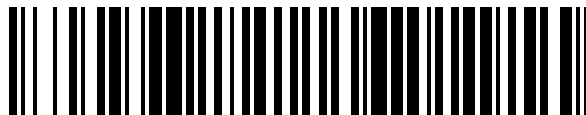


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **1 301 319**

21 Número de solicitud: 202330282

51 Int. Cl.:

G01N 3/24

(2006.01)

12

SOLICITUD DE MODELO DE UTILIDAD

U

22 Fecha de presentación:

22.02.2023

43 Fecha de publicación de la solicitud:

30.06.2023

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE
COMPOSTELA (100.0%)
Avda das Ciencias 6 4D
15782 Santiago de Compostela (A Coruña) ES**

72 Inventor/es:

**ORTIZ SANZ, Juan Pedro;
NÚÑEZ TEMES, Carlos;
ARZA GARCÍA, Marcos;
GIL DOCAMPO, María de la Luz y
CASTRO PONTE, Alberte**

74 Agente/Representante:

CAMIÑA TATO, Montserrat

54 Título: **MÓDULO INTEGRABLE EN EQUIPOS CONVENCIONALES DE LABORATORIO PARA LA
REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE CORTE DIRECTO**

ES 1 301 319 U

DESCRIPCIÓN**MÓDULO INTEGRABLE EN EQUIPOS CONVENCIONALES DE LABORATORIO
PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE CORTE DIRECTO**

5

SECTOR DE LA TÉCNICA

La presente invención describe un módulo integrable en equipos convencionales de laboratorio para la realización de ensayos de corte directo que permite medir con precisión las deformaciones y los desplazamientos de campo completo sin alterar o
10 modificar el comportamiento del material.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Las técnicas de medición basadas en métodos ópticos (ej. fotogrametría) resultan muy útiles en el ensayo de todo tipo de materiales, pues cuentan con grandes prestaciones,
15 como son el hecho de no requerir contacto; el de proporcionar información de "campo completo" de la totalidad o de una porción de la probeta/muestra ensayada, incluso en 3D; su capacidad de registrar fenómenos casi instantáneos (como impactos o roturas frágiles); la versatilidad de los equipos o su simplicidad de uso. Con el gran desarrollo y abaratamiento actual de la fotografía digital, de los equipos informáticos y del software
20 fotogramétrico, estas técnicas de medición (ej. DIC o Correlación Digital de Imágenes, Grid, Moiré, etc.) se están haciendo cada vez más populares en multitud de laboratorios de ensayo de materiales.

Hoy en día, la correlación de imágenes digitales (DIC) se ha convertido en una técnica óptica de uso frecuente para ensayar materiales de laboratorio debido a su naturaleza
25 de método sin contacto, lo que permite medir con precisión las deformaciones y los desplazamientos de campo completo sin alterar o modificar el comportamiento del material en modo alguno. Con el importante desarrollo de la tecnología informática, la aplicación de la técnica DIC ha demostrado ser una herramienta muy eficaz y útil en numerosas áreas, como aplicaciones geotécnicas (Jastrzębska, 2021), pruebas de
30 materiales de carreteras (Górszczyk, Malicki y Zych, 2019; Arza- García et al., 2022) de la construcción y los campos estructurales (Melenka y Carey, 2015).

El ensayo de corte directo es uno de los procedimientos experimentales más antiguos implementados en la práctica de la ingeniería geotécnica para determinar la resistencia al corte de los suelos (Gan, Fredlund y Rahardjo, 1988).

Dicho ensayo se encuentra estandarizado desde hace años, tanto en la normativa internacional como la nacional de muchos países, entre las que cabe destacar:

- ESPAÑA_EUROPA (Internacional) - UNE-EN 17892-10:2019 Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 10: Ensayos de corte directo. (ISO 17892-10:2018).
- SUIZA (Internacional) - ISO 17892-10:2018 Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil —Part 10: Direct shear tests.
- EE. UU. (Internacional) - ASTM D3080 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
- EE. UU. - AASHTO T236, 2008 Standard Method of Test for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions.
- REINO UNIDO - BS 1377:7 Methods of test for soils for civil engineering purposes. Shear strength tests (total stress).
- AUSTRALIA - AS 1289.6.2.2:2020 Methods of testing soils for engineering purposes, Method 6.2.2: Soil strength and consolidation tests - Determination of shear strength of a soil - Direct shear test using a shear box.

El ensayo consiste en someter a las caras superior e inferior de una muestra (*Figura 1*) a una fuerza normal determinada (N_1), dejando que, durante un tiempo, experimente un proceso de consolidación vertical, para someterla, una vez consolidada, a una velocidad de deformación constante de modo que se aplica una fuerza tangencial (T_1) creciente hasta rotura (T_2), según el plano de unión de ambos anillos/marcos, simplemente provocando el desplazamiento relativo de ambos en direcciones opuestas. Durante el ensayo, la fuerza tangencial necesaria para provocar cada desplazamiento en la muestra se registra mediante una célula de carga y un transductor, respectivamente.

Partiendo de un desplazamiento (L_1) y fuerza tangencial (T_1) prácticamente nulas, el ensayo continúa, generalmente, hasta que se supera la fuerza tangencial que es capaz de resistir el suelo (T_2), que corresponderá a un desplazamiento relativo de los anillos/marcos (L_2). Mediante este ensayo es posible determinar, entre otros parámetros, la resistencia media al corte (por ejemplo, en N/mm^2 o MPa) que tiene esa muestra en ese plano concreto de corte, que se obtendrá, aproximadamente, mediante el cociente del valor de la fuerza (T_2 , por ejemplo, en N) en el instante de rotura y la superficie del plano de rotura (por ejemplo, en mm^2), que no es constante, pues al desplazarse relativamente ambas partes de la caja la superficie de contacto decrece. El módulo convencional utilizado para que las máquinas de corte directo puedan realizar el ensayo, está compuesto por la caja de corte o molde (*Figura 2*) (dividido en dos partes), en el que se introduce la muestra a ensayar, y un carro deslizante (*Figura 3*).

