6-2), para la convergencia de 30° , sobre la zona del *stepover*, se genera una deformación caracterizada por fallas que, en su parte inferior, tiene menor rechazo que en su zona superior, lo que implicaría una zona de transtensión, seguida por transpresión, lo mismo ocurre cuando la convergencia es en 45°.



Cabe destacar, las dimensiones de la placa móvil en los *stepover* del S, ya que, en el modelo con 30° de convergencia, la curvatura del *stepover* es de 30° y en el modelo con 45° de convergencia la placa tiene 45°, o sea, no es un *stepover* de 60° convergiendo con 30° ni 45°, sino, que un *stepover* de 30° y 45° convergiendo 30° y 45°, respectivamente (Figs 4-12, 4-18 Figura 6-2). Notar que para la zona N, es un *stepover* de 60° convergiendo con 30° y 45°, respectivamente.

En la zona N, los 3 modelos generan un *pop-up*, que por su lado NE presenta muchas fallas, siendo la mayor cantidad en el modelo en que el ángulo entre la curvatura del *stepover* y la convergencia es de 90° (SISICRE 9). Por el W se mantiene una falla principal (Figs 4-5, 4-6, 4-11, 4-12, 4-17, 4-18, Figura 6-1 Figura 6-2).

Las direcciones de las fallas de rumbo que afectan las flores positivas, tienden a seguir la dirección de convergencia de las placas basales (Figs 4-6, 4-12, 4-18 Figura 6-2).

El cierre del *pop-up* tiende a la dirección de convergencia (dado por la dirección de la falla del NE) (Figs. 4-5, 4-6, 4-11, 4-12, 4-17, 4-18, Figura 6-1 Figura 6-2).

La rotación disminuye con el aumento del ángulo de convergencia (Tabla 6-1 Tabla 6-2 Tabla 6-3). Esto puede ser debido a la disminución de la componente de rumbo con el aumento del ángulo de convergencia, lo que provoca menor movimiento a través de fallas de rumbo.

El alzamiento de los *pop-up* está directamente ligado al ángulo de la convergencia, esto debido a la mayor componente inversa que presentan los modelos, a medida que aumenta el ángulo.

## **6.7 Restauración numérica**

La restauración ha logrado invertir el movimiento dextral del experimento estudiado (SISICRE 3), rotando y extendiendo los bloques definidos.

Las fallas de rumbo con componente inversa presentan una restauración exagerada. Esto puede ser a causa de que el bloque vecino por el E, es demasiado grande y no representa un límite claro para acotar el movimiento (Figura 6-3).

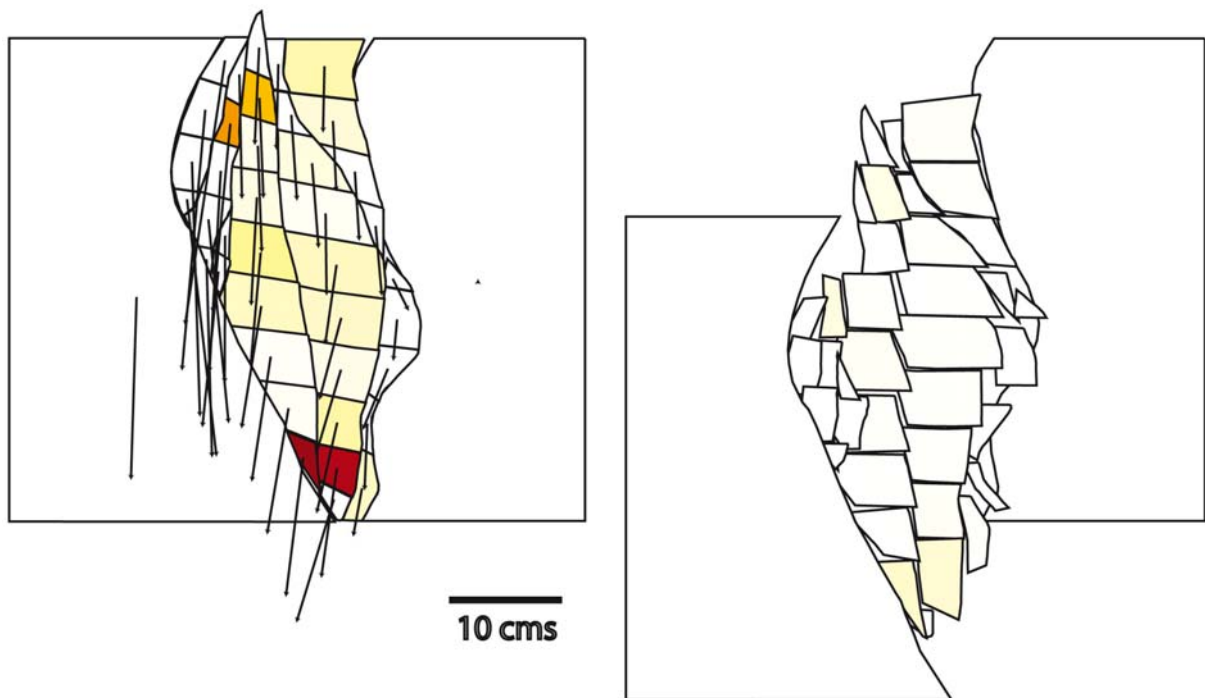
El cálculo en la deformación también puede estar subestimado, lo que podría provocar que los bloques no logren encajar por lo que el programa sigue minimizando los espacios, trasladándolos hacia el S.

La falla que está entre los bloques 12 y 3 (Figura 6-4), presenta una restauración con un desplazamiento, en módulo, similar al real, lo que estaría indicando que el cálculo de la deformación fue más exacto (Figura 6-3).

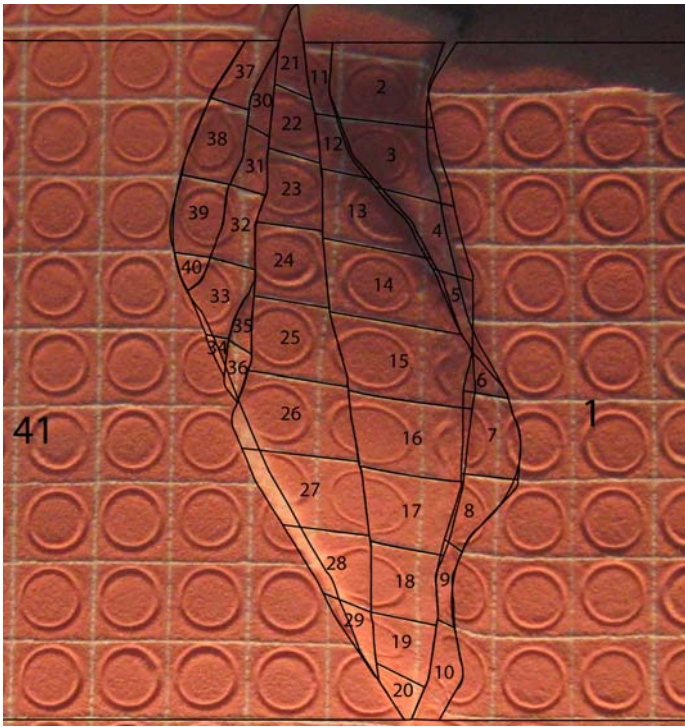
La falla de rumbo del W, entre los bloques 25 y 15 (Figura 6-4), también presenta un desplazamiento similar, en la restauración y en el modelo (Figura 6-3).

Las fallas del W presentan un desplazamiento mucho mayor al desplazamiento que debiesen presentar (Figura 6-3 y Figura 6-4). Esto puede deberse a un error en la elección de los posibles bloques vecinos, o a mediciones erradas en la estimación de la deformación que afectó a los bloques.

Todo esto redunda en que el bloque del W, que no está deformado se traslade exageradamente hacia el S (Figura 6-3 y Figura 6-4).



**Figura 6-3:** Estado inicial y final de la restauración numérica. Las flechas indican el desplazamiento de los bloques y los colores el grado de deformación, siendo la mayor deformación el color rojo.



**Figura 6-4:** Esquema final de los bloques confeccionados para la restauración del modelo SISICRE 3.

## 6.8 Limitaciones de los modelos analógicos

Los modelos analógicos no buscan representar fielmente la realidad, sino, que buscan representar la naturaleza de una manera simplificada, por lo que, los resultados deben ser tratados con cuidado.

El escalamiento realizado es para obtener medidas que sean fácilmente reproducibles en el laboratorio, y no representan una zona en particular de la corteza.

La arena utilizada es cuarzo molido, cuándo lo ideal sería arena de playa, que tiene sus granos redondeados, por lo que su ángulo de fricción interna varía del ideal para representar la corteza frágil.

Para el análisis de los experimentos solamente se tiene la evolución temporal de la vista en planta, por lo que, para la vista en perfil sólo se cuenta con el estado final. Esta limitante impide determinar certeramente la dinámica de las fallas involucradas en la deformación.

## **6.9 Recomendaciones para próximos trabajos**

En los modelos analógicos las fallas nacen de las discontinuidades de velocidad producida por el movimiento de un pistón, por lo que, la placa que se está moviendo, es la más importante para la definición del parámetro a estudiar. Por esto, para realizar cualquier modelo, se debe configurar siempre la placa móvil para representar el parámetro requerido.

Para la restauración numérica es necesario un análisis de sensibilidad, con el fin de establecer la influencia de las estructuras en la deformación y lograr cuantificar el porcentaje de restauración según los datos entregados al programa.

