

A2.10 Modelización Analógica

La modelización analógica intenta reproducir un sistema natural a una escala reducida. Para representar la litosfera se utilizan diversos materiales. En general para representar la parte frágil se utiliza arena y la parte dúctil se representa por silicona material viscoso con comportamiento newtoniano.

La gran mayoría de los estudios de modelización analógica de inversión se refieren al caso de la inversión positiva en la que se produce la reactivación de fallas normales.

Se han realizado diversos modelos en los cuales se reactiva una estructura normal rígida previamente inducida, de modo que se tiene el bloque basal de la falla es rígido e indeformable que representaría el basamento. En el caso de generación de fallas lítricas, planares o lítrica con un sistema de plano/rampla (McClay, 1989; McClay y White, 1995; Buchanan y McClay, 1991; Keller y McClay, 1995; Yamada y McClay, 2003), la extensión es ortogonal a las fallas previas y crea estructuras asociadas a la base del modelo. La compresión genera reactivación de los niveles de despegue, formación de nuevas fallas inversas y estructuras de short cut. Cuando se tiene una falla lítrica con un sistema de plano/rampla se observa reactivación sólo en la parte inferior (Fig. A2.21).

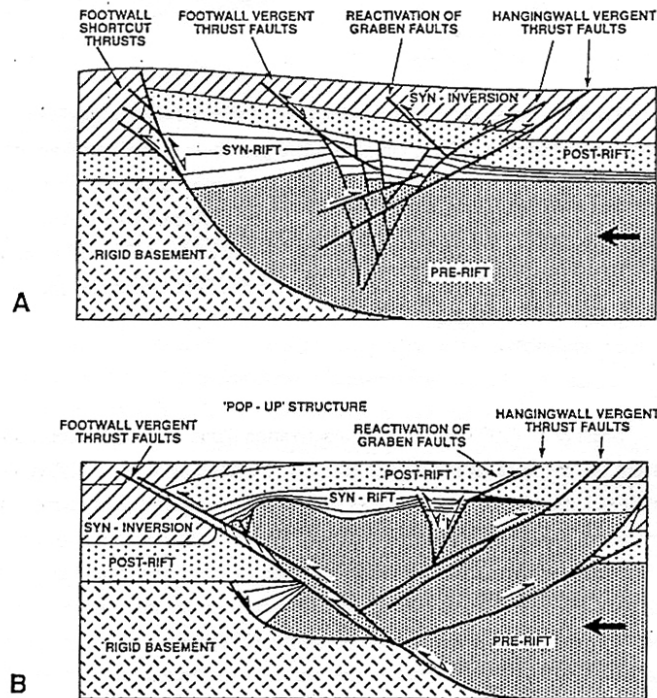


Fig.A2.21: Sección esquemática modelación de inversión, (A) muestra la reactivación de una falla lítrica y (B) indica la reactivación parcial de una compleja falla lítrica con plano y rampla. (Mc Clay y Buchanan, 1992)

Mientras que en el caso de un bloque rígido rotado (Koopman et al., 1987) o una serie de bloques tipo dominó (Buchanan y McClay, 1992; Mitra, 1993; Vially et al., 1994, Roure y Coletta, 1996); la reactivación esta fuertemente influenciada por el movimiento forzado del bloque rígido. Se produce reactivación de las fallas normales y la creación de pequeñas fallas inversas utilizando las fallas normales antiguas.

En estos experimentos el bloque colgante deformable de la falla se ha hecho de arena, arcilla, mica o mezcla de materiales (Fig. A2.22).

Si se intercala una lámina de silicona entre el basamento rígido y el bloque colgante de arena, la deformación puede ser absorbida por la silicona sin que la arena se fracture, sólo se deforma. El corte oblicuo del bloque fijo para producir las estructuras normales favorecerá la reactivación (Richard y Cobbold, 1990).