Uno de los inconvenientes del ensayo de corte directo es la distribución no uniforme de la tensión y la deformación en el plano de rotura. Si bien estas distribuciones se pueden modelar numéricamente, el empleo de un método de medición de campo completo como DIC sería muy útil para realizar un seguimiento experimental de los cambios en los desplazamientos en la superficie lateral de las muestras cortadas y para validar dichos modelos numéricos (Shen et al., 2020). La principal limitación para aplicar DIC en el ensayo de corte directo es que el molde utilizado en el aparato de ensayo es una caja metálica cerrada, lo que imposibilita monitorear el comportamiento real del suelo, por lo que debe ser modificado (Kong, Chen y Hua, 2014).

10

EXPLICACIÓN DE LA INVENCIÓN

La invención consiste en un módulo integrable en equipos convencionales de laboratorio para realizar el Ensayo de Corte Directo (Figura 4). Dicha invención se diferencia de los módulos convencionales en que, en este caso, el carro deslizante (2) es abierto por los laterales y dos de las caras laterales de ambas partes de la caja de corte (superior e inferior) (14) se sustituyen por sendas placas de plexiglás transparente (15). El módulo está específicamente diseñado para el ensayo de muestras estandarizadas de base cuadrada de 60 x 60 mm (ASTM D3080 / UNE 103401).

15

El molde deja a la vista una de las caras laterales de la muestra en su interior y, por lo tanto, permite monitorizar el progreso del ensayo mediante métodos ópticos, con la única ayuda de una cámara, que fotografía la escena observable a través del plexiglás.

20

Las placas de plexiglás llevan incorporadas bandas con patrones de referencia visual (patrón de moteado aleatorio), tanto en la superior (17) como en la inferior, lo que permite el escalado/calibrado dimensional, de muy alta precisión, de los métodos ópticos de campo completo utilizados para la medición de desplazamientos (2D-DIC) durante el ensayo. De este modo, es posible conocer el desplazamiento de todas y cada una de las partículas de la cara lateral vista de la muestra en cada instante del ensayo.

25

El módulo completo (Figura 5) acoplado a la máquina de corte directo, incluye el carro deslizante modificado (2), la cámara (6) con intervalómetro (5) y un sistema de iluminación (16) que proporciona una intensidad de luz difusa tal que no provoca brillos o reflejos sobre el plexiglás u otros elementos de la escena y permite realizar las fotografías con una combinación de sensibilidad del sensor, una apertura de diafragma y una velocidad de obturación adecuadas. De este modo es posible registrar los desplazamientos mediante el análisis, con técnicas DIC, de las fotografías tomadas. En

30

la máquina de corte, una célula de carga (4) registra el valor de la fuerza tangencial aplicada en cada instante sobre la muestra y dos transductores (1) registran el desplazamiento vertical experimentado por la placa que delimita superiormente a la muestra al aplicar la carga superior y el desplazamiento horizontal experimentado por la parte inferior del molde, solidaria al carro deslizante modificado (2). La sincronización de la cámara (6) con la máquina de corte directo (7) se consigue mediante el uso de un dispositivo móvil (8) incluido en la escena junto al carro modificado (2), cuya cámara de video enfoca a una zona de la pantalla (9) del ordenador (10) que gobierna la máquina de ensayo (7). De este modo, cada fotografía tomada por la cámara del nuevo modelo contiene la información del instante en el que ha sido realizada, junto con los valores concretos de cargas y desplazamientos registrados en ese instante por la célula de carga (4) y los transductores (1). Una de las dos barras verticales con las que cuenta el dispositivo de aplicación de la carga vertical de la máquina de corte directo se sustituye por un marco metálico (11) que permite transmitir la carga y ver, desde la posición de la cámara, el interior de la muestra, los patrones aleatorios y el dispositivo móvil.

El campo completo de deformaciones permite un mejor conocimiento de los fenómenos que se producen durante el ensayo, del comportamiento concreto de cada muestra y, por tanto, una mejor caracterización de las propiedades mecánicas y del comportamiento de ésta frente al cortante. El análisis del comportamiento de la muestra a lo largo del ensayo es especialmente relevante en el caso de materiales granulares, y permitiría realizar análisis avanzados que pueden resultar de mucho interés para los laboratorios, como, por ejemplo, la validación de modelos numéricos, la determinación de los planos o direcciones de corte, análisis de la heterogeneidad de material, análisis de deformación/rotación de las partículas, etc.

En definitiva, la nueva invención:

1º- Permite la realización del ensayo estandarizado de corte directo, de forma que la muestra sea visible durante el mismo, haciendo que sea posible utilizar métodos ópticos de medición.

2º - Permite realizar análisis avanzados con información de campo completo para validación de modelos numéricos, la determinación de los planos o direcciones de corte, análisis de la heterogeneidad de material, etc.

3º- Permite escalar y calibrar las mediciones realizadas por el método óptico en cada instante.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características técnicas de la invención, se incluyen como parte integrante de la misma las siguientes figuras.

- 5 **Figura 1.-** Esquema de fuerzas aplicadas durante el ensayo. Fuerza N_1 , normal al plano de corte, constante durante el ensayo. Fuerza T , tangencial al plano de corte, creciente durante el ensayo hasta la rotura de la muestra por el plano de corte. Sendas células de carga registran el valor de las fuerzas en cada instante y un transductor registra el desplazamiento relativo entre ambas cajas de corte L en cada instante.
- 10 **Figura 2.-** Caja de corte o molde desmontado. Se pueden ver la parte inferior (12) y superior (13) del molde, en la que aloja la muestra, así como las placas que delimitan superior (3) e inferiormente (20) la muestra. Las fuerzas tangenciales al plano de corte sobre la muestra se aplican a través de las partes superior e inferior del molde. Las fuerzas normales al plano de corte sobre la muestra se aplican a través de dichas placas.
- 15 **Figura 3.-** Módulo convencional. En la figura se observa el montaje de la caja de corte, con sus partes superior (13) e inferior (12); la aplicación de la fuerza normal al plano de corte en la placa superior (3); la aplicación de la fuerza tangencial en la parte superior del molde (1) mediante un elemento (19) que atraviesa el carro deslizante (2), solidario a la parte inferior (2) de la caja de corte, montado en la máquina, en pleno ensayo y la
- 20 medida del desplazamiento horizontal del carro deslizante (4) que en cada instante realiza el transductor (1).
- Figura 4.-** Representación de la invención, con el carro deslizante modificado (2) que deja a la vista las dos partes de la caja de corte (14), superior e inferior, con uno de sus laterales constituido por plexiglás (15), cada uno de los cuales cuenta con un patrón de
- 25 moteado aleatorio (17) adherido a su zona más alejada del plano de corte.
- Figura 5.-** Módulo completo, incluido el carro deslizante modificado (2), la cámara (6) con intervalómetro (5) acoplada a la máquina de corte directo (7) de la marca Mecánica Científica. (https://mecacisa.com/wp-content/uploads/productos/pdf/21_0425.pdf). Una célula de carga (4) registra el valor de la fuerza tangencial aplicada y dos transductores
- 30 (1) registran los desplazamientos del carro deslizante modificado (2). Completan el conjunto el sistema de iluminación (6), un dispositivo móvil (8) y pantalla (9) y ordenador (10) que gobierna la máquina de ensayo (7). Un marco metálico (11) permite fotografiar la muestra y aplicar la carga vertical sobre la misma.

