



Ingeniería Mecánica

PRACTICA SUPERVISADA

ENSAYO DOBLE TORSION

ENSAYOS Y VALIDACION

TUTOR: Martin Sánchez

ALUMNO: Pablo Albariño

LEGAJO: 05-25054-2

AÑO: 2018

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional La Plata

INGENIERIA MECANICA

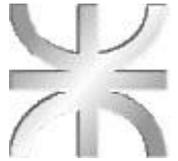
PRACTICA PROFESIONAL SUPERVISADA.

PABLO ALBARIÑO.

Calle 60 esquina 124 s/n.

La Plata - Buenos Aires - Argentina

Tel: +54-221-421-7578 / +54-221-489-0421 / 482-4855



INDICE

INTRODUCCIÓN.....	3
MARCO DE REFERENCIA.....	3
OBJETIVOS.....	4
ALCANCE	4
ESTUDIO DE PARÁMETROS	5
DESARROLLO	9
PROCESO DE ENSAYO	11
ANÁLISIS DE DATOS	12
RESULTADO DEL AJUSTE	16
RESULTADOS OBTENIDOS	17
CONCLUSIONES	21
RELACIÓN DEL PROYECTO CON LAS MATERIAS DE LA CARRERA	21
REFERENCIAS	22

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional La Plata

INGENIERIA MECANICA

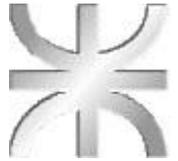
PRACTICA PROFESIONAL SUPERVISADA.

PABLO ALBARIÑO.

Calle 60 esquina 124 s/n.

La Plata - Buenos Aires - Argentina

Tel: +54-221-421-7578 / +54-221-489-0421 / 482-4855



INTRODUCCION

La presente práctica supervisada plantea el uso del ensayo de doble torsión para obtener una caracterización de materiales principalmente frágiles, como rocas, cerámicos, etc. La caracterización en cuestión es el Índice Subcrítico de Fractura.

Se propone su uso, para obtener un diagrama único que compara Velocidad de Fractura Subcrítica (V) con el Factor de Intensidad de Tensiones (K_I).

Se cuenta con la tutoría y supervisión del Dr. Ing. Martín Sánchez, para realizar las tareas de investigación, desarrollo y ejecución del trabajo en su conjunto.

MARCO DE REFERENCIA

Para efectuar el estudio del caso, se recopiló toda la información pertinente relacionada al tema, a través de la bibliografía que al final se detalla, de donde se obtuvieron las consideraciones teóricas necesarias.

Por otra parte este informe se basa en las prácticas supervisadas que lo preceden, ellas son las realizadas por los alumnos que trabajaron también bajo la tutela del Dr. Ing. Sánchez.

Teoría y modelado Geomecánico: Las altas temperaturas y los fluidos reactivos en las cuencas sedimentarias dictan que la interacción y la retroalimentación entre los procesos mecánicos y geoquímicos influyen significativamente en la evolución de las propiedades de la roca y la fractura. La mineralización diagenética no solo rellena las fracturas una vez abiertas, ya sea parcial o completamente, sino que también modifica las propiedades mecánicas de la roca que pueden controlar la apertura mecánica de las fracturas naturales.

Con respecto a la caracterización del relleno mineral de fracturas naturales, la fuerte interacción entre los procesos diagenéticos y mecánicos es de vital importancia para el comportamiento de muchos tipos de reservorios fracturados. Aunque la literatura más reciente enfatiza la orientación del esfuerzo en el subsuelo, la cementación en las fracturas es probablemente un control de importancia crítica sobre la porosidad, los atributos del flujo de fluidos e incluso la sensibilidad a los cambios de esfuerzos efectivos. Los procesos diagenéticos de disolución y cementación parcial son controles clave en la creación y distribución de fracturas naturales abiertas dentro de reservorios de hidrocarburos.

La continuidad de la fractura-porosidad es fundamental para la forma en que las fracturas conducen los fluidos.

El modelado geomecánico muestra que la disposición espacial de las fracturas en modo de apertura (articulaciones y venas) está controlada por el *índice de fractura subcrítica* del material. Los ensayos de mecánica de fractura de una amplia gama de rocas clásticas muestran que el índice subcrítico es sensible a los factores diagenéticos.

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional La Plata

INGENIERIA MECANICA

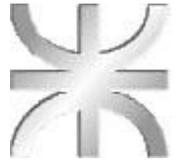
PRACTICA PROFESIONAL SUPERVISADA.

