

# VERSATILIDAD DE UNA MESA PARA MODELOS ANALÓGICOS DE DEFORMACIÓN A ESCALA GEOLÓGICA

Jorge Acevedo Cabello  
jorge.acevedo.c@usach.cl

Felipe Bustos Quezada  
Natalia Conejeros Toro  
Pamela Jara Muñoz

## Resumen

En geología, la modelación análoga de la deformación tectónica es una técnica experimental que permite el estudio de procesos geológicos a través del análisis de modelos escalados espacial y temporalmente, aportando valiosos conocimientos cualitativos y cuantitativos a problemas geológicos específicos. Los primeros ensayos de modelación análoga documentados datan de principios del siglo XIX, los cuales consistían en capas de arcilla confinada en una caja sometidas a compresión lateral por el movimiento de un extremo móvil impulsado por un gato mecánico, el cual sigue siendo básicamente el mismo montaje que se usa hoy en día para simular ambientes compresivos.

En el presente trabajo se ha diseñado y construido, en las dependencias de la Universidad de Santiago de Chile, una mesa geológica de deformación análoga para modelar a escala la corteza de la tierra en diferentes escenarios geológicos, con el objetivo de ampliar la cantidad de compresiones sobre un mismo ensayo, permitir la compresión asimétrica con variabilidad angular y posibilitar la inserción de placas pivote además de adaptarse con facilidad para la realización de diversos tipos de ensayos, con el interés de permitir un vasto estudio de diferentes fenómenos geológicos.

## ABSTRACT

In geology, analogue modelling of tectonic deformation is an experimental technique used to study the geological processes through the analysis of spatially and temporarily scaled models. This technique provides valuable qualitative and quantitative information for specific geological problems. The first documented experiments using the analogue modelling technique are from the XIX century and comprised confined layers of clay in a box subjected to lateral compression using a mechanical jack. Which basically, carries on being the same set up use nowadays to model compressive tectonic environments.

In the following work, an analogue modelling table has been designed and built in the laboratories of the Universidad de Santiago de Chile, to scaled model the Earth's crust in a variety of geological scenarios in order to increase the amount of allowable compressions in the same test, allow asymmetric compression testing with angular variability and enable the option of inserting pivoting plates besides increasing the flexibility of the table to be used in different types of tests allowing a range of different phenomena to be studied.

## KEYWORDS

Diseño, mesa geológica, modelación análoga, prototipo, procesos geológicos.

## INTRODUCCIÓN

Los fenómenos geológicos, procesos tectónicos y estructurales, se producen a una escala temporal tan amplia que hacen imposible su observación directa. La mayor parte de los procesos tectónicos ocurren a lo largo de millones de años y a velocidades sumamente lentas (Yagupsky, 2009).

La reproducción de estos fenómenos por medio de modelos experimentales permite el estudio del desarrollo progresivo de estructuras geológicas. En este entorno se hace presente la modelación análoga que busca la reproducción de las estructuras geológicas reales a escala, con la finalidad de representar la evolución de la deformación en el terreno, mediante el uso de modelos y ensayos desarrollados con materiales que se asemejen a los encontrados en las formaciones naturales.

La realización de estos modelos a escala, y la construcción de diversos montajes de deformación, entregan valiosa información de las variables que influyen en las características de éstos (Jara, 2015).

Los modelos análogos han sido usados desde el siglo XIX para simular diferentes tipos de estructuras geológicas naturales. En los últimos 200 años, el desarrollo de la investigación de modelos análogos en geología ha evolucionado de manera considerable respecto a los primeros ensayos realizados. Sin embargo, las mesas geológicas de modelado continúan siendo similares, en donde una pared móvil realiza la compresión (acortamiento) o extensión del material; innovando esencialmente en tecnología para automatizar ciertos procesos y los sistemas de adquisición de datos.

La primera caja de modelado fue presentada por Sir James Hall, geólogo y geofísico escocés, a la Royal Society of Edimburgo en 1812.