Figura 6.- Medición mediante transductor (1) del desplazamiento horizontal inducido mediante un tornillo (21) a la parte superior del molde caja de corte sometida a una carga normal superior (18) para evitar su desplazamiento vertical. Registro simultáneo del mismo desplazamiento mediante cámara digital (6) con iluminación artificial (16) y DIC, para comparar y determinar el error del método óptico (DIC) con respecto al método de contacto (transductor)

Figura 7.- Detalle de la medición de los desplazamientos de la caja de corte (14) y las pletinas de plexiglás (15).

Figura 8.- Correlación entre los desplazamientos medidos con DIC (eje horizontal) y los medidos con el transductor (eje vertical), tanto de la caja (simbolizados con cuadrados) como del plexiglás (simbolizados con rombos).

Figura 9.- Medición con transductor (1) de la deformación horizontal del plexiglás (15) por efecto del empuje lateral horizontal ejercido en dicha pletina por la muestra, contenida en las partes superior (13) e inferior de la caja de corte, conforme es comprimida en dirección normal al eje de corte mediante la fuerza aplicada en la placa superior (3).

Figura 10.1.- otra perspectiva de la Figura 9.

Figura 10.2.- Flecha horizontal (desplazamiento lateral) registrada en el centro del plexiglás (línea gris, creciente conforme aumenta la carga vertical, y escala derecha, mm) y asiento (desplazamiento vertical, mm) registrado en la cara horizontal superior de la muestra (línea negra, negativo, decreciente conforme aumenta la carga vertical, y escala izquierda) en función de la carga de compresión vertical (escala inferior, kPa) creciente ejercida en ambas caras horizontales de la muestra

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

Diseño en CAD 3D de las piezas superior e inferior de la caja de corte

El proceso seguido en la realización de la invención comienza con el diseño en CAD 3D de las piezas superior e inferior de la caja de corte (3 en la Figura 4) con una de sus caras laterales abiertas, manteniendo las dimensiones originales de la caja de corte (60 × 60 mm) (1 y 2 en la Figura 2). Con ayuda de una impresora 3D convencional, se realizan ambas piezas en PLA (Ácido poliláctico), el material más ampliamente empleado en estos dispositivos. Una de las caras laterales de la caja de corte modificada se completa con sendas pletinas de plexiglás hechas a medida. Para obtener una referencia de los desplazamientos relativos de ambas cajas, la mitad de cada placa

transparente se pintó con pintura blanca y se moteó aleatoriamente con puntos negros (2 en la Figura 4), para maximizar el contraste de los moteados y mejorar la confiabilidad del seguimiento de los desplazamientos, lo que permite optimizar las mediciones mediante DIC. En esta primera versión del modelo, cada placa, alojada en sendas ranuras verticales, se fijó a cada parte de la caja mediante adhesivo convencional. En el centro de la caja se mantuvo un área transparente para monitorear el comportamiento de la muestra de suelo cuando se introduce en la caja. Tomando una fotografía del conjunto en diferentes instantes (Figura 6) es posible determinar, mediante análisis de dichas imágenes y cualquier software DIC, los desplazamientos que experimentan las bandas moteadas (patrón de moteado aleatorio). En este caso, las series de imágenes estudiadas se procesaron utilizando el software de código abierto DICe (SNL, Albuquerque, EE. UU.) que se puede ejecutar directamente en la mayoría de los sistemas operativos. Con la caja así diseñada se realiza un primer ensayo, cuyo objetivo es determinar si la placa de plexiglás empleada afecta a las mediciones realizadas mediante DIC, pues dicha placa es un elemento añadido que se interpone entre el elemento cuyos desplazamientos se pretende medir (el patrón moteado aleatorio) y el dispositivo que registra dichos desplazamientos (el sensor de la cámara).

Determinación de la influencia del plexiglás en los resultados de un método óptico (Correlación Digital de Imágenes)

La caja se monta sobre un pequeño bastidor que permite inducir un desplazamiento horizontal controlado a la parte superior de la caja, de igual modo a como ocurre en la máquina de corte directo, con ayuda de un tornillo (2 en figura 6) que la empuja, mientras la parte inferior de la caja permanece fija (Figura 7). Dicho desplazamiento se mide mediante un transductor (3 en Figura 6). El dispositivo se dispone frente a una cámara digital (4 en Figura 6) que permite fotografiar la escena para cada estado de desplazamiento relativo de las cajas superior e inferior (Figura 7). Los resultados de DIC pueden variar ampliamente entre diferentes configuraciones, patrones moteados, parámetros coincidentes, etc. Por lo tanto, es importante utilizar métodos de validación para verificar las mediciones obtenidas. Aquí se emplearon dos métodos principales para evaluar los errores DIC. Por un lado, el ruido de fondo se calculó tomando y procesando una serie de 20 imágenes “estacionarias” de la caja (sin desplazamiento) para obtener una estimación del valor umbral de los desplazamientos por debajo del cual las medidas son indistinguibles del ruido. Por otro lado, se compararon los desplazamientos medidos entre DIC y el transductor. Se puede concluir que el desplazamiento relativo entre las bandas de escalado, situadas por detrás del plexiglás, es correctamente determinado en las imágenes procesadas. El ruido en dirección

horizontal oscila entre -0,002 mm y +0,0035 mm y entre +0,001 mm y -0,006 mm en dirección vertical. El error medio en la medida del desplazamiento del total de píxeles de la banda de escala/calibrado (Figura 8) es inferior a 0,1 mm, mostrando las mediciones realizadas mediante DIC una muy alta correlación con las realizadas mediante transductor