PABLO ALBARIÑO.

Calle 60 esquina 124 s/n.

La Plata - Buenos Aires - Argentina

Tel: +54-221-421-7578 / +54-221-489-0421 / 482-4855



La inestabilidad de la roca se debe al crecimiento de fracturas, la propagación, el encuentro y la integración en la masa rocosa.

Modelo geomecánico: El modelo geomecánico utilizado para estimar la densidad de fractura de las formaciones rocosas se basa en el crecimiento de fracturas subcríticas. Este modelo es adecuado para la condición de fractura de las rocas porque las fracturas pueden desarrollarse y extenderse más lentamente que la velocidad de ruptura de la roca intacta y, además, el crecimiento de fracturas subcríticas indica la condición en que la roca está sujeta a largos períodos de carga con un factor de intensidad de tensión (K_I) más bajo que el valor crítico del factor de intensidad de tensión del material (K_{Ic}), y donde la fractura se propaga a los valores de $(K_I) < (K_{Ic})$. Ahora, la resistencia a la fractura en este modelo está determinada por el ensayo de doble torsión, para determinar la energía de fractura de los materiales frágiles y las uniones adhesivas.

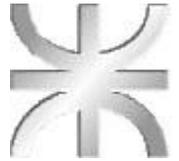
La investigación muestra que las fracturas en el medio ambiental se propagan hasta que el material se fractura bajo la acción combinada de la tensión de tracción y el medio de corrosión, lo que se denomina corrosión por tensión. Por lo general, el factor de intensidad de tensiones K_I en la punta de la fractura se considera un parámetro para controlar el crecimiento de la grieta. El límite inferior de corrosión bajo tensión es K_0 , y la resistencia a la fractura es K_{Ic} . Cuando $K_I > K_{Ic}$, la grieta crece catastróficamente a la velocidad del sonido aproximadamente, y cuando $K_I < K_0$, la grieta no crece, y cuando $K_0 < K_I < K_{Ic}$, la grieta crece a una cierta velocidad y aumenta con el factor de intensidad de tensiones K_I .

OBJETIVOS

Para esta práctica profesional se proponen como objetivos, luego de desarrollar un instrumento que permita realizar el ensayo de doble torsión en diversos materiales geológicos y cerámicos, obtener por medio de la validación los valores de Velocidad de Fractura Subcrítica, V ; el Factor de Intensidad de Tensiones, K_I ; la Resistencia a la fractura, o tenacidad, K_{Ic} ; el Índice Subcrítico de Fractura, SCI . Por último obtener un único diagrama V ; K_I que nos permita caracterizar al material y por medio de ello extrapolar los resultados al campo real, esto es, a las formaciones rocosas y yacimientos naturales.

ALCANCE

- Preparación de las muestras o probetas a ensayar, según norma correspondiente.
- Armado y alineación del instrumento fabricado, montaje en la máquina de ensayos, Prensa Uniaxial.
- Realización del ensayo respetando el procedimiento indicado, de acuerdo al método de relajación de carga, que es el utilizado para este caso.
- Repetición del mismo en varias probetas de distintos tamaños (respetando norma).



- Análisis e interpretación de los resultados obtenidos, mediante software correspondiente.
- Validación del ensayo, por medio de comparación con otros realizados al momento.

ESTUDIO DE PARÁMETROS

El resultado del ensayo de doble torsión, siguiendo el método de relajación de carga, arroja una curva, que como se verá más adelante tiene mucha dispersión. Por esto es necesario la obtención de una expresión para obtener la función **P(t)**.

Los ensayos de doble torsión se basan en la evidencia empírica de que S es una función lineal de la longitud de la grieta "a":

$$S \equiv y / P = S_0 + B \cdot a, \quad (1)$$

Donde "y" es el desplazamiento en la dirección vertical, P es la carga y B es una constante. Para un desplazamiento constante, la velocidad de propagación de la fisura "v" puede determinarse por la tasa de cambio de la carga:

$$V = -\frac{C}{P^2} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right), \quad (2)$$

Donde C está dado por:

$$C = y_0 \cdot P_t = \frac{S_0 + B \cdot a_t}{B} \cdot P_t, \quad (3)$$

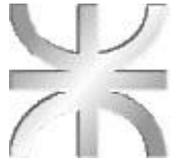
Un enfoque posible, en el que no se imponen ajustes de curva artificial en el comportamiento del tiempo de carga, es ajustar los datos medidos a la expresión dependiente del tiempo obtenida mediante la integración de la Ecuación 2.

