

# RESISTENCIA A FLEXIÓN Y POROSIDAD DE LA TIZA

A. Martín Meizoso y A. López Barberena

CEIT (Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa),  
Paseo de Manuel Lardizábal, 15, 20018 San Sebastián y  
Escuela Superior de Ingenieros, TECNUN, Universidad de Navarra,  
Paseo de Manuel Lardizábal, 13, 20018 San Sebastián

**Resumen.** Se presenta un estudio sobre la resistencia a flexión de las tizas ordinarias, que se utilizan en los encerados de las clases. Se realizan ensayos de flexión en 4 puntos y se plantea como una práctica en el Laboratorio de Materiales de una Escuela de Ingeniería, dedicado al comportamiento mecánico de los materiales. Se realiza el estudio sobre tizas en estado de recepción, tras empaparlas en agua durante 24 horas y deshidratadas durante 2 horas a 170°C. También se estudia la distribución de la porosidad y su efecto sobre la resistencia a flexión.

**Abstract.** A study about the flexural strength of common classroom chalks has been undertaken. Four-point bending experiments were conducted as an exercise in a Laboratory of Materials in an Engineering Faculty, dedicated to Mechanical Properties of Materials. The chalk is studied in the as-received condition, after soaking in water during 24 hours and after dehydrated for 2 hours at 170°C. The size distribution of the porosity and its effect on the flexural strength is also reported.

## 1. INTRODUCCIÓN

Como un ejercicio práctico, en un laboratorio dedicado a las propiedades mecánicas de los materiales, se plantea a los alumnos averiguar la resistencia a flexión de las tizas ordinarias, las que se usan en las pizarras, en varias condiciones: tal como se reciben, deshidratadas y empapadas en agua durante 24 horas. El material es muy barato, asequible y abundante en los colegios y aulas de las universidades.

Por cierto, España es uno de los países del mundo más ricos en yeso, de todas las edades geológicas y de todas las variedades conocidas.

## 2. MATERIALES

La tiza ordinaria utilizada en los encerados es blanca, es un material cerámico muy blando (2 en la escala de Moh's), muy frágil, ligeramente soluble en agua, incombustible y que no fragua en agua. Normalmente está compuesto de sulfato cálcico dihidratado (yeso:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), que es el más común de los aproximadamente 150 minerales de sulfato. Todos los sulfatos son transparentes o traslúcidos y blandos. Cuando aparece la indicación de tizas “sin polvo” probablemente se componen de carbonato cálcico en lugar de sulfato. El material que ensayamos son “Tizas Extra Finas” fabricadas por Tizas Marblas, C. B. (en Valencia) en donde el componente básico es el sulfato

cálcico. Las tizas vienen en paquetes de  $4 \times 4$  tizas, envueltas en un papel blanco, como muestra la Figura 1.

El proceso de fabricación de las tizas es relativamente sencillo: Primeramente se muele la materia prima, sulfato cálcico, hasta reducirla a un fino polvo que se mezcla con agua y aglutinante para conseguir una masa semifluida. Mediante un proceso de extrusión o inyección se compacta toda la mezcla, y por último, se cuece a altas temperaturas para enlazar los cristales entre sí. La existencia de poros y grietas en el material es inevitable.



**Figura 1.** Algunas de las muestras ensayadas.

La discusión sobre los tamaños de los defectos, cargas de rotura y tenacidad de las tizas se pone en manos de los alumnos. La flexión es una forma rápida y sencilla de ensayar el material, muy conveniente dada la forma en la que se suministran las tizas que no requieren ningún mecanizado adicional, pues se suministran como piezas prismáticas de sección cuadrada. Se eligen los ensayos de flexión en cuatro puntos para muestrear un mayor volumen de material en comparación con los ensayos de flexión en tres puntos y de esta manera ser capaces de detectar los mayores defectos.