Diseño en CAD 3D del carro deslizante

El siguiente paso consistió en el diseño en CAD 3D del carro deslizante modificado (4 en Figura 4), también de dimensiones idénticas a las del convencional (4 en Figura 3) y realizado en PLA. En este caso es preciso también dejar un lateral sin pared, para que se vea desde el exterior la caja de corte. El carro modificado permite montar la caja en la máquina de corte directo (7 en Figura 5) y someter a la muestra a un axil centrado de compresión que la placa superior (3 en Figura 9) reparte uniformemente en la cara superior de la muestra, en estado de tensiones normales de compresión simple. En la segunda versión del modelo, ya definitiva, se fijaron las placas de plexiglás a las dos partes de la caja mediante tornillos (Figura 9). Con el conjunto así diseñado se realiza un segundo ensayo, cuyo objetivo era determinar si el espesor del plexiglás es tal que su deformación durante el ensayo por efecto del empuje lateral de la muestra de suelo puede ser despreciada.

Ensayo de flexión de las pletinas de plexiglás.

Medición mediante transductor (2 en Figura 9) de la máxima flecha horizontal experimentada por las placas de plexiglás (4 en figura 9) en virtud de la flexión provocada en dichos elementos por el efecto del empuje que ejerce en ellos la muestra al ser sometida ésta a una tensión normal de compresión en sus caras superior (3 en figura 9) e inferior. Para su realización se fue aplicando una carga superior creciente y registrando simultáneamente la flecha horizontal en el centro de la placa de plexiglás para cada valor de la carga aplicada. Se concluye que la deformación máxima (flecha horizontal en el centro de la placa) del plexiglás, para un nivel de tensión normal de compresión de 400 kPa es inferior a 0,12 mm (Línea negra en Figura 10.2), pudiendo considerarse despreciable.

Finalmente se dispuso el conjunto en la máquina de ensayo (7 en Figura 5) junto con la cámara digital convencional (3 en Figura 5) el dispositivo de iluminación (6 en Figura 5) y los elementos de sincronización (8 y 9 en la Figura 5) de la cámara con la máquina de ensayo. Una vez todo dispuesto, se realizó un tercer ensayo, siguiendo el procedimiento estandarizado y registrando los desplazamientos del campo completo mediante DIC

Prueba del dispositivo en una veintena de ensayos completos hasta rotura de la muestra.

Cada uno de los veinte ensayos comienza con la compactación de la muestra de suelo y su trasvase a la caja de corte directo, junto con las placas superior e inferior. El
5 conjunto caja-muestra-placas se coloca en el carro deslizante modificado, junto con los transductores y los elementos de aplicación de las cargas. A continuación, se ajusta el equipo DIC (cámara, intervalómetro, elemento de iluminación y dispositivos de sincronización) y comienza a aplicarse una carga tangencial creciente. Simultáneamente se fotografía el proceso hasta su conclusión, tras la rotura de la
10 muestra.

Se concluye que es posible determinar, en todos los ensayos completos y con un método óptico (DIC o Correlación Digital de Imágenes), el desplazamiento de todas las partículas de la muestra visibles.

Los resultados de las pruebas realizadas demuestran que la técnica DIC implementada
15 en una configuración de laboratorio de corte directo adecuadamente preparada permite el análisis efectivo de las deformaciones en los materiales del suelo bajo condiciones de carga de corte.

REIVINDICACIONES

1. Módulo integrable en equipos convencionales de laboratorio para realizar ensayos de corte directo que comprende:

5 Un carro deslizante abierto por los laterales (2 en Figura 4), las dos partes de la caja de corte seccionadas (14 en Figura 4) y la cara lateral *del lado de la cámara* de plexiglás transparente (2 en Figura 4) con bandas con patrones de referencia visual (17 en Figura 4) y marco para aplicar la carga vertical sin tapar la escena (11 en Figura 5), también del lado de la cámara.

10

2. Módulo según la reivindicación 1 que además comprende una cámara digital (6 en Figura 5) y el correspondiente soporte de la misma.

3. Módulo según la reivindicación 1 y 2 que además comprende un sistema de
15 iluminación (6 en figura 5) para la toma de fotografías con exposición adecuada.

4. Módulo según la reivindicación 1 a 3 que además incluye un dispositivo, compuesto por un dispositivo móvil con cámara de vídeo y pantalla (8 en la Figura 5) que, enfocada a la pantalla (9 en la Figura 5) ordenador (10 en la Figura 5) que gobierna el equipo de corte directo existente (7 en la Figura 5) permite la
20 sincronización entre el módulo "DIC" y dicho equipo.

5. Módulo según las reivindicaciones 1 a 4 donde la muestra a ensayar tiene una base cuadrada de 60 x 60 mm.

25

6. Uso del módulo según reivindicaciones 1 a 4 para la realización de ensayos de corte directo.

7. Uso del módulo según reivindicaciones 1 a 5 para la realización de ensayos de
30 corte directo, que comprende fase de consolidación y fase de corte.