Para mayor comodidad, la Ecuación 1 se puede reorganizar como:

$$P = \frac{P_i}{(1+b \cdot a)} \quad (4)$$

Donde **b** es una constante y **Pi** es el valor inicial de la carga aplicada. Diferenciando la Ecuación 4 con respecto al tiempo, **t**, y presumiendo la relación de ley de potencia entre la velocidad de propagación subcrítica y el factor de intensidad de la tensión, tenemos:

$$v = A \left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^n, \quad (5)$$



Resultando:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = - \frac{C \cdot b}{P_i} \cdot P^{(n+2)} \quad (6)$$

A partir de las cuales las constantes **C** y **b** pueden relacionarse con los valores iniciales de la carga, **P_i**, y su derivada temporal, **P_i'**, como

$$C \cdot b = - \frac{P_i'}{P_i^{(n+1)}} \quad (7)$$

Finalmente, la integración de la Ecuación 7 da:

$$P = \frac{P_i}{\left[1 - (n + 1) \cdot (P_i' / P_i) \cdot t\right]^{1/(n+1)}} \quad (8)$$

En principio, **P_i** y **P_i'** podrían determinarse a partir de mediciones del comportamiento inicial del tiempo de carga. Sin embargo, la dispersión experimental es demasiado alta para determinar directamente estos parámetros, especialmente durante la porción inicial de la caída de la carga. En su lugar, realizamos un procedimiento de ajuste óptimo de mínimos cuadrados para determinar los tres parámetros en la Ecuación 8 simultáneamente. La velocidad de la fractura se determina a partir de la Ecuación 2. Este proceso se puede configurar fácilmente en una hoja de cálculo.

Relajación de la carga en función del tiempo:

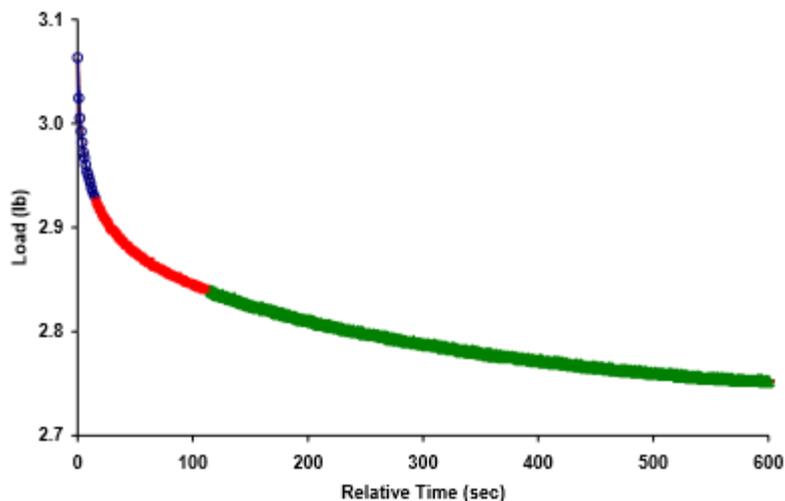
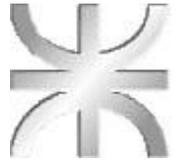


Fig. 1: Relajación de carga vs tiempo (Olson 2004)



Para la obtención del **Factor de Intensidad de Esfuerzo, K_I** y de la **Velocidad de Propagación Subcrítica, V** veamos el principio de la prueba de doble torsión:

La muestra de doble torsión que se muestra en la figura 2, es una placa rectangular. Hay una ranura longitudinal en la superficie inferior, y el frente de la grieta avanza a lo largo de una línea recta partiendo de una muesca inicial mecanizada y guiado por una ranura lateral, lo que produce una relajación de la carga. La muestra se trata como dos barras de torsión elásticas. El factor de intensidad de tensiones K_I y la velocidad de fractura subcrítica V se pueden obtener para una pequeña deformación cuando el ancho de la barra de torsión es mucho mayor que su espesor (ecuación (9) y ecuación (10)).

$$K_I = Pw_m \left[\frac{3(1+\nu)}{wd^3 d_n} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$v = \frac{da}{dt} = - \frac{wd^3 Ey}{6w_m^2 P^2 (1+\nu)} \frac{dP}{dt} \quad (10)$$

Donde P es la carga aplicada, w , es el brazo del momento de la torsión, ν es la relación de Poisson, d es el espesor del espécimen, d_n es el espesor del espécimen menos la profundidad de la ranura, $W/2$ es el ancho de torsión barra, E es el módulo de Young, y t es tiempo.