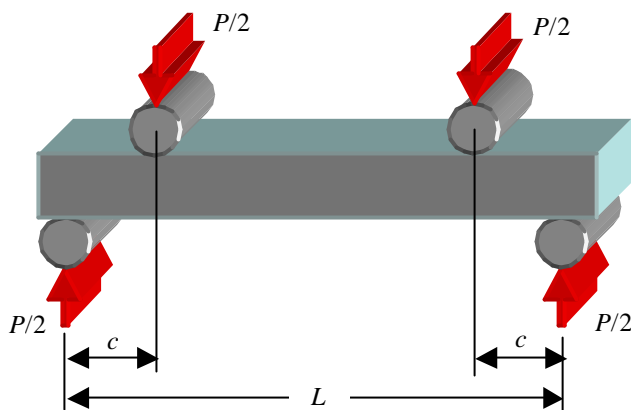
La alternativa más “ortodoxa” es la realización de ensayos de disco brasileño o ensayos de compresión, veáanse las referencias [1-3].

### 3. EXPERIMENTOS

Se ensayan 12 paquetes de tizas: 4 paquetes en estado de recepción, 4 deshidratadas durante 2 horas a 170 °C y 4 empapadas en agua durante 24 horas. En total 192 tizas.

Las tizas se pesan, en estado de recepción y después de secar o empapar en agua, en una balanza de precisión Metler Toledo PB3002.

Para la realización de los ensayos mecánicos se emplea una pequeña máquina de ensayos electromecánica, de sobremesa Instron (Mini 44), dotada de una celda de carga de 500 N. Las dimensiones de las tizas son  $97,6 \times 12,4 \times 12,4$  mm tal como las suministra Tizas Marblas, C. B. Los ensayos de flexión se realizan a temperatura ambiente (23 °C), con una luz entre apoyos exteriores de 80 mm y 40 mm entre los cilindros interiores. Los cilindros de carga son de acero con un diámetro de 10 mm. Se dispone una bola de acero de 25 mm de diámetro bajo el junque inferior de carga de modo que la carga se distribuya simétricamente sobre los apoyos.



**Figura 2.** Esquema del ensayo de flexión en 4 puntos.

En un ensayo de flexión en cuatro puntos, el momento flector máximo aparece entre los apoyos interiores y viene dado por

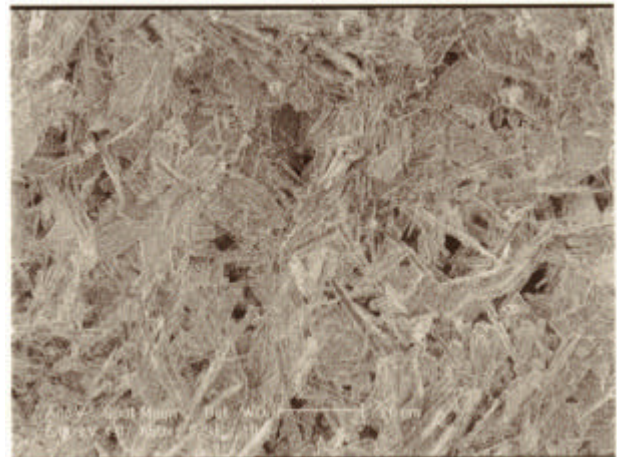
$$M_{\max} = \frac{Pc}{2} \quad \text{Ec. (1)}$$

$P$  es la carga total aplicada, sobre los dos cilindros superiores,  $c$  es la distancia entre el cilindro exterior y el interior como se muestra en la Figura 2.

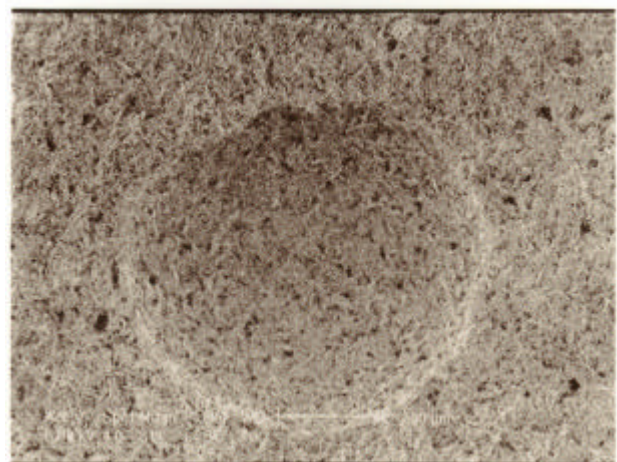
## 4. RESULTADOS

### 4.1. Microestructura

La micrografía electrónica de barrido, en la Figura 3, muestra los cristales de selenita que forman la tiza. La Figura 4 muestra un gran poro tal como se observa sobre la superficie de una tiza, observado en el microscopio electrónico de barrido.