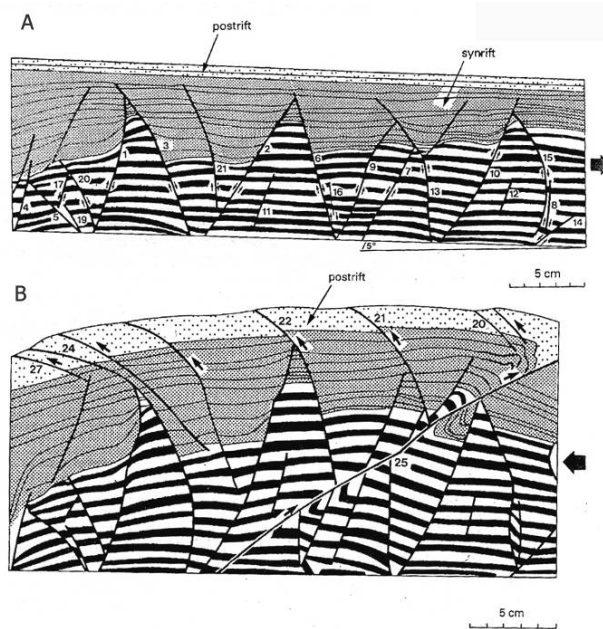


Fig. A2.22: Sección esquemática modelación de inversión con capas de arena y mica. (A) corresponde a la extensión la cual se realiza sobre un nivel de despegue cuya una pendiente es de 5°. (B) indica la compresión con un nivel de despegue horizontal, las fallas 22 y 25 corresponden a fallas inversas nuevas, mientras que el resto, son producto de la reactivación de las fallas normales de bajo ángulo. (McClay, 1989)

En otros modelos se han dejado libre ambos bloques y el fallamiento se inicia por una discontinuidad de velocidad DV localizada en la base del modelo, la que es generada por una placa basal móvil. (Malavielle, 1984; Balé, 1986; Allemand et al., 1989; Ballard, 1989).

Esta configuración ha sido utilizada tanto en extensión, como en compresión con diferentes ángulos de oblicuidad en ambos casos (Nalpas y Brun, 1993; Eisenstadt y Withjack, 1995; Nalpas et al., 1995; Brun y Nalpas, 1996; Keep y McClay, 1997; Dubois et al, 2002; Panien et al., 2005).

En estudios de inversión coaxial con arcilla hidratada se analiza como varía la geometría de pliegues y fallas con el incremento de la compresión. En la extensión se genera un hemigraben, en el cual se simula sedimentación adicionando arcilla. El acortamiento al comienzo es acomodado por la reactivación de las fallas normales a inversas. Posteriormente las fallas normales reactivadas son cortadas por nuevas fallas inversas de bajo ángulo (Eisenstadt y Withjack, 1995) (Fig A2.23).