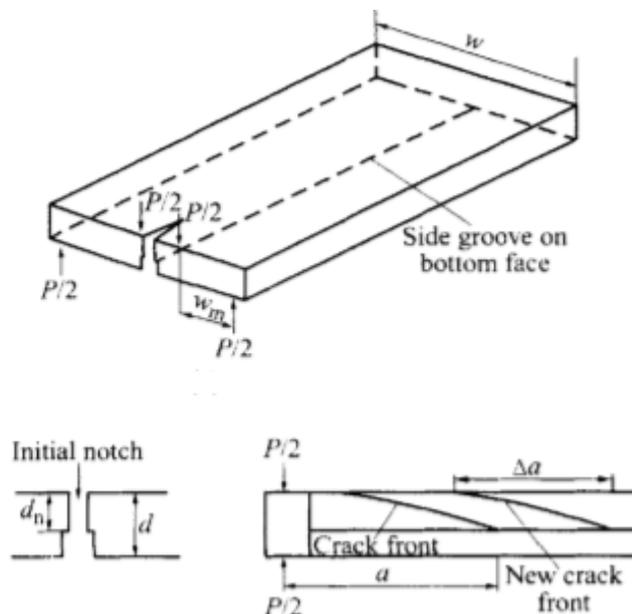
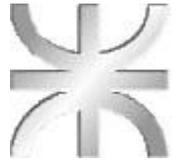


Fig. 3: Muestra y disposición del ensayo



La fractura se propagará de forma catastrófica cuando **P** llega al **P_c** crítico, es decir, **K_I** es igual a la tenacidad **K_{IC}**.

$$K_{IC} = P_C w_m \left[\frac{3(1+\nu)}{wd^3 d_n} \right]^{1/2} \quad (11)$$

Se puede ver que el factor de intensidad de tensiones **K_I** y la tasa de crecimiento de fracturas subcríticas son independientes de la longitud de la fractura, lo que es muy útil en la investigación del crecimiento de fracturas subcríticas. La relación entre el crecimiento de fractura subcrítica **V** y el factor de intensidad de tensiones **K_I** se puede establecer mediante la ecuación (9) y la ecuación (10).

Se ha establecido además, que la dinámica de la propagación de fracturas durante la corrosión por tensión (Fig. 3) puede describirse únicamente por el factor de intensidad de tensión (**K_I**) y la velocidad de propagación de la fractura (**V**) para muchos (y quizás todos) materiales. Hay hasta tres regímenes de crecimiento de fracturas, ya que **K** varía desde **K₀** (en el límite de corrosión por tensión) a **K_{IC}** (la tenacidad de fractura del material). En **K_I** bajo, región I, la velocidad de la reacción química (adsorción, difusión, etc.) cerca de la punta de la fractura controla el crecimiento; en el **K_I** intermedio, región II, la difusión de las especies corrosivas a la fractura controla la velocidad; en la región III, **K_I** está cerca de **K_{IC}** y hay una mezcla de falla corrosiva y mecánica.

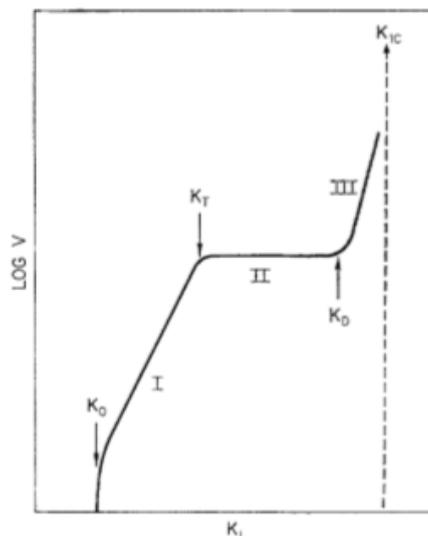


Fig. 3: Variación del factor de intensidad de tensiones, **K_I**, con la velocidad de fractura, **V**, para un material sometido a un ambiente de corrosión.

Índice Subcrítico de Fractura (SCI): El SCI es un parámetro que puede ayudar a determinar si una formación natural es susceptible de fracturarse o si ya está fracturada, y por lo tanto puede estimar con precisión la densidad de fracturas de las formaciones a perforar o producir. SCI está basado en el uso de la tesis de fractura a escala que establece que a altos valores de índice, habrá conjuntos de fisuras dispersas que pueden

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional La Plata

INGENIERIA MECANICA

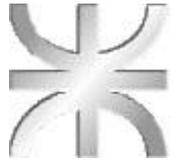
PRACTICA PROFESIONAL SUPERVISADA.