**Figura 3.** Superficie de fractura de la tiza, formada por un agregado de cristales monoclinicos, aciculares de selenita, con un largo comprendido entre 10 y 20  $\mu\text{m}$  y una anchura de unas 2  $\mu\text{m}$ .

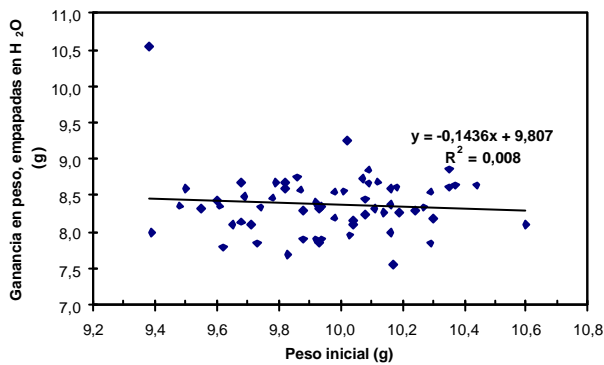


**Figura 4.** Micrografía electrónica de barrido de un poro en la superficie de una tiza.

#### 4.2. Medidas de peso y densidad

El peso medio de una tiza, en estado de recepción es de 9,9 g, con una desviación típica de 0,2 g. La tiza empapada en agua durante 24 horas pesa 18,3 g, con una desviación típica de 0,5 g. La Figura 5 muestra la ganancia en peso de las tizas frente a su peso en estado de recepción. Se observa que la ganancia en peso es de 8,4 g casi con independencia del peso inicial de la tiza.

En consecuencia, la densidad media de la tiza es 0,66 g/cm<sup>3</sup>. Tras el empapado en agua, la densidad sube hasta 1,21 g/cm<sup>3</sup>, indicando que la porosidad abierta de las tizas asciende al 55%.

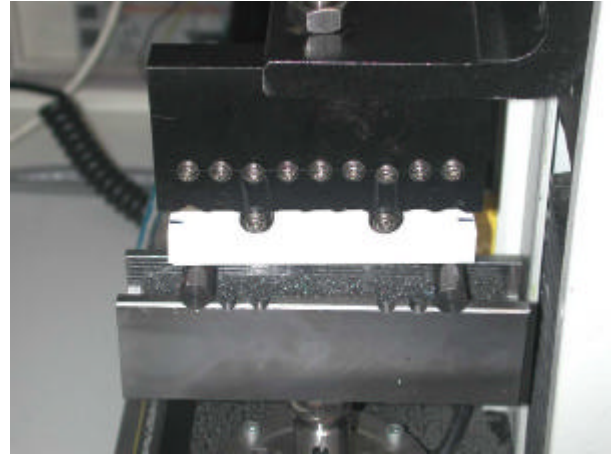


**Figura 5.** Ganancia en peso tras 24 horas en agua, frente al peso de la tiza en estado de recepción.

La tiza, al deshidratarla durante dos horas en una estufa a una temperatura de 170 °C, pierde un peso medio de 0,45 g, con una desviación típica de 0,35 g. La densidad media de la tiza deshidratada resulta ser de 0,62 g/cm<sup>3</sup>.



**Figura 6.** Dispositivo empleado para la realización de los ensayos de flexión en 4 puntos en una máquina Instron Mini 44. Obsérvese la bola bajo el junque inferior para asegurar un reparto simétrico de la carga aplicada.



**Figura 7.** Detalle del montaje experimental. Obsérvese cómo se marcan las tizas en su cara superior (para identificar el lado de compresión). Se observa la espuma que se coloca en el yunque inferior, para recoger la tiza rota y evitar posteriores roturas, producidas por el impacto posterior contra el yunque.

#### 4.3. Resistencia a flexión

Los ensayos de flexión en cuatro puntos se realizaron con una velocidad de desplazamiento constante de 0,5 mm/minuto. El montaje experimental se muestra en las Figuras 6 y 7.

Tras la fractura, se registra la carga de rotura y se observan ambos pedazos de la tiza con una pequeña lupa metalográfica, de 10 aumentos, dotada de una pletina móvil en xy con dos verniers (Measuroscope 62799 de Nikon Kogaku K. K., Japón). Se registra el tamaño de los poros que se observan en la superficie de fractura y su distancia a la cara de tracción.