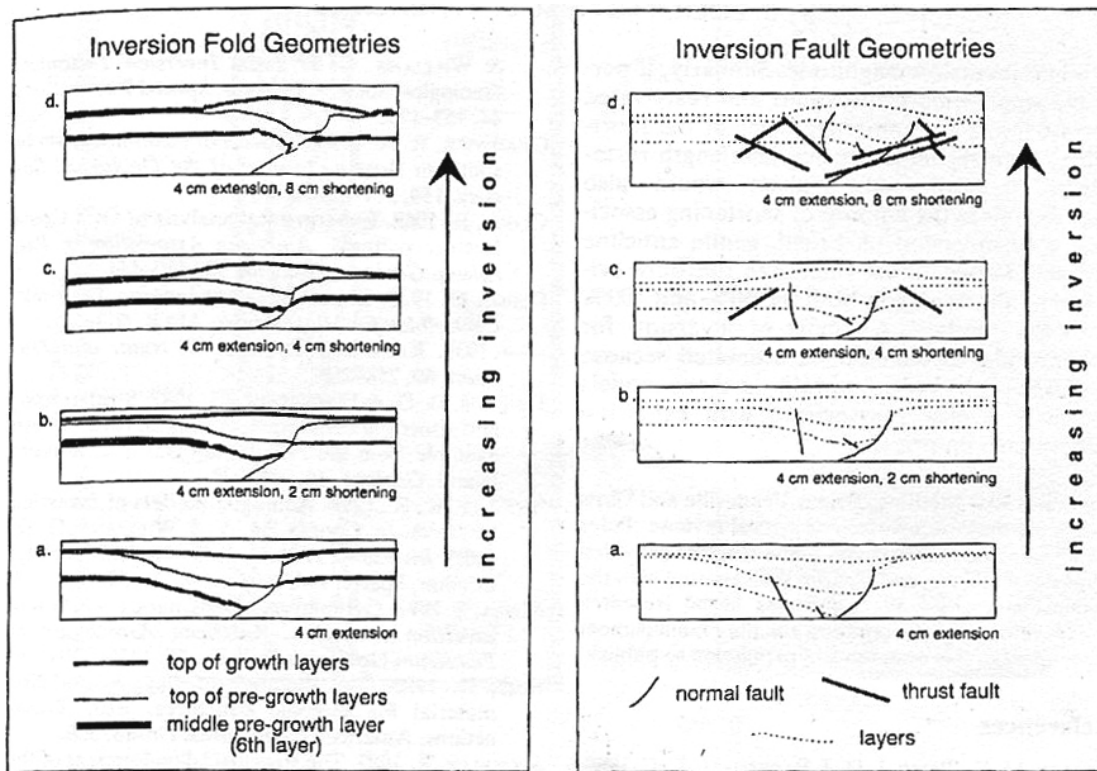


Fig.A2.23: Diagrama del cambio de la geometría de la deformación con el aumento de la inversión (Eisenstadt y Withjack, 1995).

También ha sido efecto de la oblicuidad entre la dirección de acortamiento y el eje del graben, utilizando capas de material frágil y dúctil, donde la sedimentación se representa rellenando la cuenca con arena de manera syn y post extensional (previa compresión). Estos estudios indican que el ángulo de oblicuidad debe ser menor a 45° para que se produzca la inversión y reactivación de las fallas normales, con un ángulo óptimo de 30° . Con un ángulo mayor a 45° el acortamiento es acomodado por fallas inversas, mientras que si es menor, se produce particionamiento con reactivación de fallas normales como inversas y de rumbo (Nalpas et al., 1995; Brun y Nalpas, 1996; Del Ventistte et al., 2006). La capa dúctil de silicona actuará como nivel de despegue entre el basamento y los sedimentos, la que puede ser extruída en forma de diapiros. La reactivación de las fallas se ve disminuida con el aumento de la sedimentación de material frágil syn y post extensión e induciría una variación en la orientación y partición de la deformación. (Nalpas y Brun, 1993; Nalpas et al., 1995; Brun y Nalpas, 1996; Dubois et al, 2002) (Fig. A2.24 y Fig. A2.25).

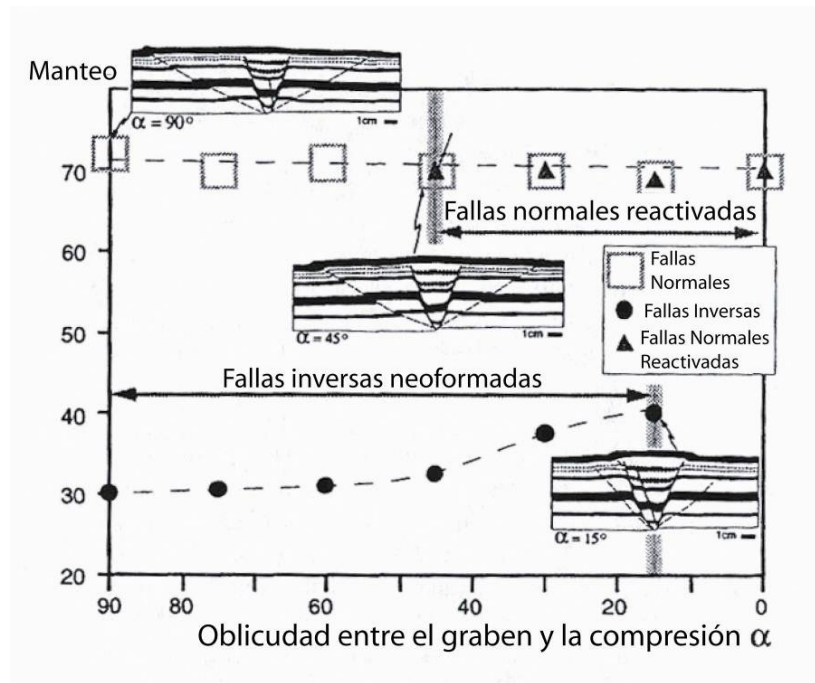


Fig. A2.24: Digrama del manto de las fallas normales e inversas en función de la oblicuidad α entre el graben formado en extensión y la dirección compresión en un sistema frágil. Secciones para $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ y $\alpha = 15^\circ$.