PABLO ALBARIÑO.

Calle 60 esquina 124 s/n.

La Plata - Buenos Aires - Argentina

Tel: +54-221-421-7578 / +54-221-489-0421 / 482-4855



estar separadas por distancias grandes o pequeñas y con valores bajos de índice, habrá conjuntos más pequeños de fracturas. Esa tendencia sigue un patrón porque su distancia de separación es menor.

Por último, **el Modulo de Young, E** o módulo de elasticidad longitudinal es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material, según la dirección en la que se aplica una fuerza, y para este estudio es determinante, ya que para bajos valores de E se observa que la V se acelera y el K_{Ic} disminuye.

DESARROLLO

Máquina de Ensayos: contamos con una prensa uniaxial ubicada en el laboratorio de física de rocas de Y-TEC, de datos:

Marca: TerraTek UCS TEST SYSTEM

Modelo: 915600 RevAc

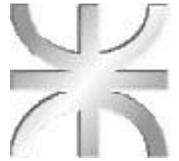
Serie: 3596

Carga máx. de trabajo de 100.000 lbs.



Fig. 4: Máquina uniaxial de ensayos, ubicada en Y-Tec

ENSAYO DE DOBLE TORSION: La doble torsión es una técnica para la caracterización de materiales bajo fractura mecánica. Esta metodología de ensayo se introdujo a fines de la década de 1960 y desde entonces ha ganado una gran popularidad debido a la configuración experimental relativamente simple y económica asociada con ella. La configuración del ensayo consiste en una carga simétrica de cuatro puntos alrededor de una entalla o una muesca, en un extremo de una placa rectangular. Esto produce deformación torsional en las dos mitades de la placa. Una característica distintiva de esta



configuración de carga es que el factor de intensidad de la tensión es, al menos como una primera aproximación, *independiente de la longitud de la fractura* para un rango de longitudes de grieta en la muestra de prueba. Esto implica que el ensayo de doble torsión es ideal para la evaluación de materiales opacos y no reflectivos donde las mediciones de longitud de fractura podrían ser difíciles de realizar. Por el mismo motivo, la configuración de doble torsión se puede probar en entornos de alta temperatura y controlados. Otra razón para la popularidad del método de ensayo de doble torsión (especialmente para estudios de crecimiento lento de fracturas) es la estabilidad relativa de la extensión de la fractura.

La técnica de ensayo: el ensayo sugiere el uso de muestras planas cargadas con fuerza de corte perpendicular en la superficie. Se aplica una carga sobre la muestra y debe permanecer constante inicialmente para comenzar la propagación de la fractura sin cambiar el factor de intensidad de tensiones. El valor del esfuerzo dependerá, en primer lugar, de la geometría de la muestra, su rigidez y la carga crítica bajo la cual se propaga la fractura.

Método de relajación de la carga: La velocidad de la fractura se puede obtener directamente de la tasa de relajación de la carga con un desplazamiento constante y la longitud de la entalla inicial (Ecuación 2). El experimento de relajación se puede realizar de manera muy simple en una máquina de desplazamiento constante. Se aplica una carga predeterminada P_i , a una alta velocidad de desplazamiento, de modo que no se produce una extensión significativa de la fractura antes de la relajación. Cuando se alcanza P_i , se detiene el desplazamiento y se sigue la relajación de la carga en el monitor. De esta manera, se puede obtener un amplio rango de velocidades de fractura en la misma muestra. Cuando se completa la relajación, la fractura se propaga a una alta tasa de desplazamiento (preferiblemente en ausencia del ambiente corrosivo) donde la fractura es completamente mecánica, es decir, $K_I = K_{Ic}$.

El diagrama completo de K_I vs V se obtiene así en una única muestra a partir de las mediciones de la relación carga / tiempo en desplazamiento constante, y la carga para una rápida propagación de la fractura. Ver sección “**RESULTADOS OBTENIDOS**” de este trabajo.

Preparación de las muestras: Las muestras a ensayar son delgadas, planas y rectangulares, siguiendo lo indicado por la Norma ASTM-D4543-08, donde estipula medidas de muestra como se indica en la siguiente Tabla:

	Sample 1	Sample 2
Length	63,5 - 70	100 -150:
Width	24,5 - 30	80 -100
Thickness	1,8 - 3	3 - 5

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional La Plata

INGENIERIA MECANICA

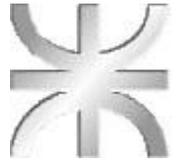
PRACTICA PROFESIONAL SUPERVISADA.