El prototipo fabricado por Hall, figura 1, consistía en una caja de material confinado a escala de estratos de arcilla con compresión lateral.

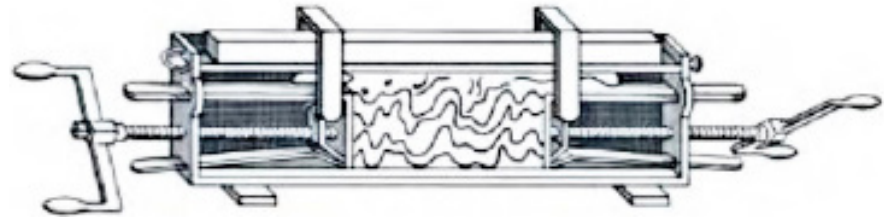


Figura 1. Caja de modelado, (Hall, 1812)

En 1893 Bailey Willis introduce nuevos modelos, figura 2, para realizar el estudio de regiones montañosas en los Montes de Apalaches. Estos experimentos incluyeron nuevos procesos de modelado, pero continuaron siendo básicamente las mismas cajas de compresión de material fabricadas por Hall.

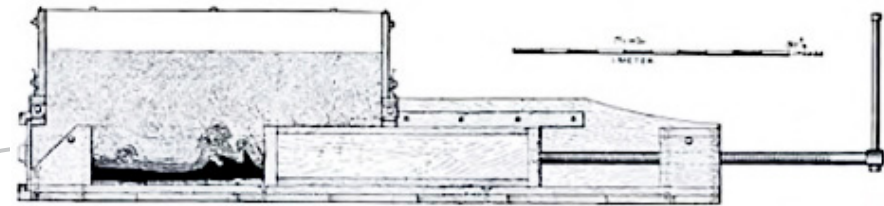


Figura 2. Caja de compresión, (Willis, 1893)

Durante las siguientes décadas el modelado análogo avanzó considerablemente. Con la aparición de nuevas tecnologías, elementos computacionales y mecánicos (figura 3), se logró un mejor entendimiento de los fenómenos que se investigan, pero aun así la técnica seguía sin cambiar.

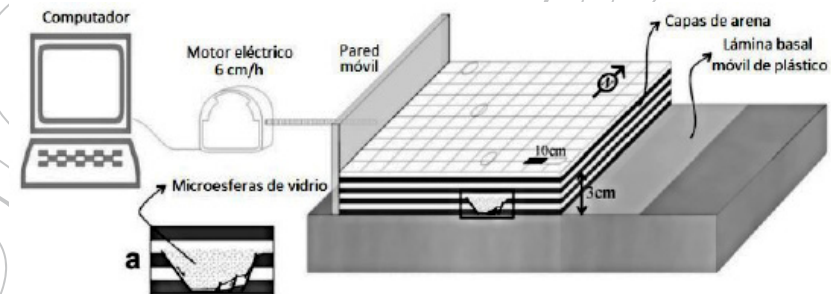


Figura 3, sistema de modelado análogo, (Yagupsky, y otros, 2008)

Basado en el funcionamiento de los primeros prototipos, este trabajo se centra en el diseño,

cálculo y fabricación de un prototipo para modelación análoga teniendo en cuenta la necesidad de una mesa que permita el montaje de ensayos tanto confinados como libres y con compresiones de material simultáneo en diferentes direcciones. De esta manera se busca dar solución a las limitaciones de los prototipos ya existentes y permitir el estudio de fenómenos que requieran una mayor complejidad de experimentación. La implementación de este prototipo forma parte del Laboratorio de Modelación Analógica del Departamento de Ingeniería en Minas de la Universidad de Santiago de Chile, a cargo de la académica Dra. Pamela Jara; y cuyo desarrollo fue parte del proyecto DICYT 051615JM (Jara, 2015).