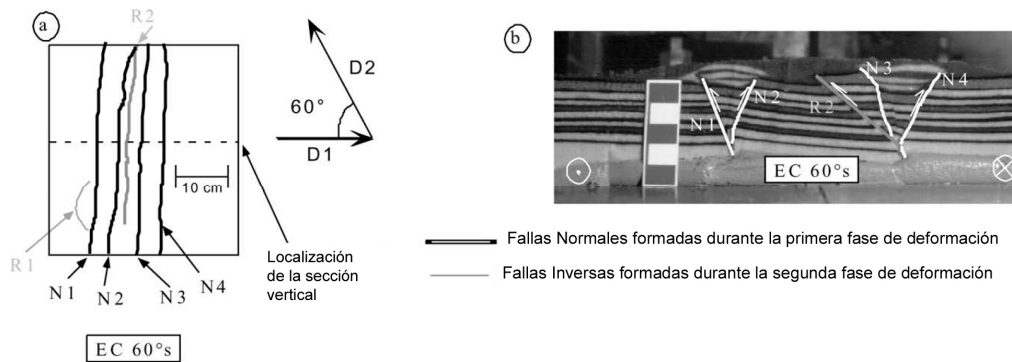


Fig. A2.25: Vista en superficie (a) y sección (b) de un modelo de inversión con extensión perpendicular, compresión de 60° con respecto a la dirección de extensión y sedimentación post-extensión. N1, N2, N3 y N4 corresponden a fallas normales generadas durante la extensión, donde N1, N2 y N4 son invertidas durante la compresión. Por su parte, R1 y R2 corresponden a fallas inversas nuevas generadas durante la compresión. (Dubois et al, 2002)

En el caso de que el graben sea llenado en el período syn y post extensión con material frágil (cuazo y corindón) intercalado con una microcapa de material granular más débil con un ángulo de fricción interna bajo, simulando rocas débiles sobrepresionadas como las lutita. La reactivación de las fallas normales es limitada, generándose cabalgamientos y retrocabalgamientos que cortan el graben y acomodan el acortamiento. Las fallas normales

preexistentes y la posición de la microcapa representan zonas de debilidad que ejercen un control en la localización y orientación las fallas inversas (Panien et al., 2005) (Fig. A2.26).