## 7 Capítulo 7: Conclusiones

A través de las experiencias en modelación analógica de arena, que modelaron zonas de transpresión y transtensión con distintos ángulos de curvatura del *stepover* y con distintos ángulos de convergencia entre las placas basales, se concluye que estos parámetros son influyentes sobre la deformación. Se debe tener presente que estos parámetros no influyen por separado en la deformación, sino que lo hacen de manera conjunta, por lo que, la información generada por este trabajo debe ser tomada como un miembro más de la suma de factores que afectan los determinados procesos.

De este trabajo se desprenden las siguientes conclusiones:

1.- Bajo un mismo régimen de esfuerzo, es posible desplazamiento normal e inverso dentro de la misma falla. Esto ocurre sobre las zonas del *stepover* transtensivo, en que el ángulo de convergencia es menor que el ángulo de la curvatura.

2.- La relación entre el ángulo de convergencia entre placas y el ángulo de la discontinuidad del basamento es un factor principal en el estilo estructural de las flores positivas y negativas.

- El ángulo de discontinuidad del basamento afecta directamente el rumbo de las estructuras. Las fallas son coincidentes con la traza de la discontinuidad de la placa basal.
- De las zonas de transpresión se desprende que mientras más ortogonal es la convergencia de placas, mayor es el número de fallas inversas producidas.
- El ángulo del *stepover* es directamente proporcional al ancho de las flores positivas y negativas y es inversamente proporcional al largo de las cuencas y *pop-up*.
- La elevación que alcanzan los *pop-up* está en una relación directamente proporcional con el ángulo de la oblicuidad y el ángulo de convergencia.

- El ángulo máximo de rotación de bloques aumenta progresivamente con el ángulo de discontinuidad de las placas basales y disminuye con el ángulo de convergencia de placas.

3.- El ángulo de convergencia influye directamente en la dirección de las fallas de rumbo que cortan las flores y además en el cierre del *pop-up*. Estas estructuras tienen la misma orientación que la convergencia de las placas.

4.- El orden de aparición de las fallas no muestra una influencia mayor de los parámetros estudiados.

5.- La restauración realizada para el caso compresivo entrega resultados comparables con el estado no deformado, sin embargo más estudios son necesarios para determinar la cantidad de datos requeridos en sistemas transpresivos naturales.



## 8 Referencias

ALBERT, F. 2006. Modelación análoga de la deformación en el margen continental entre 33°-34°S con distintos parámetros de convergencia. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología, *Universidad de Chile*, 81pp.

ALLEN, P. ALLEN, J. 1993. *Basins associated with strike-slip deformation* en ALLEN, P. ALLEN, J. "*Basin analysis, principles and applications*". Blackwell Scientific Publications, 5, p.115-138.

ALMENDINGER, R. 1999. "*Introduction to Structural Geology*". Curso Cornell University, 270 pp.

BOURGEOIS, O. COBBOLD, P. ROUBY, D. THOMAS, J. 1997. "*Least squares restoration of Tertiary thrust sheets in map view, Tajik depression, central Asia*". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, N° B12, p. 27.553-27.573.

COBBOLD, P. 1979. "*Removal of finite deformation using trajectories*". *Journal of Structural Geology*, Vol. 1, N° 1, p. 67-72.

COBBOLD, P. PERCEVAULT, M. 1983. "*Spatial integration of strains using finite elements*". *Journal of Structural Geology*, Vol. 5, N° 3-4, p. 299-305.

MCCLAY, K. 1990. "Deformation mechanics in analogue models of extensional fault system, en E.H. RUTTER Y R.J. KNIPE, eds., *Deformation mechanics, rheology and tectonics: Geological Society Special Publication 54*, p. 445-454.

MCCLAY, K. BONORA, M. 2001. "*Analog models of restraining stepovers in strike-slip fault systems*". *AAPG Bulletin*, Vol. 85, N° 2, p. 233-260.

MUÑOZ, C. 2007. "Modelación Análoga de la influencia de la Sedimentación en la inversión Tectónica, aplicación a las formaciones cenozoicas Abanico y Farellones (33°-36°S), Chile Central". Tesis de Magíster. Departamento de Geología, *Universidad de Chile*, 208pp

PERCEVAULT, M. COBBOLD, P. 1982. “*Mathematical removal of regional ductile strains in Central Brittany: Evidence for wrench tectonics*”. *Tectonophysics*, Vol. 82, Nº 3-4, p. 317-328.

REASENBERG, P. ELLSWORTH, W. 1982. “Aftershocks of the Coyote Lake, California earthquake of August 6, 1979: a detailed study”. *J. geophys. Res.*, Vol. 87, p. 10637-10655.

ROUBY, D, COBBOLD, P. SZATMARI, P. DEMERCIAN, S. COELHO, D. RICCI, J. 1993a. “*Least-squares palinoplastic restoration of regions of normal faulting, application to the Campos basin (Brazil)*”. *Tectonophysics*, Vol. 221, Nº 3-4, p. 439-452.

ROUBY, D, COBBOLD, P. SZATMARI, P. DEMERCIAN, S. COELHO, D. RICCI, J. 1993b. “Restoration in plan view of faulted Upper Cretaceous and Oligocene horizons and its bearing on the history of salt tectonics in the Campos Basin (Brazil)”. *Tectonophysics*, Vol. 228, Nº 3-4, p. 435-445.

ROUBY, D., FOSSEN, H., COBBOLD, P., 1996. “*Extension, displacement, and block rotation in the larger gullfaks area, northern North Sea: determined from map view restoration*”. *AAPG Bulletin*, Vol. 80, Nº 6, p. 875-890.

VARGAS, M. 2002. “Modelamiento análogo de la subducción, incidencia de algunos parámetros en el desarrollo del slab y la tectónica global”. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología, *Universidad de Chile*.

VENEGAS, C. 2004. “Influencia de la erosión en la evolución de un sistema compresivo, modelos análogos y aplicación al orógeno andino”. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología, *Universidad de Chile*, 74pp.

## 9 Anexos

### 9.1 Anexo 1: Anotaciones del desarrollo de los modelos

**Sisicre 3 Final**

**Velocidad: 3 cm/hr**

Tiempo <i>Foto</i> (minutos)	desplazamiento (%)	Observaciones
0		Inicio
5		s/c
10		aflora Falla 1
15		s/c
20	10	Abombamiento en N. Zona de transferencia en Falla1
25		falla ?
30		s/c
35		continúa abombamiento
40	20	Abombamiento sigmoidal
45		continúan activas fallas 1 y ?
50		falla 2 claramente observada
55		afloran falla 3
60	30	afloran falla 4, 5 inversas Aflora falla 6, de rumbo (se desactiva 2)
65		continúa activa falla 1
70		s/c
75		s/c
80	40	aflora falla 9
85		s/c
90		siguen activas las mismas fallas
95		aflora 7 y 10 q puede ser más antigua (inversas)
100	50	s/c
105		falla 9 caract claras de ser inversa
110		s/c
115		s/c
120	60	mismas fallas activas
125		s/c
130		s/c
135		fallas 4 y 6 uniéndose, aflora falla 11 (ramificación de falla 9)
140	70	aflora falla !
145		s/c
150		s/c
155		las mismas fallas activas
160	80	se nota movimiento en el rumbo al E de falla 9
165		s/c
170		aflora falla 12
175		aflora falla 13 que junto con falla 12
180	90	13 y 12 tendrían su origen en el movimiento en el rumbo (falla !)
185		nuevo abombamiento en lado E
190		s/c
195		s/c
200	100	fin

**Sisicre 4 Final****Velocidad: 3 cm/hr (40 Hz)**

Tiempo Foto (minutos)	Acortamiento (%)	Observaciones
0		Inicio
5		s/c
10		aflora falla 1 de rumbo, hundimiento en zona de cuenca
15		aflora fallas 2, 3 y 4 (después de 3) de rumbo y normales
20	10	aflora falla 5 y abombamiento en zona compresión
25		5 se une a 2, 4 sigue activa
30		aflora 6 y se desactiva 4 y 7 (inversa y rumbo)
35		s/c
40	20	aflora 8, inversa
45		aflora 9, inversa
		aflora 10, inversa, y abombamiento ahora está limitado por 4 fallas
50		s/c
55		s/c
60	30	mismas fallas activas
65		aflora 11, de rumbo dextral
70		s/c
75		s/c
80	40	s/c
85		continúa activa 11
90		s/c
95		s/c
100	50	11 con leve componente inversa
105		s/c
110		11 continúa activa
115		s/c
120	60	aflora falla 12, de rumbo dextral
125		aflora falla 13, inversa
130		11 y 12 continúan activas al igual q 13
135		s/c
140	70	s/c
145		s/c
150		s/c
155		continuan activas las mismas fallas
160	80	s/c
165		aflora 14, de rumbo dextral
170		s/c
175		s/c
180	90	aflora falla 15 de rumbo sinestral
185		afloran falla 16 sinestral y 17 dextral
190		s/c
195		s/c
200	100	FIN