## MÉTODO EXPERIMENTAL

Dentro del desarrollo de los ensayos geológicos, el principal método utilizado consiste en la compresión unidireccional constante de material confinado en una caja de madera con una placa móvil que realiza la compresión. Una de las limitaciones de este consiste en el planteamiento de configuraciones estructurales simplificadas que no abarca la complejidad del sistema estudiado.

Actualmente, para la realización de diferentes ensayos se utilizan diversos motores eléctricos los cuales, acompañados de reductores y/o sistemas de control ejecutan la compresión unidireccional constante y controlan los parámetros de importancia, otorgando mayor precisión al modelo análogo.

El diseño propuesto para el prototipo de mesa de modelación cuenta con cuatro componentes principales: un servomotor con sistema de control integrado, mesa de ensayos para los modelos, carro de desplazamiento para el servomotor, y, por último, un sistema de movimiento de material accionado por el servomotor y encargado de realizar las compresiones de los modelos. La mesa de modelación además cuenta con un recipiente para descarga de material.

El diseño de los diferentes elementos mecánicos de esta propuesta se realiza en base a la teoría resistencia de materiales, utilizando cálculos analíticos con su comprobación mediante el uso de herramientas computacionales.

## MODELOS MATEMÁTICOS

Las condiciones de contorno se identifican y establecen dentro de las cuales se desarrolla el diseño y cálculo del prototipo. Los parámetros que rigen el diseño son:

A.- Fuerza de compresión, corresponde a la fuerza necesaria para lograr el avance de la placa compresora sobre el modelo escalado.

B.- Velocidad de rotación del motor, corresponde a la velocidad a la que debe funcionar el motor para lograr la velocidad lineal necesaria para el avance según los requerimientos de tiempo.

El cálculo de la fuerza de compresión necesaria se obtiene realizando el experimento de compresión de arena húmeda confinada, figura 4, con un modelo de dimensión 50x50x10 cm, establecido como el modelo de máximo tamaño a utilizarse en el laboratorio (Jara, 2015). De este experimento se obtiene la fuerza neta en (N) versus al avance en (cm) de compresión del material.

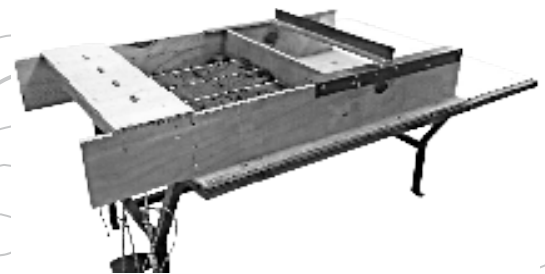


Figura 4. Ensayo de compresión. (Bustos, F; Conejeros N; 2016)

La compresión en este ensayo es realizada por contrapesos de diferentes masas y se relaciona con la fuerza de compresión mediante la segunda ley de Newton:

$$F = m \cdot a$$

En el gráfico 1 se observa la relación lineal existente entre el avance de la placa que comprime el material y la fuerza neta aplicada.

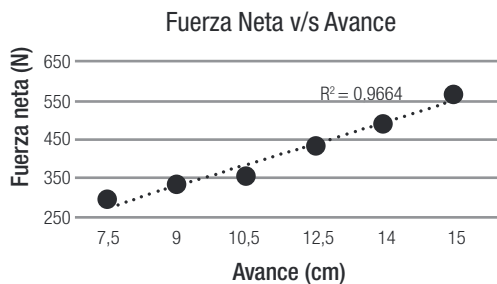


Gráfico 1. Fuerza de compresión versus avance. (Bustos, F; Conejeros N; 2016)

La fuerza máxima de compresión se establece como un 10% más de la máxima fuerza obtenida en el ensayo. En la tabla 1 se exponen los parámetros establecidos para el dimensionamiento de la mesa.