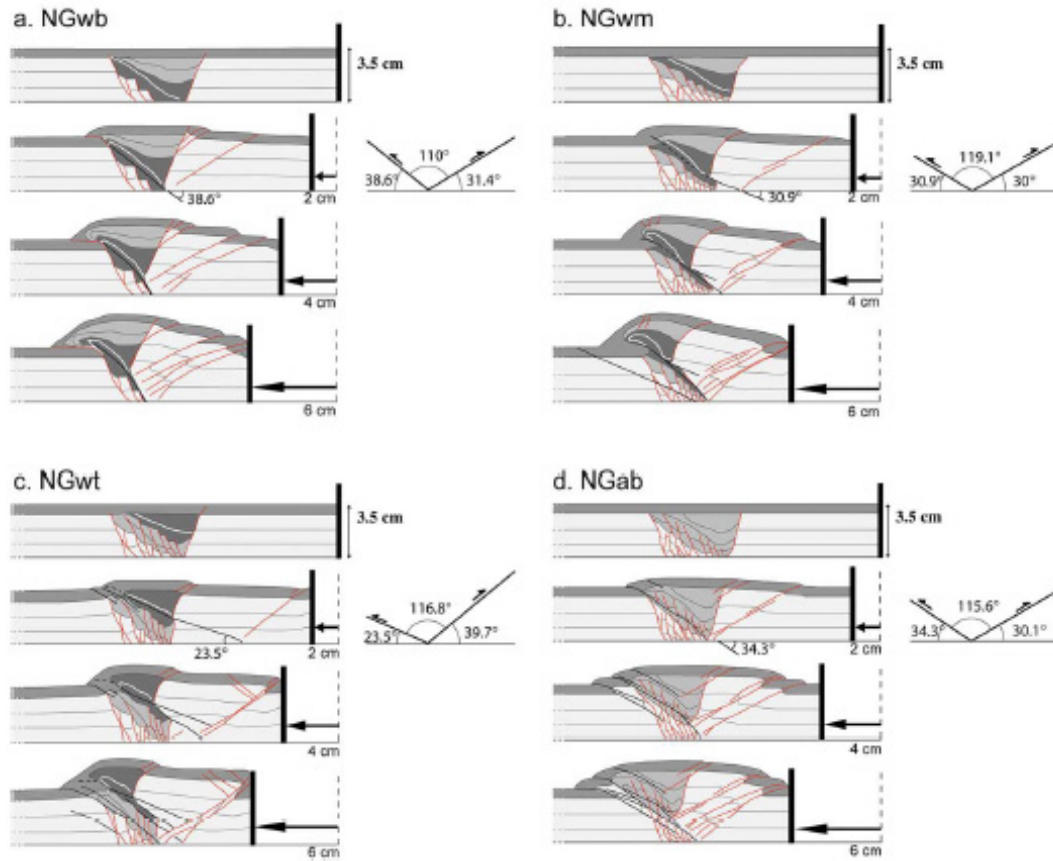


Fig. A2.26: Vista en perfil de experimentos con un graben en dirección normal a la compresión (NG), se puede ver la evolución con cuatro estados de acortamiento. En el caso de (a) (NGwb), el graben es llenado con una microcapa de material frágil débil la base, en (b) (NGwm), la microcapa está al medio y en (c) (NGwt) en la cima. En (d) (Ngab) el graben fue llenado solamente con material frágil fuerte (cuarzo y corindón). La microcapa débil está representada por la línea blanca, mientras que las líneas negras representan los cabalgamientos y rojas muestran retrocabalgamientos (Panien et al., 2005).

ANEXO 3: TEORÍA DEL ESCALAMIENTO

A3.1 Condición de similitud

A3.1.1 Analogía Geométrica

Dos cuerpos son geoméricamente similares cuando todos sus correspondientes largos y ángulos en ambos cuerpos son iguales. Así L representa la longitud en el caso real, l representa el parámetro espacial del modelo y se determina la es la constante de proporcionalidad L^* que debe ser mantenida para construir un modelo correctamente escalado (Fig. A3.1).

Con esta constante es posible definir también definir la razón entre las áreas y los volúmenes como ($A^* = L^{*2}$) y ($V^* = L^{*3}$), respectivamente.

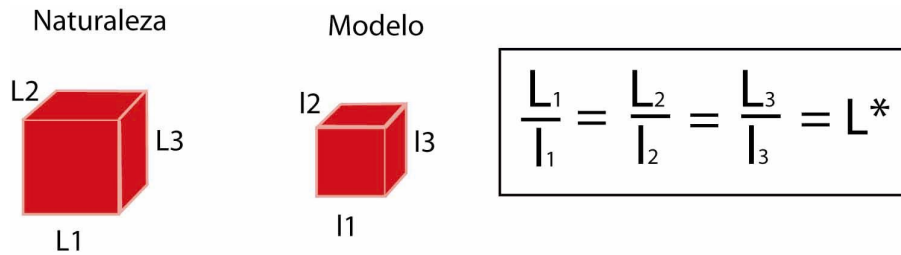


Fig. A3.1: Analogía geométrica, esquema de la constante de proporcionalidad de longitud L^* (Vargas, 2001).

A3.1.2 Analogía Cinemática

Gubert en 1937, define que existirá una analogía cinemática cuando el tiempo requerido para generar un cambio en un cuerpo es proporcional al tiempo empleado en el correspondiente cambio en el otro cuerpo. Es decir, una analogía cinemática implica que cada intervalo de tiempo representan analogía geométrica (Fig. A3.2).

La razón de tiempo de proporcionalidad T^* , se define con T que representa el tiempo en el caso real y t el tiempo en el caso del modelo y a partir de ésta, se definen analogías de velocidad ($v^* = L^*/T^*$) y aceleración ($a^* = v^*/T^*$), con sus correspondientes proporciones.

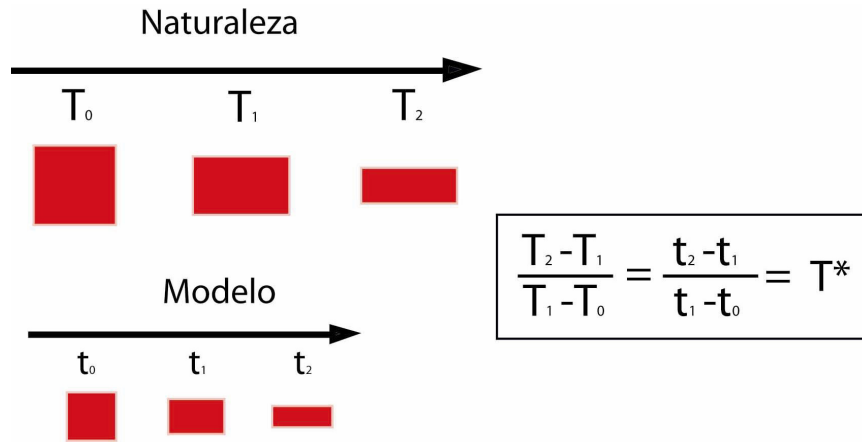


Fig. A3.2: Analogía cinemática, esquema de la constante de proporcionalidad de tiempo T^* (Vargas, 2001).