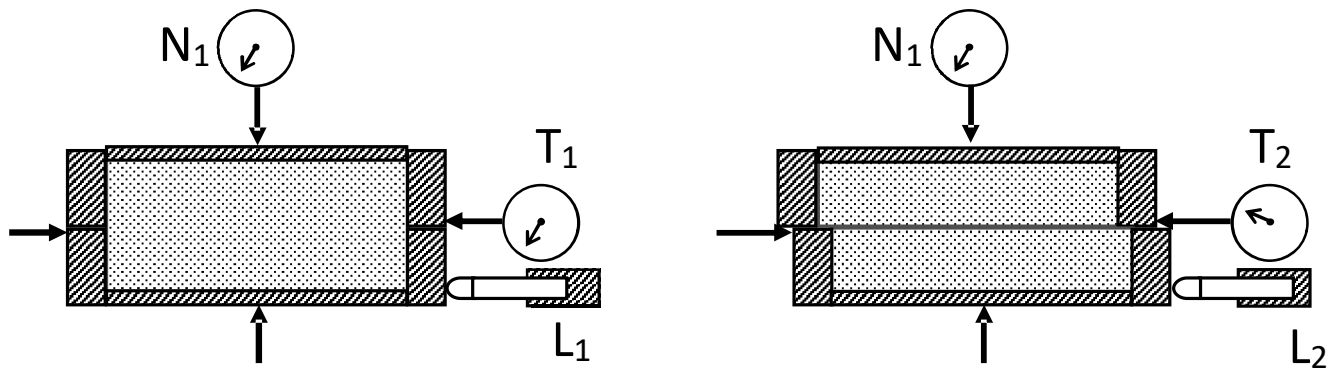


Figura 1

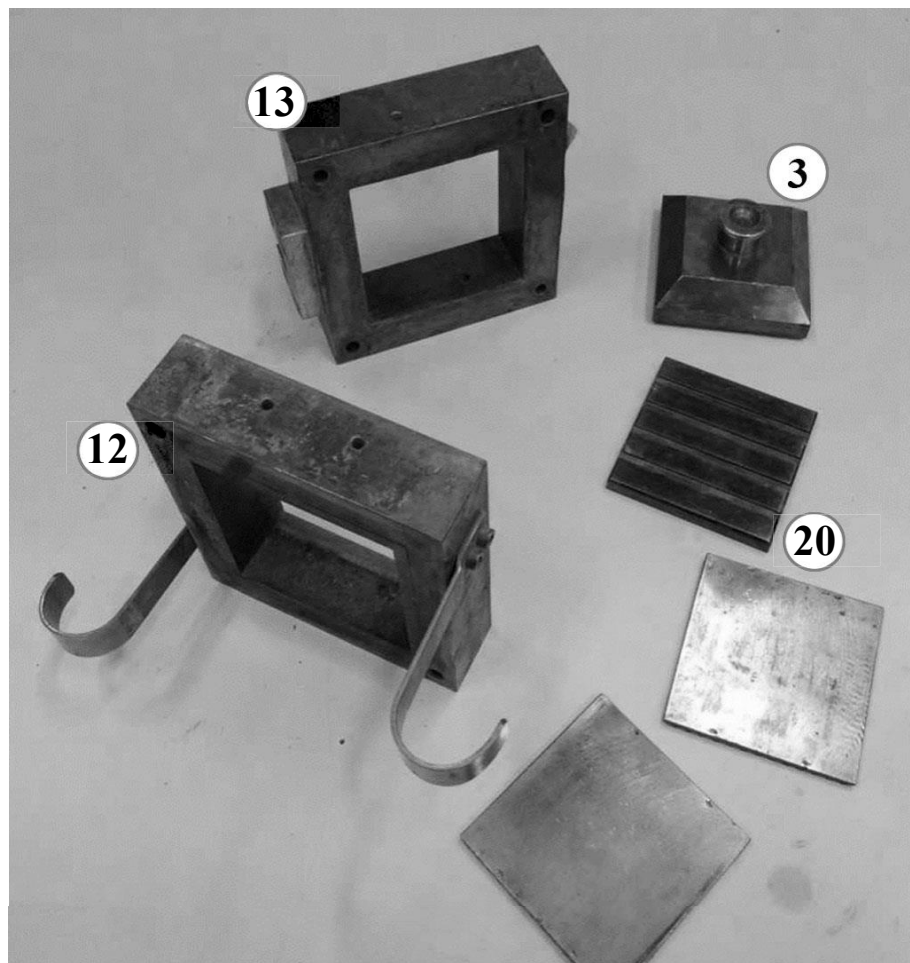


Figura 2

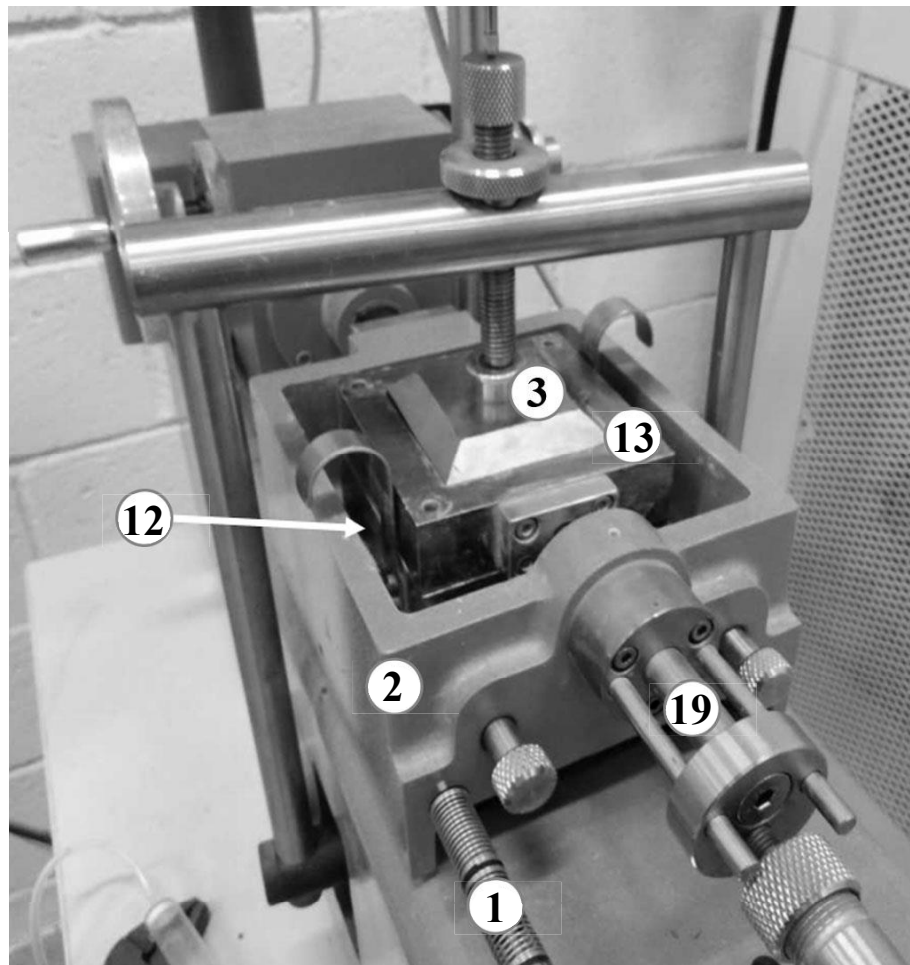