**Sisicre 5 Final****Velocidad:3 cm/hr (40 Hz)**

Tiempo Foto (minutos)	Desplazamiento (%)	Observaciones
0		Inicio
5		s/c
10		se comienza a gestar falla 1, de rumbo dextral
15		aflora cuenca con fallas 2, 3 y 4
20	10	aflora 5 (sería continuación de 2) de rumbo y 2 y 3 tipo echelón
25		4 se "curva", se une 5 y 2, aflora abombamiento en N
30		s/c
35		1 se bifurca en el norte (6) y en sur (5)
40	20	afloran fallas 7 y 8, inversas y de rumbo.. 1,6 y7 se ven en echelón
45		s/c
50		afloran 9 y 10, inversa e inversa y de rumbo respectivamente
55		aflora 9'
60	30	4 se une a 1, en el centro y a 10, aunque 4 es normal y 10 inversa
65		s/c
70		s/c
75		s/c
80	40	aflora 11 de rumbo
85		s/c
90		continúan activas fallas q limitas la cuenca y flor positiva
95		s/c
100	50	afloran fallas * y falla **, de rumbo sinestrales
105		s/c
110		11 continúa activa y ya cruza toda la zona de compresión
115		aflora falla 12, inversa
120	60	aflora falla 13, de rumbo dextral, 11 muestra características inversas
125		s/c
130		aflora 15, similar a *
135		sigun activas 11, 12 y 13
140	70	aflora 16, de rumbo similar a 11 y 13
145		s/c
150		s/c
155		s/c
160	80	s/c
165		s/c
170		s/c
175		aflora 17
180	90	s/c
185		s/c
190		s/c
195		s/c
200	100	FIN

**Sisicre 7 Final****Velocidad: 3 cm/hr (40 Hz)**

Tiempo Foto (minutos)	Desplaz. (%)	Observaciones
0		Inicio
5		s/c
10		aflora falla 1, de rumbo dextral
15		1 continúa activa
20	10	leve abombamiento en zona N
25		leve abombamiento en zona centro(C) y S
30		1 continúa activa y claros abombamientos en las 3 zonas
35		s/c
40	20	aflora falla 2, inversa, 1 continúa activa
45		aflora falla 3
50		afloran fallas 4 y 5, inversas
55		3 se extiende hacia el centro y afloran fallas 6 y 7, inversas
60	30	aflora falla 8, inversa, sería continuación luego de 1 de la falla 6
65		aflora falla 9, inversa y en S fallas 10
70		s/c
75		s/c
80	40	aflora falla 11, inversa
85		s/c
90		s/c
95		s/c
100	50	aflora falla 12 de rumbo
105		fallas 10, de rumbo y algo de componente inversa siguen activas
110		afloran fallas 13 y 14 (q se une con 19), inversas
115		13 se extiende hacia el centro
120	60	s/c
125		s/c
130		s/c
135		3 se extiende al S
140	70	aflora falla 16, de rumbo
145		aflora 17, inversa
150		aflora 18, inversa
155		afloran fallas 19
160	80	afloran fallas 20
165		s/c
170		s/c
175		s/c
180	90	s/c
185		s/c
190		s/c
195		aflora falla 21, de rumbo dextral
200	100	FIN



**Sisicre 8 Final****Velocidad: 3 cm/hr**

T° Foto (minutos)	% de acortamiento	Observaciones
0		Inicio
5		s/c
10		s/c
15		se comienza a notar el movimiento dextral de las placas basales
20	10	s/c
25		se comienza a notar el abombamiento en la zona S,C y N
30		aflora falla 1 de rumbo dextral aflora falla 2, inversa en N
35		
40	20	aflora falla 3, inversa en la zona N 1 comienza a mostrar fallamiento inverso con vergencias opuestas
45		s/c
50		s/c
55		fallas 2 y 3 se extiende hacia el S y N
60	30	afloran fallas 4, de rumbo sinestral y 5 dextral, 1 se extiende al S
65		s/c
70		s/c
75		s/c
80	40	aflora falla 8, inversa y 9, de rumbo dextral en S
85		s/c
90		aflora falla 10, inversa
95		aflora falla 11 de rumbo sinestral en C
100	50	falla 5 se extiende al N y falla 9 corta a falla 1
105		aflora una segunda falla 11 y afloran fallas 12 en N
110		aflora falla 13, de rumbo dextral, en N
115		aflora falla 14 de rumbo dextral y falla 15 inversa, ambas en N
120	60	aflora falla 16
125		s/c
130		s/c
135		aflora falla 17 en S
140	70	falla similar a 16 aflora al otro lado de falla 17
145		s/c
150		s/c
155		falla 15 se extiende hacia el S
160	80	aflora falla 19, de rumbo dextral en N
165		s/c
170		s/c
175		s/c
180	90	aflora falla 20, inversa en S
185		s/c
190		s/c
195		s/c
200	100	FIN

**Sisicre 9 Final****Velocidad: 3 cm/hr (40 Hz)**

T° Foto (minutos)	% de acortamiento	Observaciones
0	0	Inicio
5		s/c
10		s/c
15		se empieza a notar el movimiento relativo de ambas placas
20	10	se comienza a notar abombamiento en zona N
25		se comienza a notar abombamiento en C y S
30		aflora falla 1 en N, inversa
35		s/c
40	20	aflora falla 2 en N, inversa
45		aflora falla 3, rumbo dextral, inversa con vergencias opuestas
50		falla 2 se extiende hacia el centro, aflora falla 4 en N, inversa
55		aflora falla 5 , inversa y falla 3 se extiende hacia el S
60	30	falla 5 se extiende al N y S hasta juntarse con 3, 2 se extiende al N
65		s/c
70		afloran fallas 6 y 7 de rumbo dextral en S y N resp. 6 tb inversa
75		aflora falla 8 de rumbo dextral
80	40	aflora falla ?, inversa y de rumbo dextral en S
85		aflora falla 8' de rumbo dextral y 6 corta 3 y se extiende al N
90		s/c
95		s/c
100	50	aflora falla 9 inversa
105		s/c
110		s/c
115		s/c
120	60	s/c
125		aflora falla 10 de rumbo sinestral
130		aflora falla 11, inversa
135		s/c
140	70	afloran fallas 12
145		s/c
150		aflora falla 13 de rumbo dextral
155		aflora falla 14, inversa
160	80	aflora falla 15 de rumbo dextral
165		aflora falla 17de rumbo dextral
170		s/c
175		aflora falla 18, inversa
180	90	s/c
185		s/c
190		s/c
195		s/c
200	100	FIN

**Sisicre 12 Final****Velocidad: 3 cm/hr (40 Hz)**

Tiempo Foto (minutos)	% de acortamiento	Observaciones
0		inicio 9:55
5		s/c
10		s/c
15		comienza a notarse el movimiento en el rumbo en zona S
20	10	claro abombamiento en zonas N, C y S
25		s/c
30		abombamiento más claro
35		aflora falla 1, inversa, en zona N
40	20	aflora falla 2, inversa
45		falla 2 se extiende al N y al S y falla 1 al S
50		falla 2 llega hasta sector S del modelo
55		aflora falla 3, inversa, en zona S
60	30	aflora falla 4, inversa. 3, sería continuación de 2
65		s/c
70		aflora falla 5, de rumbo dextral en N
75		s/c
80	40	aflora falla 6, de rumbo dextral en zona S
85		s/c
90		aflora falla 7, de rumbo en el S
95		afloran fallas 8 y 9, inversas en en N
100	50	s/c
105		aflora falla 10, de rumbo en N
110		s/c
115		falla 8 se extiende hacia el S
120	60	s/c
125		aflora falla 11, de rumbo sinistral en zona S
130		afloran fallas 12, de rumbo dextral y 13, de rumbo sinistral
135		aflora falla 14, inversa en N
140	70	aflora falla 15, inversa, en S
145		s/c
150		s/c
155		s/c
160	80	s/c
165		s/c
170		aflora falla 16, inversa en C
175		s/c
180	90	s/c
185		s/c
190		aflora falla 17, de rumbo dextral, en zona N
195		aflora falla 18, der umbo dextral, en C
200	100	FIN

**Sisicre 13 Final****Velocidad: 3 cm/hr (40 Hz)**

Tiempo Foto (minutos)	Desplaz. (%)	Observaciones
0		inicio 13:35
5		s/c
10		s/c
15		comienzan leves abombamientos en zona N y S
20	10	comienza a notarse el fallamiento de rumbo
25		s/c
30		s/c
35		afloran fallas 1 y 2, inversas en zona N, de vergencia opuesta
40	20	1 y 2 se extienden hacia el S
45		s/c
50		fallas 1 y 2 se extienden al N y 2 al S, donde aflora falla 3, inversa
55		fallas 2 y 3 se unen
60	30	s/c
65		fallas 1 y 2 comportamiento de rumbo dextral. Tb afloran fallas **
70		aflora falla 4, de rumbo dextral, en zona S
75		aflora falla 5, de sentido EW
80	40	aflora falla 6, inversa, en S, se une con 1 aflora falla 7, inversa en E
85		falla 7 se extiende hacia el N y aflora falla 8, inversa en zona NE
90		s/c
95		fallas ** se extiende al NE, limitando por el SE el pop-up del S
100	50	falla 7 se extiende al N
105		s/c
110		falla 5, sinestral
115		afloran fallas paralelas a 5
120	60	falla 4 se extiende hacia el N y afloran fallas 9, similares a 5
125		s/c
130		s/c
135		aflora falla 10, inversa, en zona C, posible continuación de falla 4
140	70	s/c
145		comienza a aflorar falla 11, de rumbo dextral, en zona C
150		aflora falla 12, inversa en N
155		afloran fallas 13 y 14, de rumbo dextral en S y N, respectivamente
160	80	s/c
165		aflora falla 15, inversa en zona S
170		aflora falla 16, inversa, en zona C
175		s/c
180	90	s/c
185		s/c
190		s/c
195		s/c
200	100	FIN

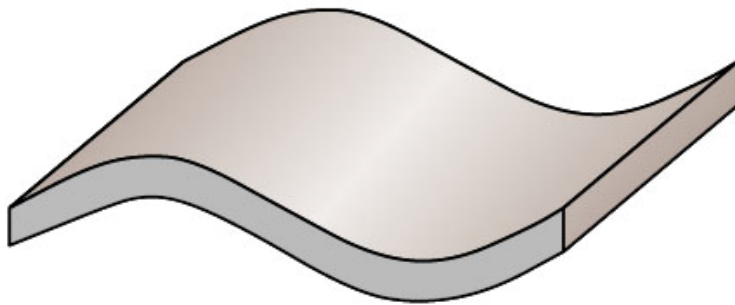
**Sisicre 14 Final****Velocidad: 3 cm/hr (40 Hz)**