Parámetro	Valor	Unidad
Fuerza máxima de compresión	650	N
Tiempo máximo de compresión	3600	s
Área máxima del modelo	0,25	m <sup>2</sup>

Tabla 1. Parámetros de diseño

## Métodos de diseño

El diseño de la mesa de modelación análoga, al igual que sus componentes, se divide en cuatro partes principales:

- Mesa de ensayo

La estructura primaria corresponde a la mesa de ensayos, sobre la cual se realizan los modelos. Esta mesa tiene dimensiones de 100x100x75 cm y su fabricación es de acero ASTM A36, el cual otorga rigidez y suprime posibles vibraciones al momento de experimentar.

La mesa cuenta en dos de sus costados con tres filas de nueve perforaciones pasantes sobre la cubierta con la finalidad de permitir la instalación de placas pivote. La mesa de ensayos ha sido anclada al piso del laboratorio mediante pernos de expansión.

A la mesa en uno de sus extremos se le incorpora un sistema de descarga fabricado en acero AISI 304 con la sola finalidad de facilitar la limpieza de la superficie una vez terminado los ensayos.

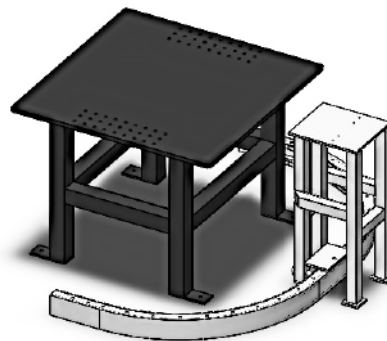


Figura 5. Mesa de ensayos, carro de desplazamiento para servomotor y riel de desplazamiento. (Bustos, F; Conejeros N; 2016).

- Carro de desplazamiento para servomotor y riel de desplazamiento

La segunda estructura de acero ASTM A36 en el diseño, corresponde a un perfil canal el cual ha sido cilindrado en forma de C. Este perfil tiene como finalidad ejercer la función de riel guía sobre el carro que contiene el servomotor, acotar el rango de ubicación evitando un mal posicionamiento y permitir la ubicación del servomotor en un ángulo de 0 a 180°.

Además otorga sujeción al piso al momento de experimentar, ya que cuenta en su lado superior con 27 perforaciones, igualmente espaciadas, que permiten fijar el carro impidiendo un volcamiento producto de fuerzas de reacción sobre el servomotor. El riel, al igual que la mesa de ensayos, ha sido anclado al piso mediante pernos de expansión.

Por último, el diseño incluye la última estructura en ASTM A36, el carro de desplazamiento. Este carro de dimensiones 34x30x77 cm es la plataforma base sobre la cual se monta el servomotor. En su parte inferior tiene ruedas que permiten mantener el carro dentro del riel y asegurar su desplazamiento dentro de éste. Sobre las ruedas se encuentra una placa de acero con una perforación en el centro, con la cual se realiza la fijación del carro al riel en cualquiera de las 27 posiciones preestablecidas. La fijación se realiza manualmente con un perno de 1/2" antes de cualquier experimentación.



- Sistema de movimiento de material

El sistema de movimiento de material, figura 6, es un conjunto mecánico que complementa el funcionamiento del servomotor. Dentro de sus componentes se encuentra un tornillo sinfín, bujes, placas de soporte y fijación, guías de acero plata y guías de SAE 1040, ver figura 8.

El principal componente del sistema es el tornillo de potencia o sinfín, cuyo cálculo y diseño requiere un estudio más detallado.

Mediante análisis de elementos finitos, figura 7, se realiza un estudio de esfuerzos sobre el sistema de movimiento para los casos en los cuales se verá sometido a máxima carga. Los resultados obtenidos garantizan un correcto desempeño del sistema.

- Diseño de tornillo sinfín

Los tornillos sinfín son utilizados para transformar movimientos de rotación en movimientos lineales. Para realizar el movimiento de material, el tornillo sinfín es considerado como un tornillo de potencia, ya que estos tienen como ventaja mecánica la transmisión de potencia para generar desplazamiento de cargas. Este consta de dos piezas, un tornillo y una tuerca.