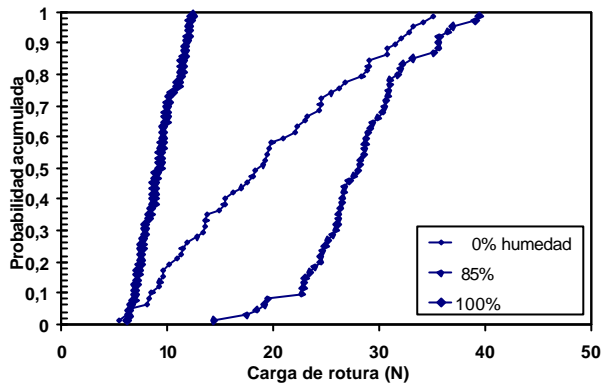
La Figura 8 muestra la distribución acumulada de las cargas de rotura para las diferentes condiciones ensayadas. La probabilidad acumulada se calcula de acuerdo con la mediana de rangos sobre la muestra ordenada,  $[x_{(i)}]$ , de acuerdo con la ecuación propuesta por Benard [4]:

$$F_{(i)} = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad \text{Ec. (2)}$$

En donde  $n$  representa el tamaño de la muestra e  $i$  es el número de la muestra ordenada.

La resistencia a flexión se define como la máxima tensión normal que soporta la probeta en el ensayo de plegado, esta aparece en la cara inferior de la probeta situada entre los rodillos interiores y vale:

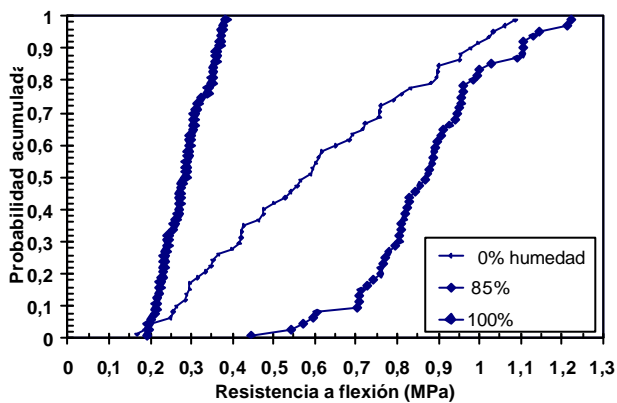
$$s_{\text{bending}} = \frac{M \frac{h}{2}}{I} = \frac{P_c}{2} \frac{\frac{h}{2}}{bh^3/12} = \frac{3P_c}{bh^2} \quad \text{Ec. (3)}$$



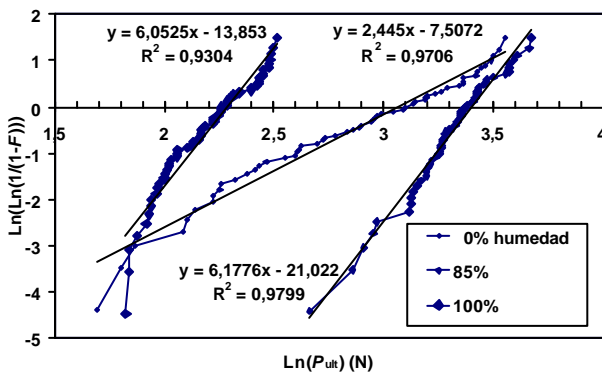
**Figura 8.** Distribución acumulada de las cargas de rotura para la tiza en las diferentes condiciones.

$I$  representa la inercia a flexión de la sección de la viga.

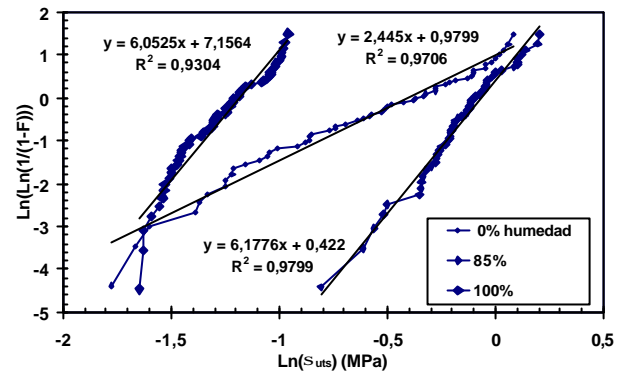
La Figura 9 muestra la distribución acumulada de la resistencia a flexión. Se observa una dispersión considerable de los resultados experimentales en las tres condiciones ensayadas, particularmente en la tiza deshidratada (en la que la selenita se transforma en anhidrita).