Figura 3

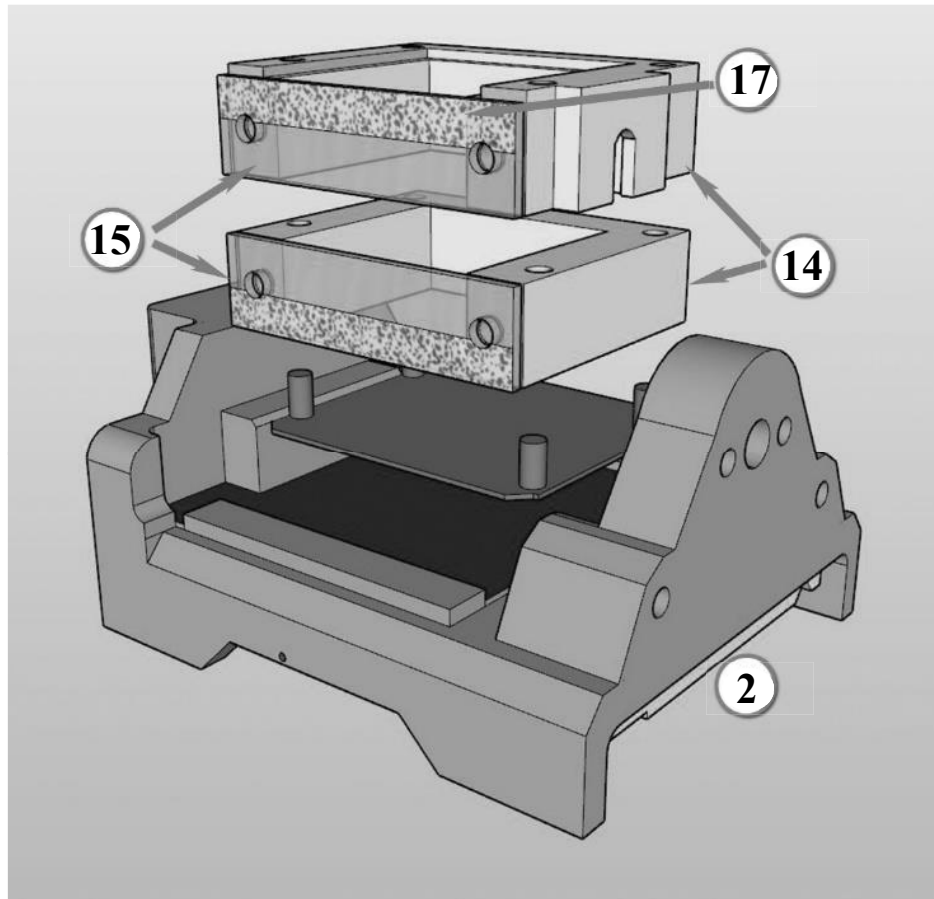


Figura 4

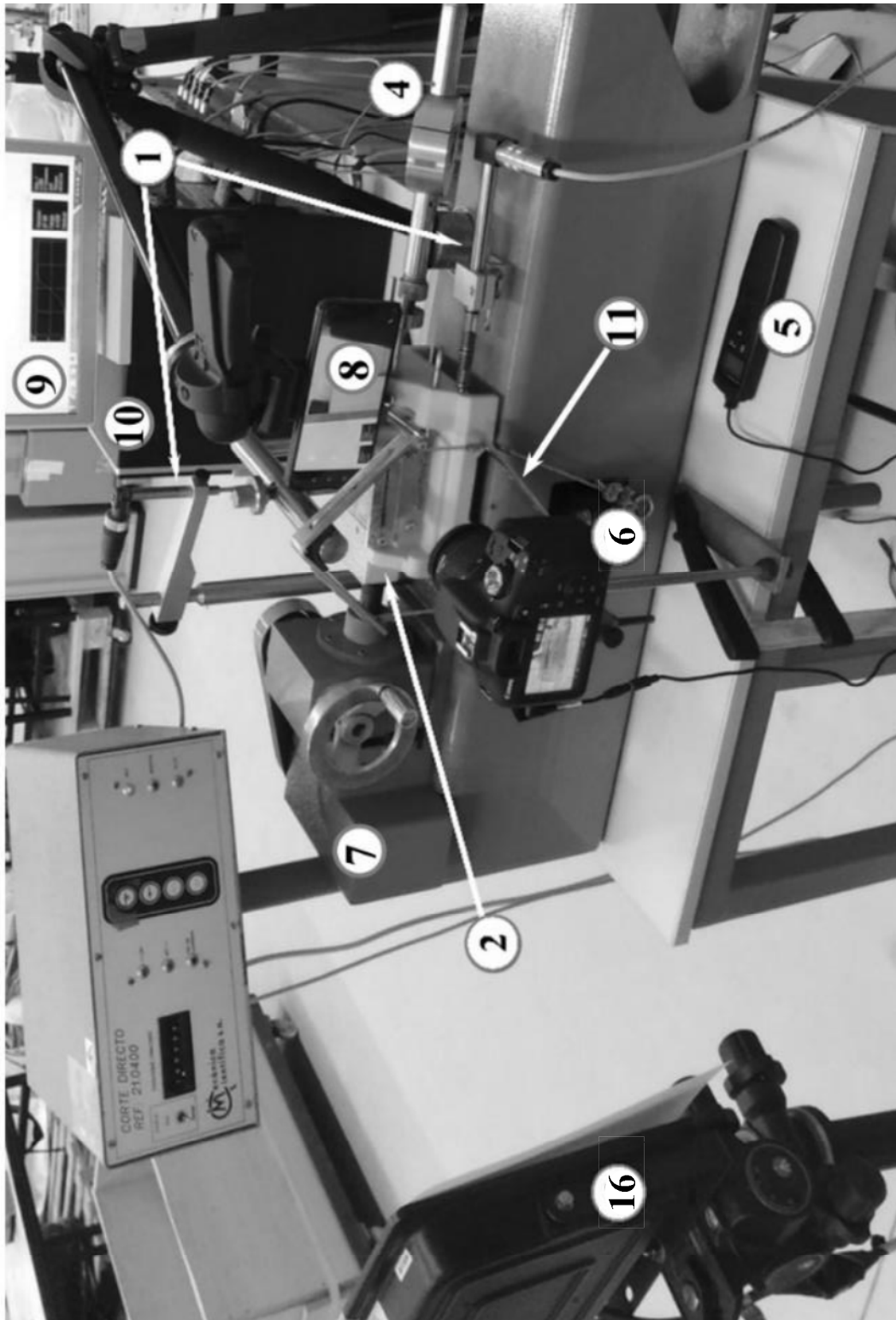


Figura 5