Para el conjunto tornillo-tuerca se selecciona una rosca del tipo ACME (sección trapezoidal) asegurando un buen ajuste entre ambas piezas. Presenta una elevada eficiencia en comparación a otros tipos de rosca.

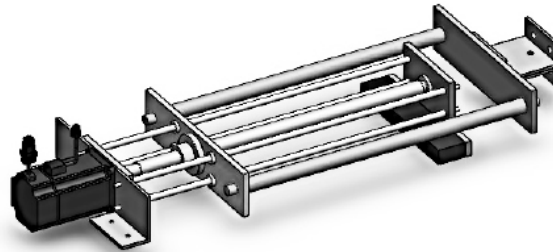


Figura 6. Tornillo de potencia (Bustos, F; Conejeros N; 2016)

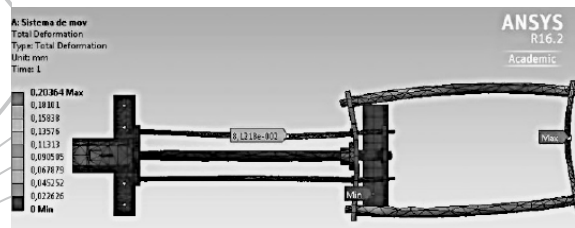


Figura 7. Simulación numérica tornillo de potencia (Bustos, F; Conejeros N; 2016)

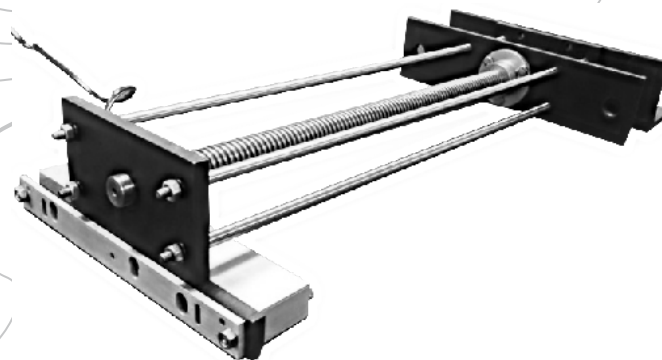


Figura 8. Tornillo de potencia, buje, placas y guías (Bustos, F; Conejeros N; 2016)

Para el tornillo se utiliza acero SAE 1045 y para la tuerca bronce fosfórico SAE 660. Estos materiales disminuyen los efectos de rozamiento obteniendo mejor resistencia al desgaste.

El torque necesario para realizar el desplazamiento de una carga, es el principal parámetro para el diseño del tornillo de potencia, el cual se calcula con la ecuación 1.

$$T = \frac{F \cdot D_p}{2} \cdot \left( \frac{1 + (\pi \cdot \mu \cdot D_p \cdot \sec \alpha)}{(\pi \cdot D_p) - (\mu \cdot p \cdot \sec \alpha)} \right)$$

Donde:

F: Carga axial aplicada.

$D_p$ : Diámetro primitivo de la rosca.

$\mu$ : Coeficiente de fricción entre el tornillo y la tuerca.

p: Avance del tornillo.

$\alpha$ : Ángulo de la rosca.

- Diseño de piezas anexas al sistema

Para la fijación del tornillo de potencia se seleccionan placas de acero estructural ASTM A36 de 10 mm de espesor. A su vez los extremos del tornillo están descansando en bujes de bronce fosfórico SAE 660. Para asegurar la transmisión de movimiento se utiliza un acople de acero SAE 1020 que genera la unión entre tornillo y el eje del servomotor.