**Figura 9.** Distribución de la resistencia a flexión.



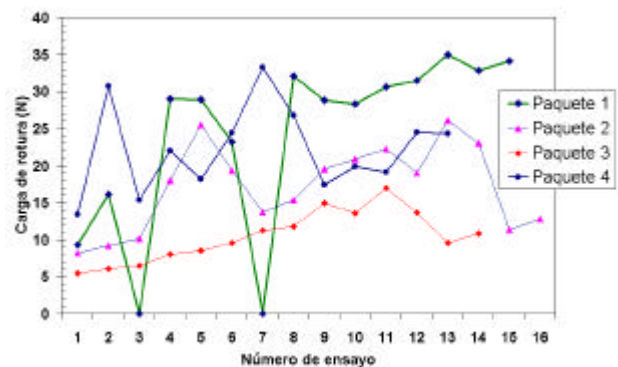
**Figura 10.** Distribución acumulada de las cargas de rotura en los ensayos de flexión en 4 puntos sobre un diagrama de Weibull.



**Figura 11.** Distribución acumulada de las resistencias a flexión sobre un diagrama de Weibull.

Las Figuras 10 y 11 muestran, sobre un diagrama de Weibull, la distribución de las cargas de rotura y la resistencia a flexión, respectivamente, en los ensayos de flexión en 4 puntos.

La Figura 12 muestra las cargas de rotura de las tizas deshidratadas, para cada uno de los 4 paquetes de tizas ensayadas. Se observa que unos paquetes de tizas se comportan mejor que otros. La misma dispersión entre unos y otros paquetes se observa con las tizas empapadas en agua, donde unos paquetes se comportan mejor que otros.



**Figura 12.** Resistencia a flexión de los 4 paquetes de tizas ensayadas tras deshidratarlas. Dos tizas aparecieron rotas dentro del primer paquete.

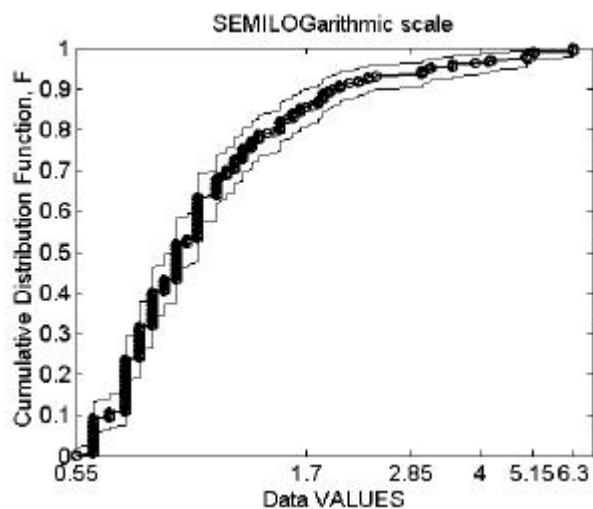
## 5. POROSIDAD

Como es bien conocido, una cavidad esférica en un sólido elástico infinito concentra las tensiones con un factor muy próximo a dos [5].

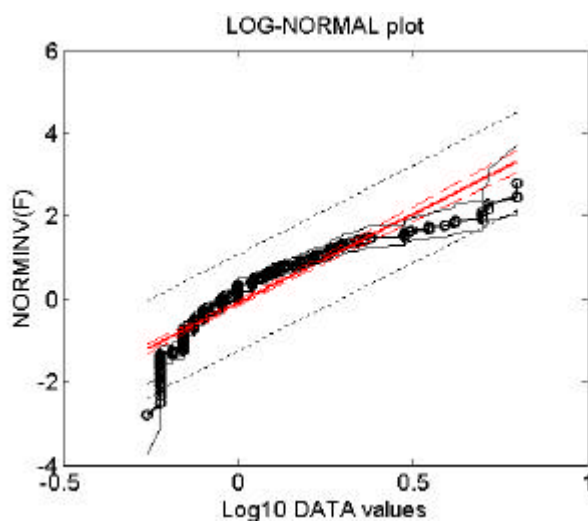
Sobre las superficies de las tizas rotas se midieron los poros que aparecen en las superficies, con un tamaño mayor de 0,5 mm. Se midieron 261 poros sobre una superficie total de 54,7 mm<sup>2</sup>.