Tiempo <i>Foto</i> (minutos)	% de acortamiento	<i>Observaciones</i>
0	0	Inicio
5		s/c
10		s/c
15		s/c
20	10	comienza a notarse el movimiento de rumbo comienza abombamiento en todas las zonas, mayor en N
25		s/c
30		s/c
35		s/c
40	20	afloran fallas 1 y 2, inversa en N
45		fallas 1 y 2 se extienden al N y al S
50		afloran falla 3 y 4 en S
55		fallas 2 y 4 se unen
60	30	s/c
65		aflora falla 5, de rumbo dextral en S
70		aflora falla 6, inversa en N
75		s/c
80	40	s/c
85		aflora falla 7, de rumbo dextral en C
90		s/c
95		s/c
100	50	aflora falla 8, inversa en N
105		s/c
110		aflora falla 9', de rumbo sinestral en S
115		aflora falla 9, de rumbo dextral en S
120	60	aflora falla 10, invesa en S
125		aflora falla 11, de rumbo sinestral en N
130		s/c
135		s/c
140	70	falla 8 se extiende hacia el S
145		s/c
150		s/c
155		s/c
160	80	aflora falla 12, de rumbo dextral, en C
165		aflora falla 13, de rumbo dextral en S
170		afloran fallas 14, inversa en N, y 15, de rumbo en S
175		s/c
180	90	s/c
185		s/c
190		s/c
195		aflora falla 16, inversa en S
200	100	FIN

## 9.2 Anexo 2: Deformación de cuerpo no rígido

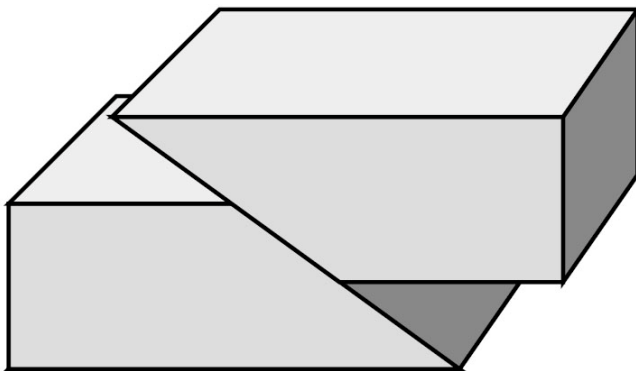
Para entender el *strain* (deformación) se deben conocer 4 formas en la que se da la deformación:

**Continua:** La deformación se produce suavemente, por lo que no hay cambios abruptos en el material, un ejemplo de esto son los pliegues (Figura 9-1).



**Figura 9-1.** Deformación continua reflejada en un pliegue.

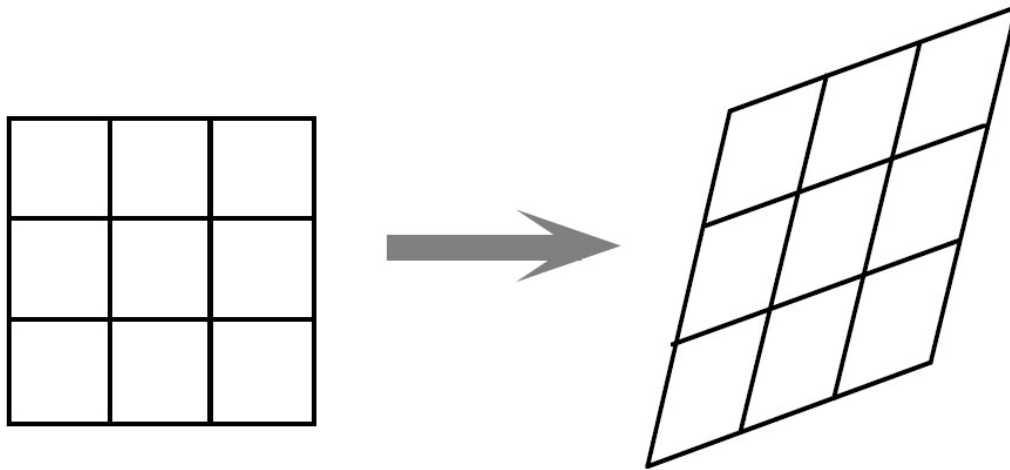
**Discontinua:** En este caso se producen cambios abruptos en la superficie del material o quiebres en el cuerpo rígido, por ejemplo las fallas (Figura 9-2).



**Figura 9-2.** Deformación discontinua reflejada en una falla.

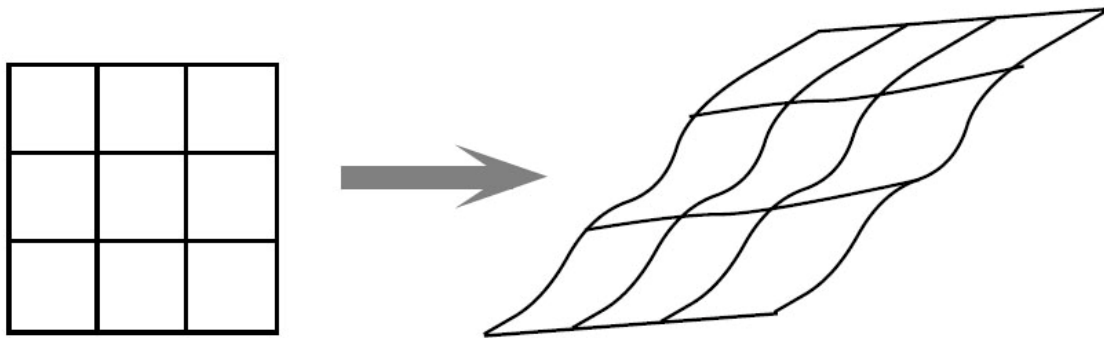
**Homogéneo:** El *strain* se distribuye de la misma manera en todo el material, o sea cada partícula es deformada de la misma manera. De acuerdo a lo anterior se puede hacer una analogía diciendo que las líneas rectas seguirán rectas y las líneas paralelas seguirán paralelas después de la deformación (Figura 9-3).





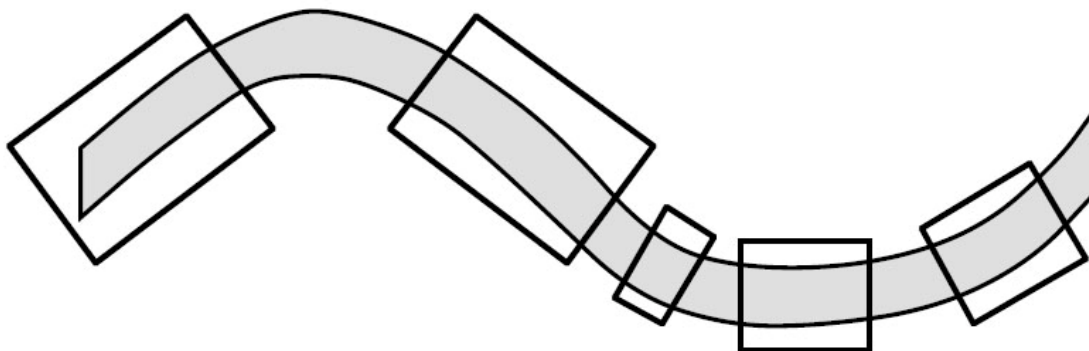
**Figura 9-3.** Cuadrado deformado mostrando deformación homogénea.

**Heterogénea:** La cantidad de strain varía a través del cuerpo que está siendo deformado, produciendo partes del material con mayor deformación que otras (Figura 9-4).



**Figura 9-4.** Cuadrado deformado mostrando deformación heterogénea.

El problema surge al analizar la deformación, ya que, es muy difícil estudiar la deformación heterogénea, por lo que se discretiza el problema en dominios estructurales, que son o se acercan a una deformación homogénea (Figura 9-5).



**Figura 9-5.** Pliegue mostrando deformación heterogénea con distintos dominios estructurales con deformación homogénea.

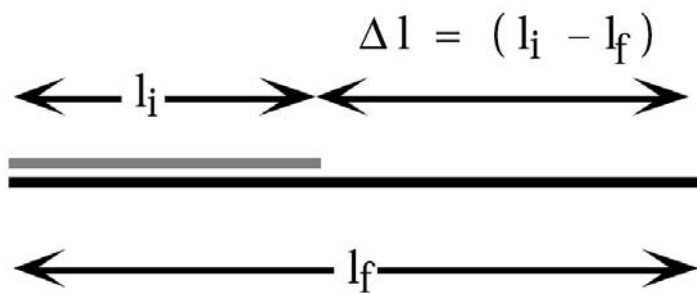
### 9.2.1 Medida de strain

Para cuantificar la deformación se pueden medir 3 parámetros: cambios en el largo de las líneas, cambios en los ángulos y cambios en el volumen.

#### 9.2.1.1 Cambios en el largo de una línea

Se definen 3 parámetros:

**Extensión:** la extensión se define como la diferencia entre el largo final y el largo inicial (Figura 9-6)



**Figura 9-6.** Segmento de línea, en que se muestra el largo inicial y el largo final, con el cálculo de la extensión.

**Elongación:**

$$e \equiv \frac{\Delta l}{l_i} = \frac{(l_f - l_i)}{l_i} = \frac{l_f}{l_i} - 1 \quad (9.1)$$

El acortamiento es negativo.