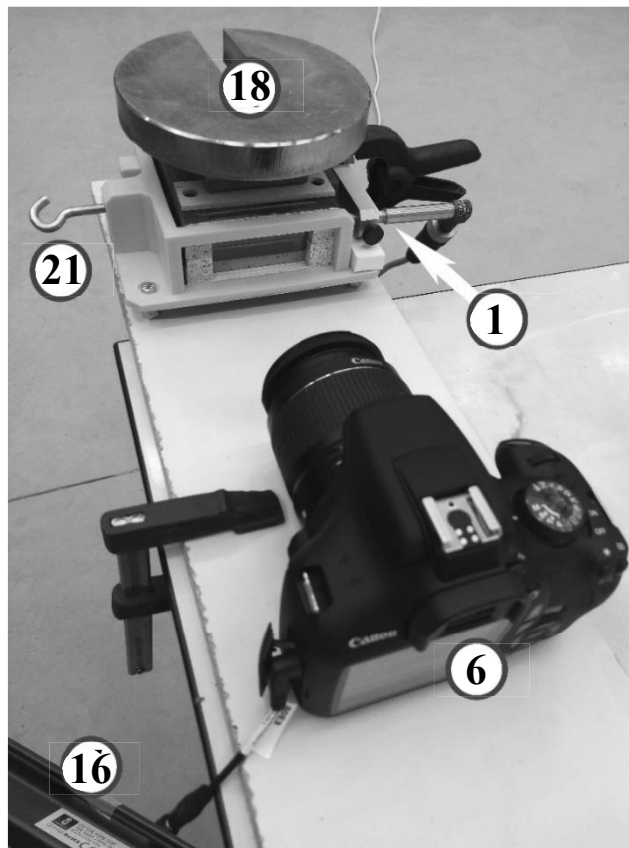


Figura 6

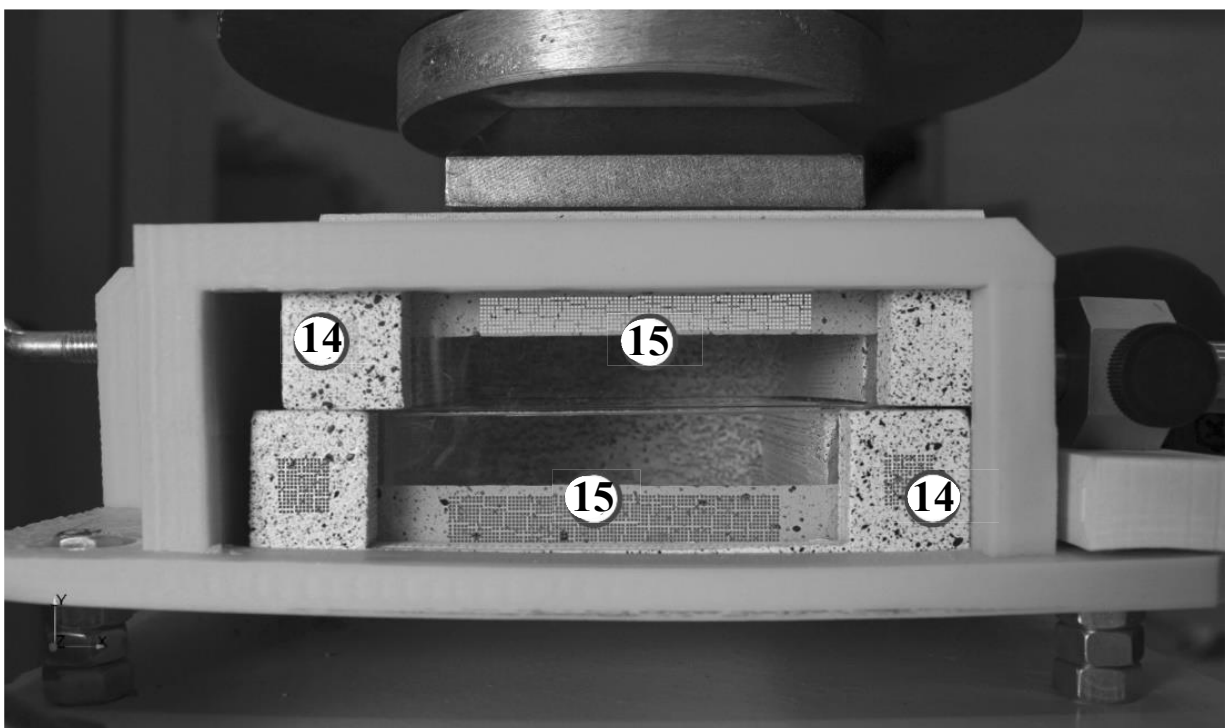


Figura 7

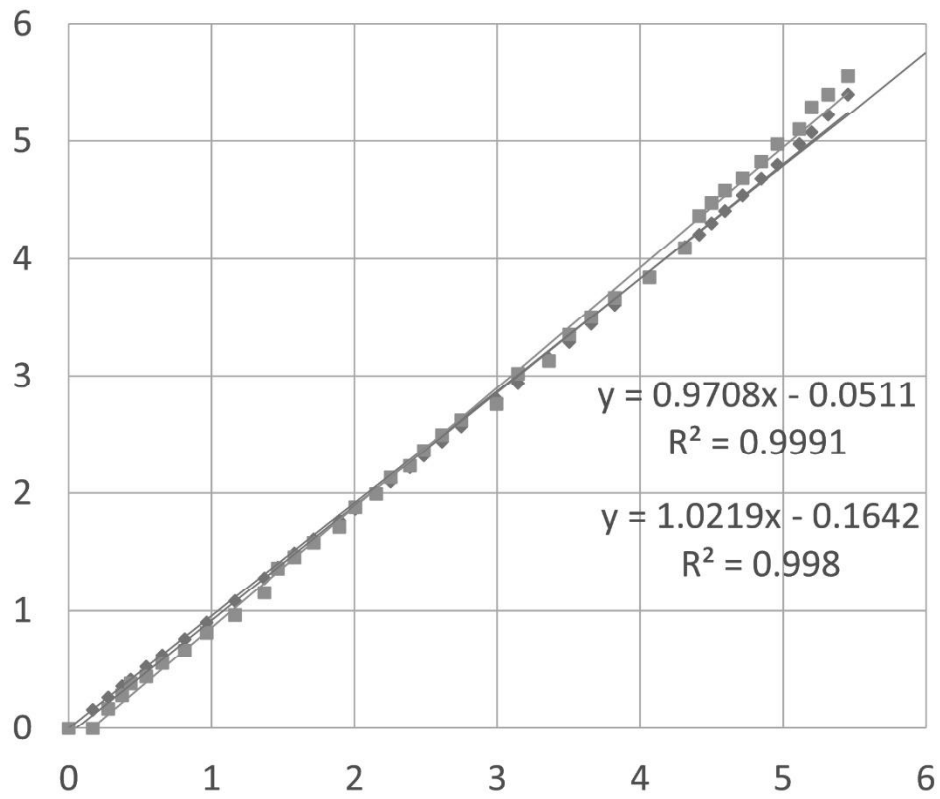