Para guiar el movimiento de material se opta por guías de acero plata el cual es un material comúnmente utilizado en instrumentos de precisión y medición. Como último componente del sistema de movimiento se incluye un electroimán de 272 kilos de retención, con el cual se fija el sistema de movimientos a la mesa de ensayos antes de realizar cualquier tipo de experimentación, así en torno a la mesa de ensayos se puede fijar el servomotor, en un rango de movimiento de 0 a 180°, otorgando libertad para la realización de compresiones de material en diferentes direcciones, ver figura 9.

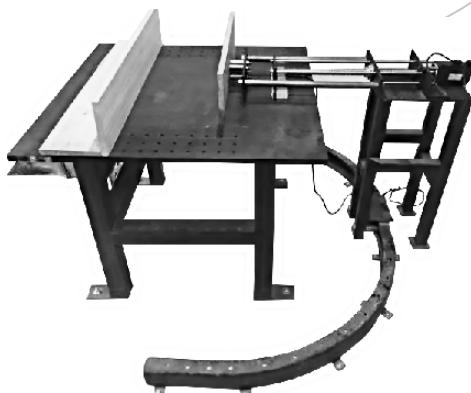


Figura 9. Mesa de modelación con todos sus componentes preparada para un ensayo. (Villarroel, 2017)

- Servomotor

Para el motor se opta por un servomotor con sistema de control integrado con la finalidad de disminuir las discontinuidades y errores que provoca la lectura de datos en un motor convencional provisto con reductores de velocidad.

Para la elección se debe cumplir que el torque utilizado para el dimensionamiento del tornillo de potencia debe ser menor al torque nominal del servomotor.

Para el dimensionamiento se utiliza un perfil de torques.

Este consta en un ciclo de trabajo con una duración correspondiente al parámetro de diseño de la mesa geológica y muestra cómo se comporta el torque durante dicho ciclo.

La forma de cuantificar el torque en el ciclo de trabajo se denomina torque RMS, y corresponde a la media cuadrática del torque en el ciclo de trabajo y su valor debe ser menor al torque nominal del servomotor.

En el gráfico 2 se observa el perfil de torque para el servomotor seleccionado. En la tabla 2, se observan las características técnicas del servomotor.

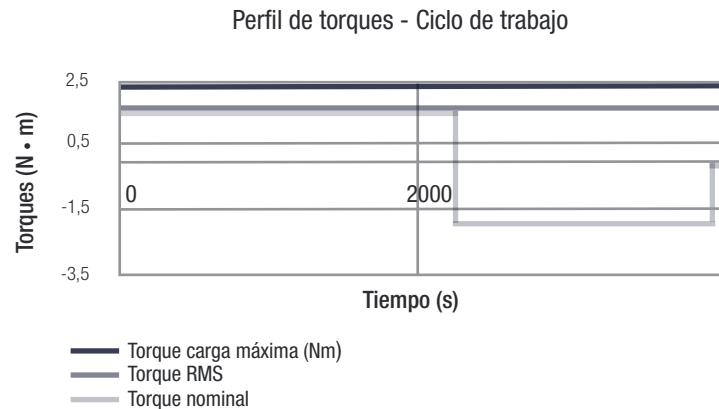


Gráfico 2. Perfil de torques versus ciclo de trabajo (Bustos, F; Conejeros N;2016)

Marca	Schneider Electric
Potencia (Kw)	0,75
Tensión de alimentación (v)	220
Torque nominal (Nm)	2,39
Velocidad rotacional nominal (RPM)	3000

Tabla 2. Especificaciones técnicas servomotor

- Resultados Experimentales

En los primeros ensayos realizados con la mesa de modelación análoga se logran avances continuos y sin vibraciones por parte del sistema de movimiento observándose los cambios en la estructura de las probetas ensayadas.