**stretch:** Se define como el largo final partido por el largo inicial.

$$S \equiv \frac{l_f}{l_i} = 1 + e \quad (9.2)$$

**Elongación cuadrática:**

$$\lambda = S^2 = (1 + e)^2 \quad (9.3)$$

Si  $\lambda = 1$  no hay cambios.

$\lambda < 1$  hay acortamiento

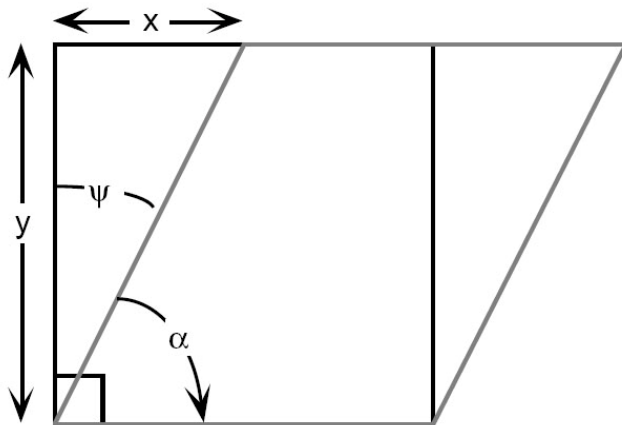
$\lambda > 1$  hay extensión

Pero  $\lambda \geq 0$  debido a que es una función elevada al cuadrado, además solo será igual a 0 cuando la elongación es -1, o sea, cuando el largo final de una línea sea 0.

### 9.2.1.2 Cambios en el ángulo

Esta deformación puede medirse de 2 maneras:

Midiendo el ángulo entre dos líneas originalmente perpendiculares: cambio en el ángulo es  $90 - \alpha = \Psi =$  cizalle angular (Figura 9-7).



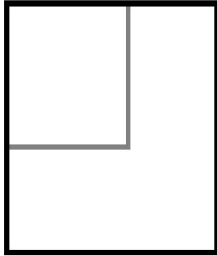
**Figura 9-7.** Medida de la deformación en función del cambio de ángulo.

También midiendo el desplazamiento en  $x$  de una partícula a una distancia  $y$  del origen.  $X/Y =$  cizalle de *strain* (Figura 9-7)

La relación entre estas 2 medidas es una relación trigonométrica:  $\lambda = \tan \Psi$ .

### 9.2.1.3 Cambios en el volumen

Es la relación entre el volumen final y el inicial (Figura 9-8)

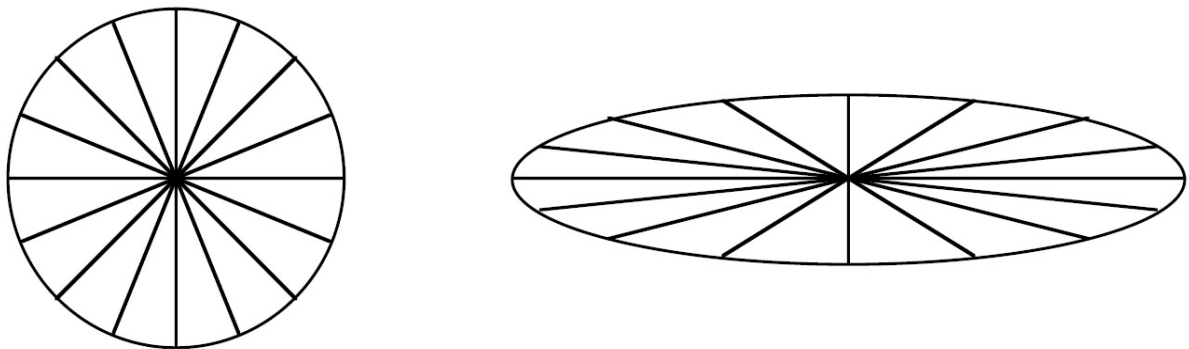


$$\text{Dilación} = \Delta \equiv \frac{(V_f - V_i)}{V_i} \quad (2.4)$$

**Figura 9-8.** Cambio de volumen de un cuerpo.

### 9.2.2 Relaciones generales de *strain* en 3D

El problema que surge ahora, es como calcular el *strain* en un cuerpo, ya que, no es sólo medir cada línea o medir cada ángulo porque esto no es práctico geológicamente. Para solucionar este problema se utiliza un círculo, que describe el cambio de las líneas en todas las orientaciones posibles pero con el mismo largo. Un círculo que es sometido a un *strain* homogéneo se convierte en una elipse (Figura 9-9), esto visto en 2D, ya que, si queremos estudiar la deformación en 3D será una esfera la que al ser sometida a este *strain* se convierte en un elipsoide.

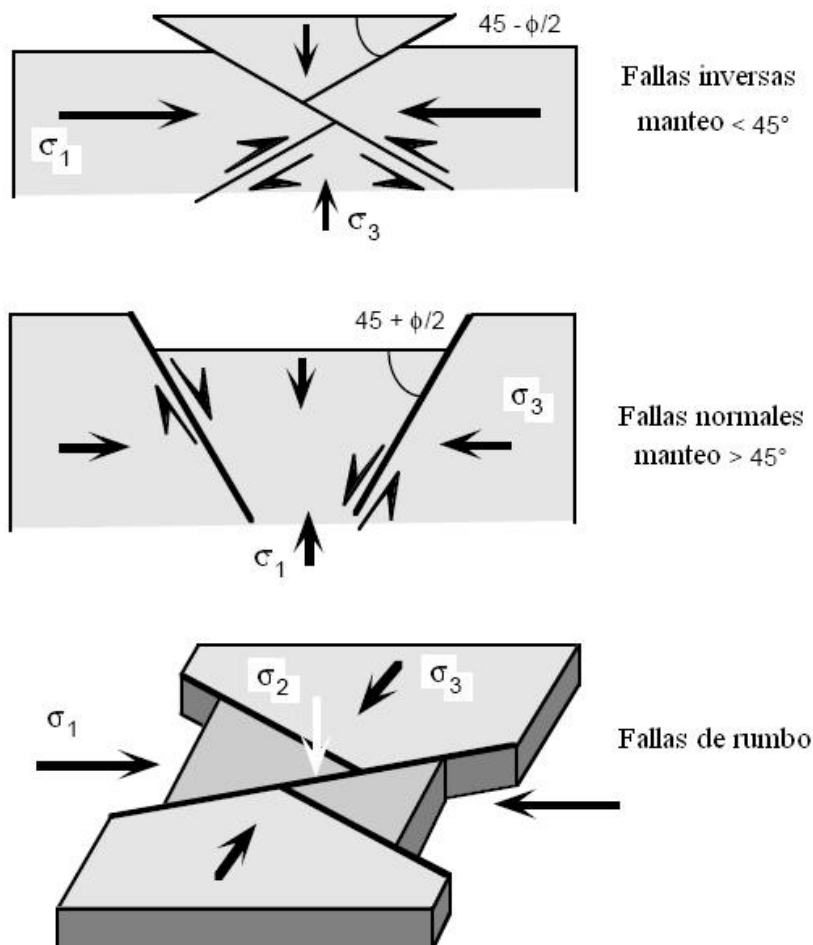


**Figura 9-9.** Elipse de *strain* mostrando la deformación de una circunferencia y las líneas en todas las orientaciones posibles.

La elipse se define por la longitud de sus ejes X y Z ( $X > Z$ ) y la orientación de su eje mayor, quedando definidos su forma y orientación

### 9.3 Anexo 3: Sistema de fallas de rumbo

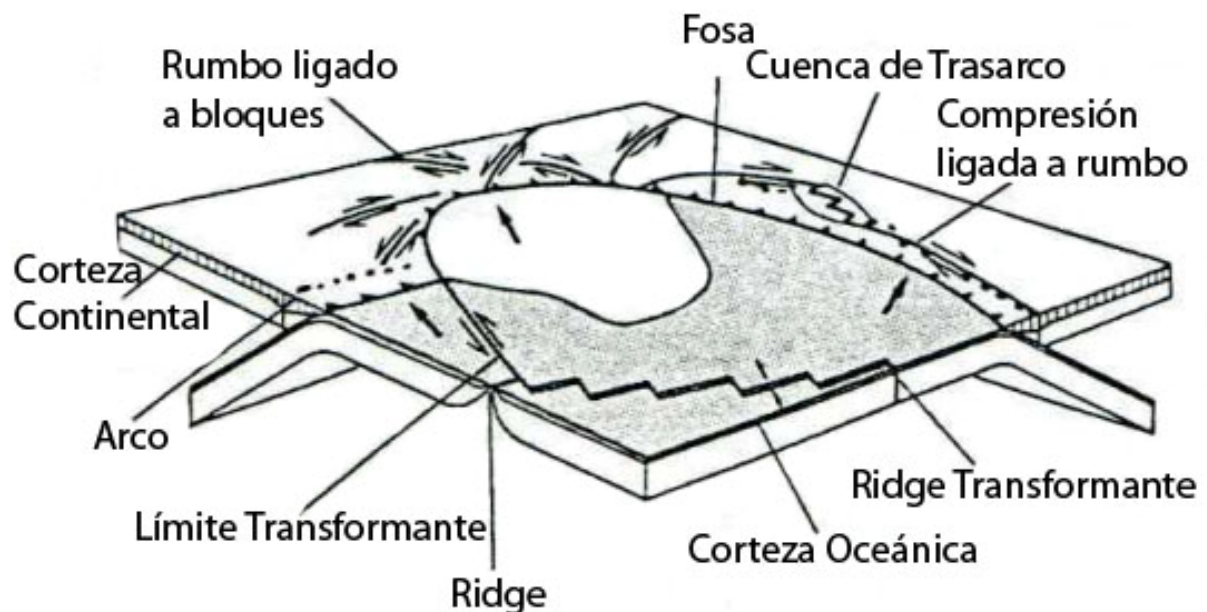
Siguiendo la clasificación dinámica propuesta por Anderson (1905), basada en el posicionamiento de los vectores de esfuerzo principales:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , ortogonales entre si, en el que  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  (Fig. 2.10), se tienen 3 tipos de fallas principales: normal ( $\sigma_1$  vertical,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  horizontales), inversa ( $\sigma_3$  vertical,  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  horizontales) y transcurrente o de rumbo ( $\sigma_2$  vertical,  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  horizontales) (Figura 9-10). Esta clasificación también puede ser de acuerdo al movimiento relativo de los bloques, definiendo como bloque colgante al bloque que está sobre la falla, se tiene que si éste baja con respecto al otro será una falla normal, si, por el contrario, el bloque colgante sube, será una falla inversa. Las fallas transcurrentes o de rumbo son las que acomodan movimiento horizontal de los bloques adyacentes y, dependiendo del movimiento relativo de los bloques se agrupan en 2 tipos: dextrales (un bloque se mueve hacia la derecha con respecto al otro) y sinestrales (un bloque se mueve hacia la izquierda).