A3.1.3 Analogía dinámica

Para obtener analogía dinámica es necesario, determinar la analogía de masas entre el modelo y el cuerpo real, de modo que posean igual distribución de masas por unidad de volumen. En forma directa es posible definir la razón de densidades (δ), que debe mantenerse constante para ambos cuerpos. La analogía dinámica requiere que el elemento de masa (dM) en el volumen (dV) del modelo deben similares al del caso real, de modo que el movimiento sea geométrica y cinemáticamente análogo:

$$\frac{dM_{\text{nat}}}{dM_{\text{mod}}} = M^* \quad \delta = \frac{\rho_{\text{nat}}}{\rho_{\text{mod}}} = \frac{dM_{\text{nat}}}{dV_{\text{nat}}} \times \frac{dV_{\text{mod}}}{dM_{\text{mod}}} = M^* L^{*-3}$$

Esto se cumple si para cada vector fuerza (F) actuando en una masa (dM) en la naturaleza, existe el correspondiente vector de fuerza actuando sobre un modelo, de modo que ambos vectores tienen la misma orientación y la razón de sus magnitudes es constante (Vargas, 2001) (Fig. A3.3).

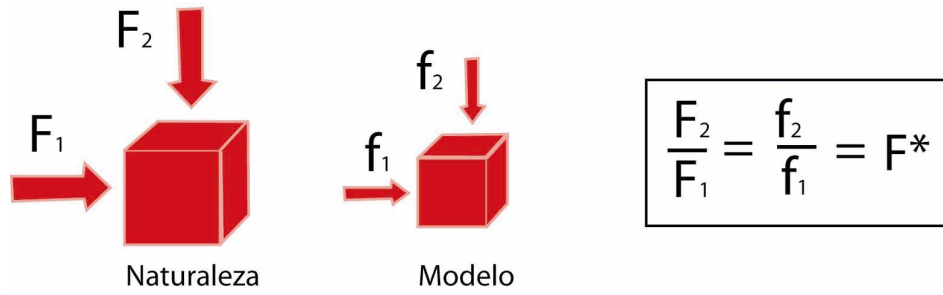


Fig. A3.3: Analogía dinámica, esquema de la constante de proporcionalidad de fuerza F^* (Vargas, 2001).

Si las fuerzas de gravedad (F_g), presión (F_p), resistencia viscosa (F_r), elasticidad (F_e) e inercial (F_i) que actuando en un dM, contenido en un V, entonces se cumple que:

$$\frac{F_{nat}}{F_{mod}} = \frac{F_{gnat}}{F_{gmod}} = \frac{F_{pnat}}{F_{pmod}} = \frac{F_{rnat}}{F_{rmod}} = \frac{F_{inat}}{F_{imod}} = F^*$$

Luego, para que un modelo esté bien escalado es suficiente que los valores adimensionales que intervienen en la experiencia sean iguales a los observados en la naturaleza (Martinod, 1991).

Considerando la la fuerza en la vertical (F_2) como el estrés (σ) asociado a la gravedad y la fuerza horizontal (F_1) como aquella relacionada la viscosidad (μ) y la tasa de deformación(ϵ), se tiene que:

$$F_2 = \sigma = \rho gh \quad \text{y} \quad F_1 = \sigma = \mu \epsilon; \quad F_2/F_1 = \rho gh / \mu \epsilon \cong \rho g h t / \mu; \quad \text{con } \epsilon \rightarrow (dh/h)/t$$

Manteniendo la analogía dinámica se tiene:

$$\frac{t_{nat} \rho_{nat} g_{nat} h_{nat}}{\mu_{nat}} = \frac{t_{mod} \rho_{mod} g_{mod} h_{mod}}{\mu_{mod}}, \quad \text{con } g = g_{nat} = g_{mod}$$

Despejando el tiempo de modelamiento t_{mod} :

$$t_{mod} = \frac{\mu_{mod} \rho_{nat} h_{nat} t_{nat}}{\mu_{nat} \rho_{mod} h_{mod}}$$

De donde se puede calcular la velocidad de deformación en el modelo v_{mod} :

$$v_{mod} = \frac{\mu_{nat} \rho_{mod} h_{mod}^2 v_{nat}}{\mu_{mod} \rho_{nat} h_{nat}^2}$$