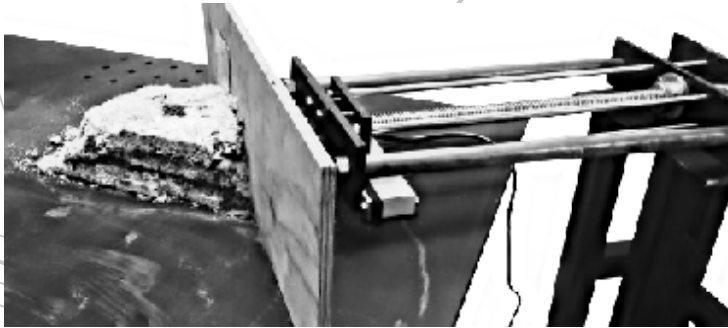


Figura 10. Primeros ensayos de testeo (Bustos, F; Conejeros N; 2016)

Tras el testeo de la mesa, se han desarrollado, en aproximadamente 1 año de uso, unos 20 test o modelos geológicos que permiten recabar información respecto del control que ejercen ciertos factores en el control estructural de regiones de la corteza terrestre. Los resultados de estos ensayos ya han sido publicados, o expuestos en el XV Congreso Geológico Chileno (Jara, y otros, 2018); (Villarroel, M.; Jara, P., 2018); (J. Ulloa; P. Jara, 2018), el cual es el evento más importante que convoca a estos profesionales de las Ciencias de la Tierra en Chile, lo que demuestra el aporte de este espacio de modelación para la productividad en esta importante área de estudio, ver figuras 11 y 12.



Figura 11. Esquema de montaje experimental y fotografía de desarrollo de experiencia de modelación análoga (Villarroel, 2017)

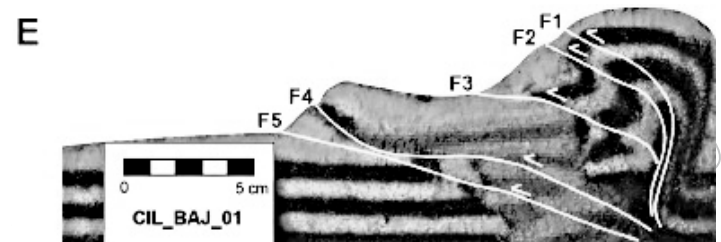
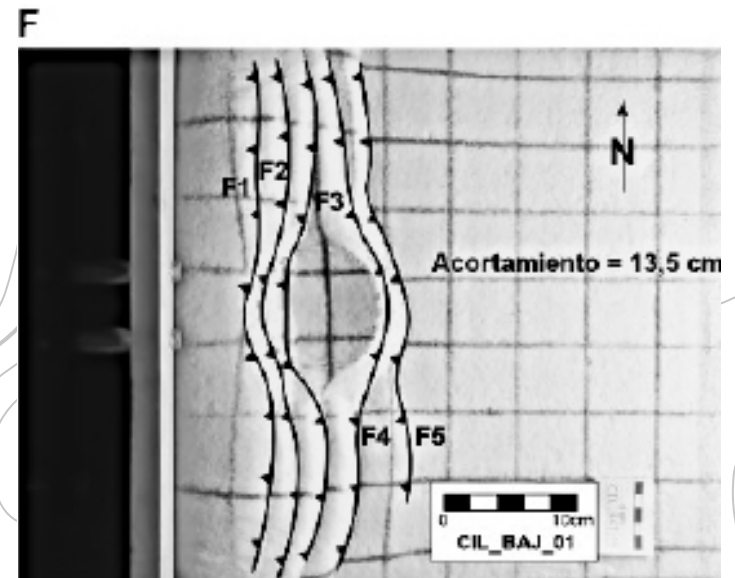


Figura 12. Resultados en planta y perfil (Villarroel, 2017)