**Figura 9-10.** Clasificación de fallas según ubicación de los esfuerzos principales (Modificado de Almendinger 1999).

Las zonas de rumbo pueden estar asociadas con límites de placas (eg. falla San Andrés), límites de microplacas, deformación intraplaca (eg. Sistema de falla de Atacama) o pequeñas fracturas de desplazamiento limitado (Allen y Allen, 1993). El movimiento en el rumbo puede tener una componente convergente, lo que genera transpresión, o una componente divergente, lo que genera transtensión.

Esta relación entre la tectónica de placas y las fallas de rumbo fue resumida por Woodcock (1986) (Figura 9-11). Las fallas de rumbo se clasifican en Interplacas e Intraplacas, en la primera tenemos las fallas transformantes de los *ridges*, las fallas transformantes, y las fallas de rumbo con una componente de convergencia, y en la segunda están las fallas ligadas a los bloques acresionados, fallas de rumbo intracontinentales (separan terrenos alóctonos de diferentes estilos estructurales), fallas *tear* (fallas de acomodación), fallas de transferencia. (Silvester, 1988) (Figura 9-11).



**Figura 9-11.** Relación entre los límites de placas y las fallas de rumbo.

El desarrollo de regiones de extensión y acortamiento a lo largo de sistemas de rumbo ha sido relacionado a la orientación relativa del movimiento de la placa y las fallas mayores (Mann et al, 1983).

### 9.3.1 Patrones estructurales

Las fallas de rumbo son lineales o curvilíneas cuando son vistas en planta y generalmente poseen una zona de desplazamiento principal donde se acomoda el estrés de cizalle. Sin embargo, cambios en la orientación de la falla y/o la influencia de la fábrica geológica local puede extender la deformación a los bloques corticales yuxtapuestos (Allen & Allen, 1993).

En secciones cruzadas, presentan fallas de alto ángulo que cortan desde basamento ígneo y metamórfico, hasta la cubierta sedimentaria. También se puede dar que en una mismo perfil de esta estructura se presenten fallas normales e inversas, incluso, que la dirección del manto de una falla cambie a través del rumbo.

Asociados a los movimientos en el rumbo, se producen pliegues (Figura 9-12) y fallas (Figura 9-13) *en echelon*, estructuras que son consistentes con la orientación y sentido de la zona de falla principal. A través de modelación analógica (Riedel, 1929) y estudios de casos reales se ha llegado a sugerir 3 tipos de estructuras asociadas a la falla principal (Almendinger, 1999), estas son: 1) convergentes: los bloques se mueven acercándose el uno al otro; 2) divergentes: los bloques se separan el uno del otro; 3) paralelas: los bloques se mueven paralelas.

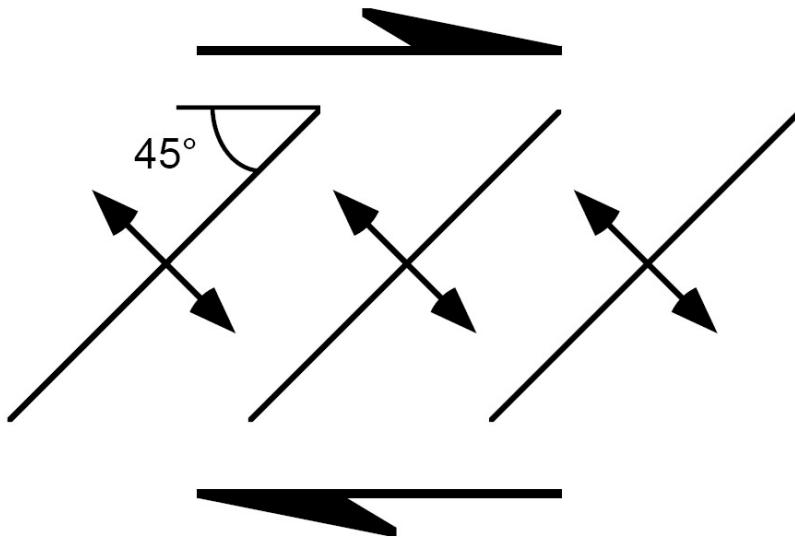
#### 9.3.1.1 Tipo paralelo

Se pueden separar en estructuras pre-ruptura y post-ruptura.

##### ***9.3.1.1.1 Estructuras pre-ruptura***

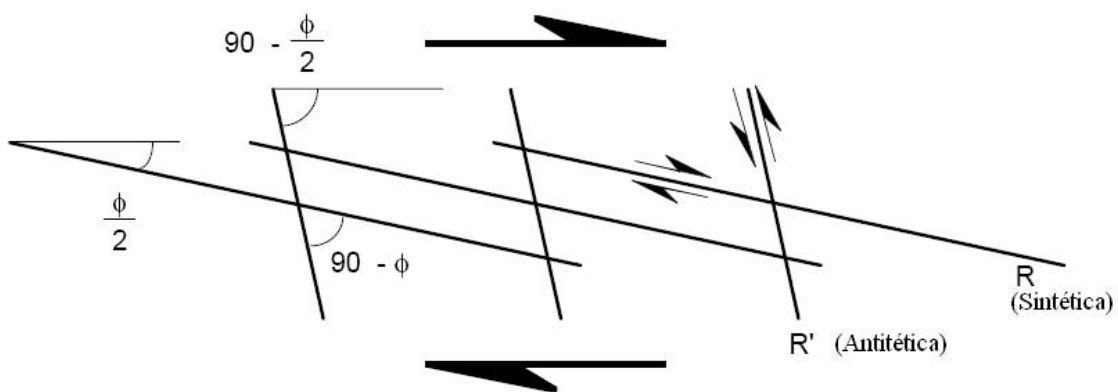
- 1) Pliegues *en echelon*: estos pliegues son inicialmente con un ángulo de 45° con respecto a la falla principal, pero a medida que la deformación avanza, este ángulo va disminuyendo (Figura 9-12).





**Figura 9-12.** Pliegues en echelón formados en zona de cizalle.

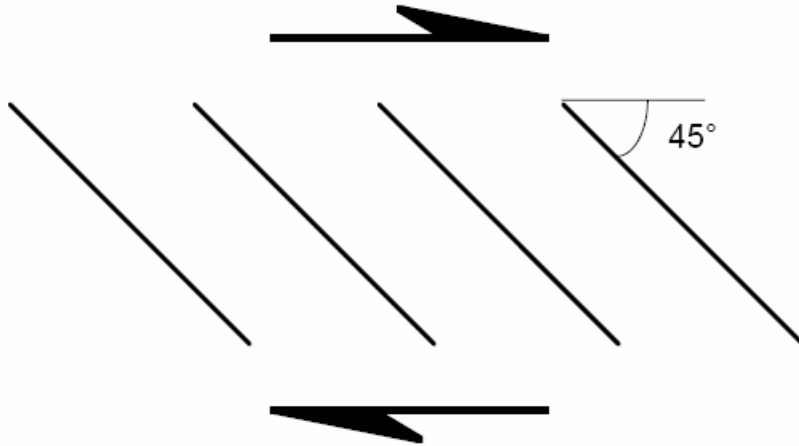
2) Cizalle de Riedel (fallas de rumbo conjugadas): son 2 grupos de fallas, las R, sintéticas (mismo sentido que falla principal) y las R', antitéticas (sentido opuesto a falla principal), cuyo ángulo está controlado por su coeficiente de fricción interna  $\Phi$  (Almendinger, 1999), para el primer grupo de fallas se tiene que su ángulo es pequeño con respecto a la falla principal, mientras que el segundo grupo su ángulo es alto (Figura 9-13). Las fallas R son más comúnmente observadas debido a su mayor desplazamiento (Almendinger, 1999). El cizalle de Riedel puede ser usado para determinar el sentido del cizalle en zonas frágiles.