Las Figuras 13 y 14 muestran la probabilidad acumulada en función del tamaño de los poros sobre un papel semilogarítmico y log-normal, respectivamente.



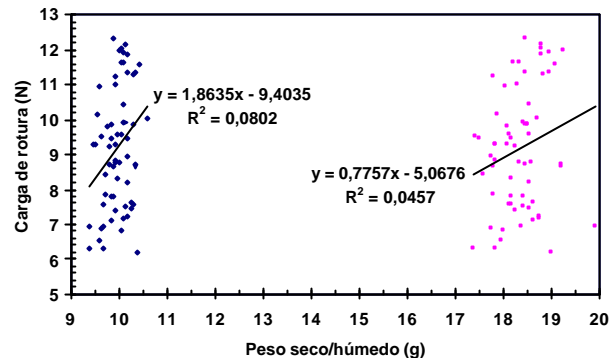
**Figura 13.** Distribución acumulada de los tamaños medios de los poros que se observan en la superficie de las tizas (en mm). Las líneas finas representan los intervalos de confianza al 95% para los datos experimentales.



**Figura 14.** Tamaño de los poros (en mm) sobre un diagrama log-normal (para tamaños mayores de 0,5 mm)..

A simple vista se observa una serie de tizas que presentan poros de tamaño considerable en la superficie de fractura. Por ser un caso de especial interés se ha comprobado, para las tizas en estado de recepción, una por una la carga de rotura de dichas tizas. Para nuestra sorpresa se observa que la mayoría de los valores se encuentran por encima de la media, lo cual va en contra de la idea de que a mayor porosidad, menor es la resistencia del material.

La Figura 15 muestra las cargas de rotura de las tizas ensayadas una vez empapadas en agua frente a su peso inicial y una vez empapadas en agua. Se observa que el peso de la tiza (y por ende su contenido en poros) no guarda una correlación significativa con su carga de rotura.



**Figura 15.** Peso en seco y húmedo de las tizas empapadas en agua durante 24 horas, frente a las cargas de rotura.

## 6. CONCLUSIONES

La resistencia de las tizas varía de un paquete a otro.

Las tizas tal como se reciben presentan un módulo de Weibull,  $m = 6$ . Las tizas se degradan al deshidratarlas presentando un peor comportamiento mecánico y un módulo de Weibull más bajo ( $m = 2.4$ ). Las tizas empapadas en agua durante 24 horas recuperan un módulo de Weibull próximo a 6 pero sus propiedades mecánicas se han deteriorado de forma muy notable. Indicando que probablemente se ha disuelto el aglutinante entre los cristales de selenita.

La porosidad de las tizas no guarda relación apreciable con su comportamiento en flexión.

## AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a todos los alumnos que hicieron el duro, y blando trabajo: María Argarate, Itziar de Los Mozos, Itziar López-Vailo, Olatz Pascual, Iván M. Rodríguez, Garikoitz Artola, Igone Eraso, Iker Otamendi y Natalia Remírez.

## REFERENCIAS

- [1] M. L. Talesnick, Y. H. Hatzor and M. Tsesarsky, "The elastic deformability and strength of a high porosity, anisotropic chalk", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 38, No. 4 (2001), pp 543-555.

- [2] D. Bahat, A. Rabinovitch and V. Frid, "Fracture characterization of chalk in uniaxial and triaxial tests of rock mechanics, fractographic and electromagnetic radiation methods", *Journal of Structural Geology*, Vol. 23, No. 10 (2001), pp. 1531-1547.
- [3] S. Meille, M. Saâdaoui, P. Reynaud and G. Fantozzi, "Mechanisms of crack propagation in dry plaster", *Journal of the European Ceramic Society* 23 (2003), pp. 3105-3112.
- [4] R. B. Abernethy, "The New Weibull Handbook", 4<sup>th</sup> ed., 2000.
- [5] H. M. Westergaard, "Theory of Elasticity and Plasticity", Dover Publications, Inc. New York (1952), p. 156.