Figura 8

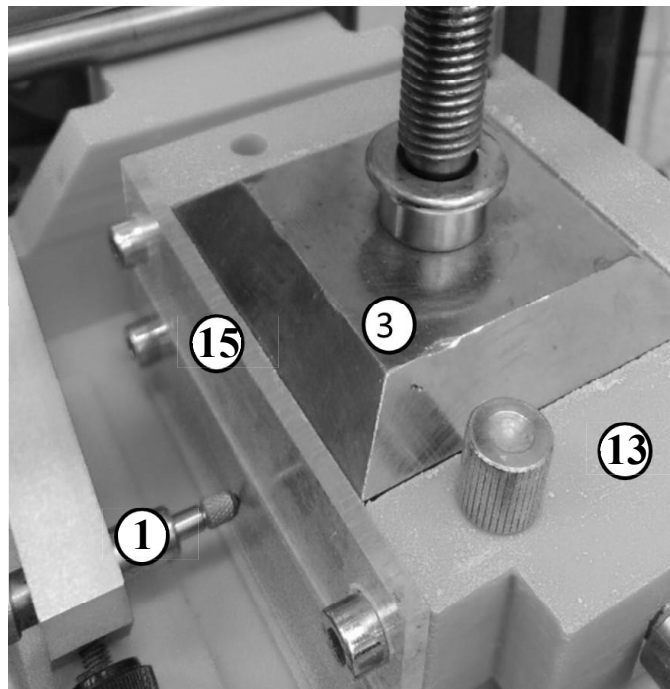


Figura 9



Figura 10.1

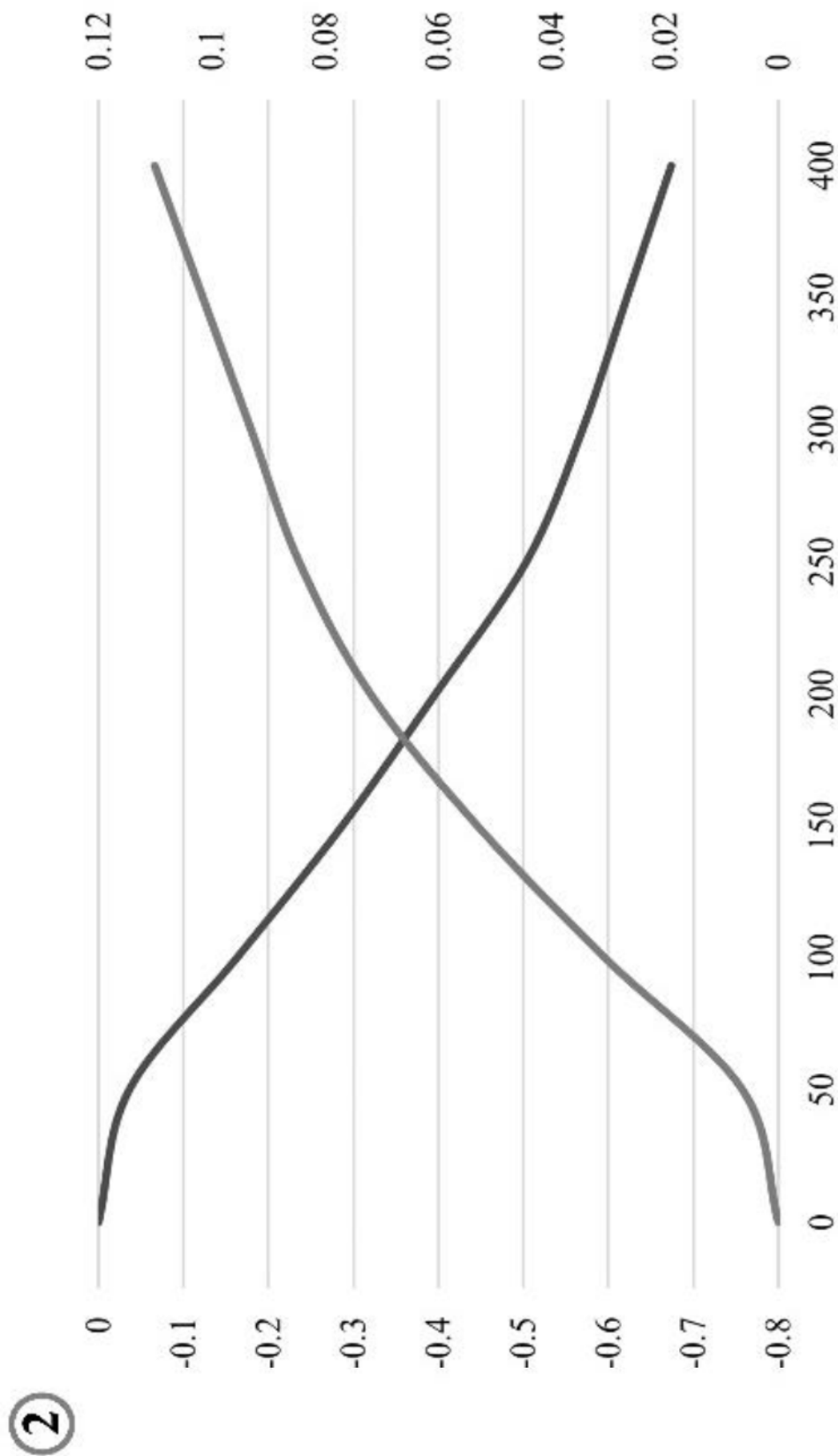


Figura 10.2