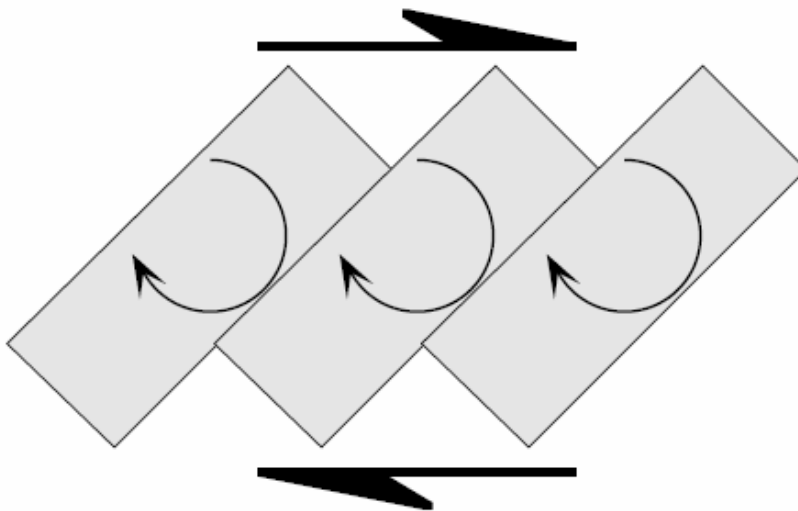
**Figura 9-13.** Esquema mostrando las fallas conjugadas de Riedel.

3) Grietas de Tensión: grietas formadas inicialmente a  $45^\circ$  de la falla principal, pero que van rotando y abriéndose, dando paso a la formación de nuevas grietas, a medida que

avanza la deformación (Figura 9-14). Sirven como criterio cinemático. Estas grietas pueden, a su vez, servir para permitir la rotación de los bloques limitados por ellas, esta rotación sería estilo dominó y las fallas entre los bloques tendrían sentido opuesto a la falla principal (Figura 9-15).



**Figura 9-14.** Forma inicial de las grietas de tensión.



**Figura 9-15.** Bloques rotando estilo dominó.

#### ***9.3.1.1.2 Estructuras de ruptura y post-ruptura***

Un nuevo set de fallas, sintéticas, las fallas P, cuyo ángulo también está controlado por  $\Phi$ , estas fallas son simétricas a las fallas R, y tienden a unirse con ellas, formando una zona cruzada de falla (Figura 9-16).

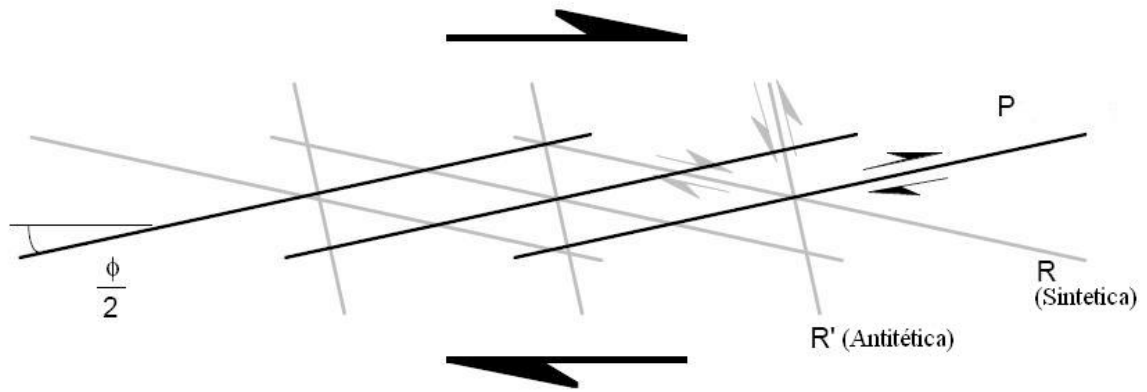


Figura 9-16: Esquema de fallas Riedel mostrando las fallas P.

### 9.3.1.2 Tipo convergente

Este tipo de estructuras son comúnmente conocidas como estructuras *transpresionales*, se caracterizan por un mayor desarrollo de los pliegues en echelón, desarrollo de fallas subparalelas a los ejes de los pliegues, formando estructuras en *flor positiva* (Figura 9-17). El orógeno formado a lo largo de fallas de rumbo se conoce como *pop-up*.

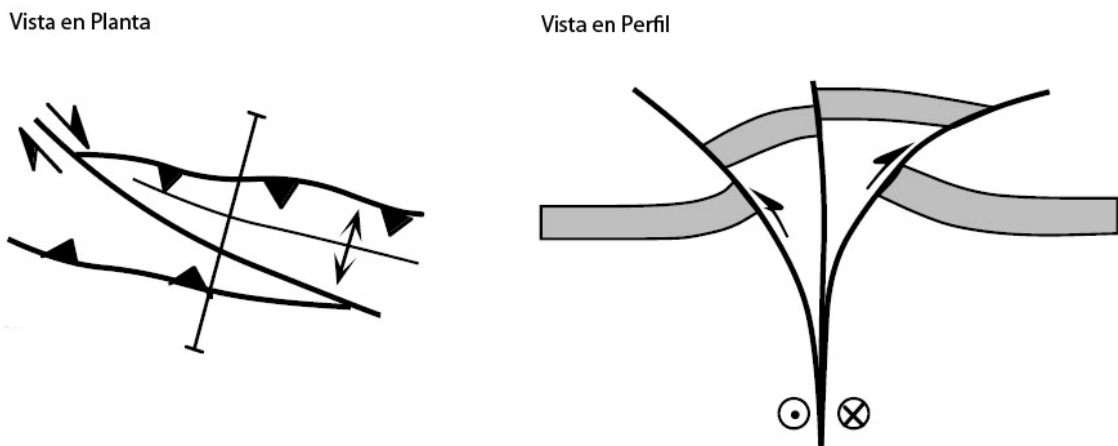
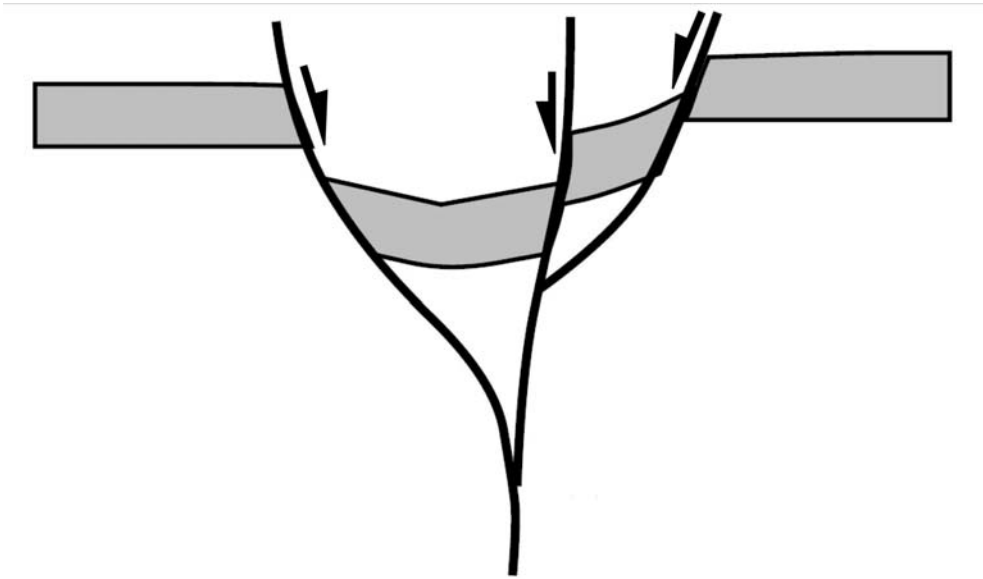


Figura 9-17. Estructura de flor positiva vista en planta y en perfil.

### 9.3.1.3 Tipo divergente

Este tipo de estructuras son comúnmente conocidas como estructuras *trastensionales* se caracterizan por presentar fallas normales, formando estructuras de *flor negativa* (Figura 9-18). Las cuencas extensionales formadas a lo largo de fallas de rumbo son llamadas cuencas *pull-apart*.



**Figura 9-18:** Vista en perfil de una flor negativa.

## 9.4 Anexo 4: Archivos dat para la restauración

### Parte del archivo dat.dig

1058.618700 978.408400 1  
1058.618700 194.806600 1  
695.577600 194.806600 1  
712.855000 228.486300 1  
721.383300 238.983900 1  
722.695800 250.793900 1  
719.415000 266.540500 1  
716.790500 281.630400 1  
711.542000 305.906300 1  
709.573700 338.710900 1  
715.478500 374.796400 1  
727.943800 401.040000 1  
754.844700 431.221700 1  
775.184600 461.402300 1  
785.862300 488.301800 1  
788.961400 515.202100 1  
785.862300 535.540500 1  
777.808100 555.880400 1  
771.247600 576.219700 1  
756.156300 602.462900 1  
741.065900 630.019500 1  
729.912600 656.263700 1  
722.039600 681.851600 1  
714.166500 714.656300 1  
702.356400 763.208000 1  
691.858900 817.007800 1  
685.297900 832.754900 1  
682.673300 848.501000 1  
680.705600 874.744900 1  
681.360800 906.237500 1  
687.266600 931.825400 1  
705.637200 962.662400 1  
715.806200 978.408400 1  
701.481000 978.408400 2  
696.015100 963.318100 2  
689.235400 944.291500 2  
685.953600 935.762000 2  
683.329600 927.888900 2  
682.673300 917.391400 2  
685.078600 906.018800 2  
687.923300 889.835000 2  
689.891100 879.337600 2  
577.916000 892.022200 2  
573.761200 904.269300 2  
570.480000 915.423100 2  
569.168500 925.264400 2  
571.355500 944.947500 2