## Conclusiones

De los resultados obtenidos de las experimentaciones se destaca el correcto funcionamiento del prototipo y el impacto que ha generado un laboratorio de estas características dentro de las dependencias de la universidad. En este aspecto, la modelación análoga cumple un rol social fundamental, diversos estudios (Jara, y otros, 2016); (Jara, y otros, 2017) muestran evidencias de las implicancias didácticas que tiene esta metodología en la visualización espacial y de escala temporal de los procesos geológicos, por lo que su uso en docencia está ampliamente documentado para facilitar la comprensión de estos procesos. En particular, para los(as) estudiantes de ingeniería, se destaca la importancia de la comprensión de los procesos y elementos geológicos (Jara, y otros, 2016) para la toma de decisiones ingenieriles (construcciones de puentes, túneles, caminos, etc., o planificación territorial). La importancia de las estructuras geológicas de deformación radica en que corresponden a un factor fundamental a ser considerado en obras civiles, entre otras cosas, para disminuir los riesgos asociados tanto al medio ambiente, como a las personas y el futuro de la obra; por lo que su comprensión facilitará una respuesta responsable por parte de los futuros expertos que trabajen con los materiales terrestres, en donde la modelación análoga enriquece su formación profesional (Jara, y otros, 2017).

## Agradecimientos

Agradecemos al departamento de Ingeniería Mecánica y principalmente a DICYT, al proyecto 051615JM dentro del cual se desarrolló este trabajo investigativo a cargo de la Doctora Pamela Jara. Agradecemos por último al personal técnico del Departamento de Ingeniería Mecánica, área de Procesos Mecánicos, en especial a don Sergio Jaque por hacer posible la fabricación de todas las partes de este trabajo en dependencias de la Universidad de Santiago de Chile.

## Referencias

- Bustos, F.; Conejeros N.;. 2016. Diseño y construcción de una mesa geológica análoga de deformación. s.l. : Universidad de Santiago de Chile, 2016.
- Hall, J. 1812. Account of a series of experiments, shewing the effects of compression in modifying the action of heat. s.l. : Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1812.
- Jara, P. 2015. Formulario Proyectos DICYT Concurso 2016. Santiago de Chile: s.n., 2015.
- Jara, P., Pinto, M. y Bécar, K. 2016. Modelación análoga como herramienta para el aprendizaje en ciencias: Experiencia en geología estructural. s.l. : Congreso de Innovación, Tecnología y Aprendizaje (INTEA 2016). Universidad de Santiago de Chile., 2016.
- Jara, P., y otros. 2017. Visualización espacial y escala temporal: experiencia a través de modelación análoga con estudiantes de ingeniería. Actas XX Congreso Geológico Argentino. : s.n., 2017.
- Jara, P y otros., y. 2018. Closure type effects on the structural pattern of an inverted extensional basin of variable width: Results from analogue models. s.l. : Journal of South American Earth Sciences. Vol 87, 2018.
- J. Ulloa; P. Jara. 2018. Efectos de las propiedades mecánicas de un backstop en la deformación de una cuña de acreción, resultados a partir de modelación análoga. s.l. : Actas XV Congreso Geológico Chileno. Concepción, Chile., 2018.
- Villarroel, M. 2017. Influencia de la presencia de cuerpos cohesivos en la evolución estructural de un sistema compresivo: aproximaciones desde la modelación análoga. s.l. : Universidad Andrés Bello, 2017.
- Villarroel, M.; Jara, P. 2018. Influencia de la presencia de cuerpos cohesivos en la evolución estructural de un sistema compresivo: aproximaciones desde la modelación análoga. s.l. : XV Congreso Geológico Chileno, Concepción., 2018.
- Willis, B. 1893. The mechanics of Appalachian structure. s.l. : United States Geological Survey Annual Report 13 (Part 2), 1893.
- Yagupsky, D. 2009. Metodología para el estudio de sistemas compresivos y de sus controles estructurales. Buenos Aires : s.n., 2009.
- Yagupsky, D. y otros., y. 2008. Oblique half-graben inversion of the Mesozoic Neuquén Rift in the Malargüe Fold and Thrust belt, Mendoza, Argentina: New insights from analogue models. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2008.
- —. 1815. On the vertical position and convolutions of certain strata and their relationship with granite. s.l. : Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1815.