**dat.rot**

1	0	0	1	10
2	7	0	1	10
3	7	0	1	10
4	14	0	1	10
5	17	0	1	10
6	10	0	1	10
7	7	0	1	10
8	7	0	1	10
9	45	0	1	10
10	27	0	1	10
11	6	0	1	10
12	10	0	1	10
13	10	0	1	10
14	10	0	1	10
15	10	0	1	10
16	9	0	1	10
17	9	0	1	10
18	11	0	1	10
19	12	0	1	10
20	26	0	1	10
21	23	0	1	10
22	25	0	1	10
23	16	0	1	10
24	8	0	1	10
25	9	0	1	10
26	9	0	1	10
27	6.5	0	1	10
28	14	0	1	10
29	22	0	1	10
30	28	0	1	10
31	18	0	1	10
32	16	0	1	10
33	14	0	1	10
34	10	0	1	10
35	33	0	1	10
36	33	0	1	10
37	5	0	1	10
38	8	0	1	10
39	10.5	0	1	10
40	8	0	1	10
41	0	0	1	10

**dat.tec**

1 0 0.0000 1 10  
2 8.4 7 1 10  
3 4.3 7 1 10  
4 0 0.0000 1 10  
5 0 0.0000 1 10  
6 0 0.0000 1 10  
7 0 0.0000 1 10  
8 0 0.0000 1 10  
9 0 0.0000 1 10  
10 6.2 17 1 10  
11 0 0.0000 1 10  
12 0 0.0000 1 10  
13 3.5 100 1 10  
14 1.49 100 1 10  
15 6.50 100 1 10  
16 5.65 9 1 10  
17 2.44 9 1 10  
18 8.98 11 1 10  
19 45.3 12 1 10  
20 0 0.0000 1 10  
21 0 0.0000 1 10  
22 25.5 15 1 10  
23 2.09 16 1 10  
24 2.98 8 1 10  
25 10.5 9 1 10  
26 6.34 9 1 10  
27 0.95 6.5 1 10  
28 1.21 14 1 10  
29 47.7 22 1 10  
30 0 0.0000 1 10  
31 29.5 18 1 10  
32 0 0.0000 1 10  
33 0 0.0000 1 10  
34 0 0.0000 1 10  
35 0 0.0000 1 10  
36 0 0.0000 1 10  
37 0 0.0000 1 10  
38 0 0.0000 1 10  
39 0 0.0000 1 10  
40 0 0.0000 1 10  
41 0 0.0000 1 10



**dat.voi**

2 3 4 5 6 7 8 9 10 0  
1 3 11 12 0  
1 2 4 11 12 13 0  
1 3 5 12 13 14 0  
1 4 6 13 14 15 0  
1 5 7 14 15 16 0  
1 6 8 15 16 17 0  
1 7 9 16 17 18 0  
1 8 10 17 18 19 0  
1 9 18 19 20 0  
2 3 12 21 22 0  
2 3 4 11 13 21 22 23 0  
3 4 5 12 14 22 23 24 0  
4 5 6 13 15 23 24 25 0  
5 6 7 14 16 24 25 26 0  
6 7 8 15 17 25 26 27 0  
7 8 9 16 18 26 27 28 0  
8 9 10 17 19 27 28 29 0  
9 10 18 20 28 29 0  
10 19 29 41 0  
11 12 22 30 37 0  
11 12 13 21 23 30 31 0  
12 13 14 22 24 30 31 32 0  
13 14 15 23 25 31 32 33 35 0  
14 15 16 24 26 32 33 35 36 0  
15 16 17 25 27 35 36 41 0  
16 17 18 26 28 41 0  
17 18 19 27 29 41 0  
18 19 20 28 41 0  
21 22 23 31 37 38 0  
22 23 24 30 32 37 38 39 0  
23 24 25 31 33 35 38 39 40 0  
24 25 32 34 35 36 39 40 41 0  
33 35 36 41 0  
24 25 26 32 33 34 36 0  
25 26 33 34 35 41 0  
21 30 31 38 41 0  
30 31 32 37 39 41 0  
31 32 33 38 40 41 0  
23 33 39 41 0  
20 26 27 28 29 33 34 36 37 38 39 40 0

## 9.5 Anexo 5: Teoría del escalamiento

### Teoría del escalamiento

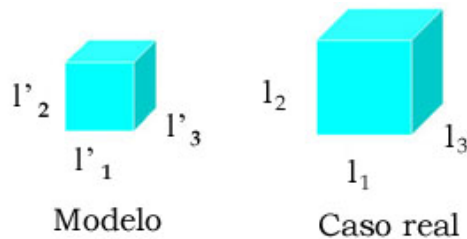
El escalamiento pretende construir modelos de menor tamaño que tengan una evolución similar al modelo natural. Para esto es necesario que exista similitud geométrica, dinámica y cinemática entre el modelo y su equivalente en la naturaleza.

Similitud Geométrica: Dos cuerpos son geoméricamente similares cuando sus correspondientes largos son proporcionales, y además los correspondientes ángulos iguales (Eisenstadt, G. et al., 1995). De esta manera, sea  $l_1$  el largo del cuerpo 1 (modelo natural) y  $l'_1$  el largo correspondiente del cuerpo 2 (modelo análogo), entonces:

$$l_1 / l'_1 = \lambda \quad (1)$$

donde  $\lambda$  es la constante de proporcionalidad de largo en ambos cuerpos. De esta forma:

$$l_1 / l'_1 = l_2 / l'_2 = l_3 / l'_3 = \lambda \quad (2)$$



$$l_1 / l'_1 = l_2 / l'_2 = l_3 / l'_3 = \lambda \quad : \text{Similitud geométrica (Vargas, 2002)}$$

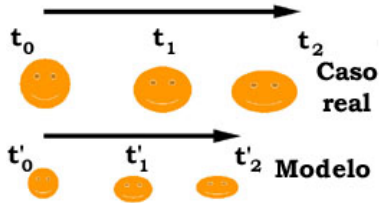
De lo anterior se puede deducir que la similitud entre dos cuerpos permite calcular la razón entre sus áreas como:

$$A_1 / A'_1 = \lambda^2 \quad (3)$$

y la de los volúmenes:

$$V_1 / V'_1 = \lambda^3 \quad (4)$$

Similitud Cinemática: Dos cuerpos tendrán similitud cinemática cuando el tiempo requerido para generar un cambio en uno de ellos es proporcional al empleado para provocar el correspondiente cambio en el otro cuerpo (Hubbert, 1937). Es decir, si a cada intervalo de tiempo, los cuerpos presentan similitud geométrica.



$$(t_2 - t_1) / (t_1 - t_0) = (t'_2 - t'_1) / (t'_1 - t'_0) = \tau \quad : \text{ Similitud dinámica (Vargas, 2002)}$$

Sea  $t_1$  el tiempo requerido en el cuerpo 1 para generar una transformación dada y  $t_2$  el necesario para el cuerpo 2. Se define la razón de tiempo  $\tau$  como (figura 5.2):

$$t_2 / t_1 = \tau$$

(5)

Ahora podemos definir sus razones de velocidad y aceleración entre ambos cuerpos:

$$\frac{v_2}{v_1} = \eta = \frac{\frac{l_2}{t_2}}{\frac{l_1}{t_1}} = \frac{\lambda}{\tau} = \lambda \cdot \tau^{-1}, \quad \frac{a_2}{a_1} = \gamma = \frac{\frac{l_2}{t_2^2}}{\frac{l_1}{t_1^2}} = \lambda \cdot \tau^{-2} \quad (7): v_2 \text{ y } v_1 \text{ representan las velocidades para el cuerpo 2 y 1 respectivamente y } \eta \text{ es la razón de velocidad. Igual razonamiento debe ser aplicado para las aceleraciones correspondientes.}$$

Similitud Dinámica: Ambos cuerpos, el real y el análogo, deben poseer la misma distribución de masa por unidad de volumen. Su razón de masas sería:

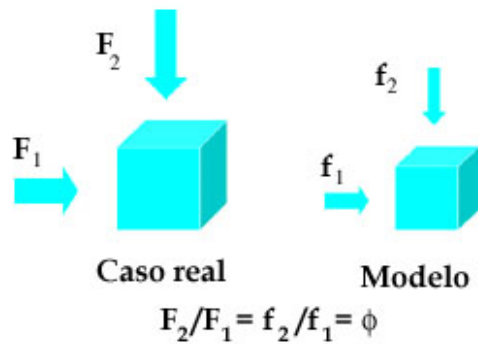
$$\frac{dm_2}{dm_1} = \mu,$$

(8)

por lo que la razón de densidad ( $\delta$ ) se da por la siguiente fórmula:

$$\delta = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\frac{dm_2}{dV_2}}{\frac{dm_1}{dV_1}} = \mu \cdot \lambda^{-3}, \quad (9): dV_2 \text{ y } dV_1 \text{ representan el volumen del cuerpo 2 y 1 respectivamente.}$$

La similitud dinámica requiere que en cada elemento de masa  $dm_2$  en un volumen  $dV_2$  del modelo las fuerzas actuantes deben ser tales que el movimiento sea geométrica y cinemáticamente similar al movimiento correspondiente de un elemento  $dm_1$  en un volumen  $dV_1$  del original. Esto se cumplirá si para cada fuerza  $F_1$  actuando en un  $dm_1$  en el original hay un correspondiente vector fuerza  $F_2$  actuando en una masa  $dm_2$  en el modelo, tal que  $F_1$  y  $F_2$  tienen la misma orientación, y la razón de sus magnitudes es constante (Vargas, 2002).



**Figura A.1.1c:** Similitud dinámica.  $\phi$  representa la razón

entre  $F_1$  y  $F_2$ , que son las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo 1 y 2 respectivamente. (Modificado de Vargas, 2002)

Por lo tanto, para que un modelo esté bien escalado es suficiente que las constantes de proporcionalidad para cada razón sean iguales tanto para el modelo real como para el modelo análogo (Martinod, 1991).