PABLO ALBARIÑO.

Calle 60 esquina 124 s/n.

La Plata - Buenos Aires - Argentina

Tel: +54-221-421-7578 / +54-221-489-0421 / 482-4855



Los ensayos a realizar son en muestras de vidrio plano, a las cuales se les practica una ranura longitudinal para el direccionamiento de la propagación de la fractura. Se utiliza vidrio ya que es un material bien caracterizado y homogéneo. Con la información a obtener se puede realizar la verificación del equipo fabricado e instalado en el laboratorio.

PROCESO DE ENSAYO

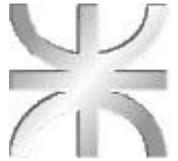
Realización del Ensayo: Después de preparada la muestra, se monta en la mesa de trabajo. Para este momento ya se cuenta con el dispositivo armado, alineado y la prensa en funcionamiento. Durante esta parte del proceso, se verifica que las muestras siempre se coloquen correctamente en los soportes para realizar los ajustes respectivos antes de comenzar la prueba.

La técnica de relajación de carga se emplea comúnmente para obtener indirectamente el comportamiento de propagación de fracturas subcríticas de materiales frágiles. De acuerdo con esta técnica, una muestra de ensayo de doble torsión previamente entallada se carga por debajo de la carga de fractura esperada ($0,90-0,95 \cdot P_{IC}$). La celda de carga de la máquina de prueba se mantiene luego en una posición fija y el aumento en el cumplimiento de la muestra de prueba del crecimiento de fracturas subcríticas conduce a una relajación de la carga con el tiempo.

En principio, la curva $V-K_I$ completa se puede obtener a partir de un experimento de relajación de carga única. Sin embargo, en la práctica, esta metodología funciona mejor a tasas de crecimiento de fractura relativamente más altas ($> 10^{-6}-10^{-7}$ m/s) debido a las fluctuaciones de temperatura que afectan las mediciones de carga a velocidades muy bajas. Este método también es susceptible a factores externos, como la relajación del tren de carga.

Durante la prueba, se observa que la muestra siempre comienza a resquebrajarse en el punto más débil que es la muesca hecha en la muestra.

La ventaja de este método es que solo requiere un ensayo para monitorear la disminución de la carga con el tiempo para medir tanto el factor de intensidad de tensiones K_I como la velocidad V de crecimiento de fractura subcrítica, sin necesidad de medir la longitud de la fractura durante la prueba. La muestra entallada se carga a una velocidad de desplazamiento constante de $5 \cdot 10^{-6}$ in/seg durante las pruebas de relajación de carga de desplazamiento constante en primer lugar, y el desplazamiento de la muestra se mantiene constante cuando la carga llega al 95% de la carga crítica y se realiza la prueba de relajación. Los datos del tiempo de carga se registran hasta que la relajación de la carga se estabiliza.



ANÁLISIS DE DATOS

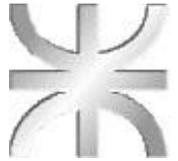
Validación: Se pretende justificar el correcto desempeño del dispositivo, y la confiabilidad del ensayo realizado, a través de la comprobación de los resultados y su comparación con otros realizados al momento.

Deducción de la fórmula P(t): Si bien ya se demostró al principio como es su deducción, es necesario aclarar que esta expresión se obtiene a fin de eliminar la dispersión en los datos obtenidos luego del ensayo. Esto se debe a que si solo se tiene una “sábana de datos” correlacionados entre sí, no es correcto volcarlos luego en las expresiones de K_i y V . Además si no se cuenta con una función temporal de P , no es posible tampoco obtener su derivada temporal [$P'(t)$].

Por lo tanto la expresión a la cual debemos llegar es la 3.8:

$$P = \frac{P_i}{\left[1 - (n + 1) \cdot (P'_i / P_i) \cdot t\right]^{1/(n+1)}} \quad (8)$$

Ahora bien, se desconocen los valores de P_i , P'_i , n . Estos son propios de cada ensayo, ya que cada uno tendrá su curva de relajación. Dicho esto, es necesario realizar el ajuste entre los datos del ensayo y la expresión de $P(t)$



Datos Obtenidos del Ensayo:

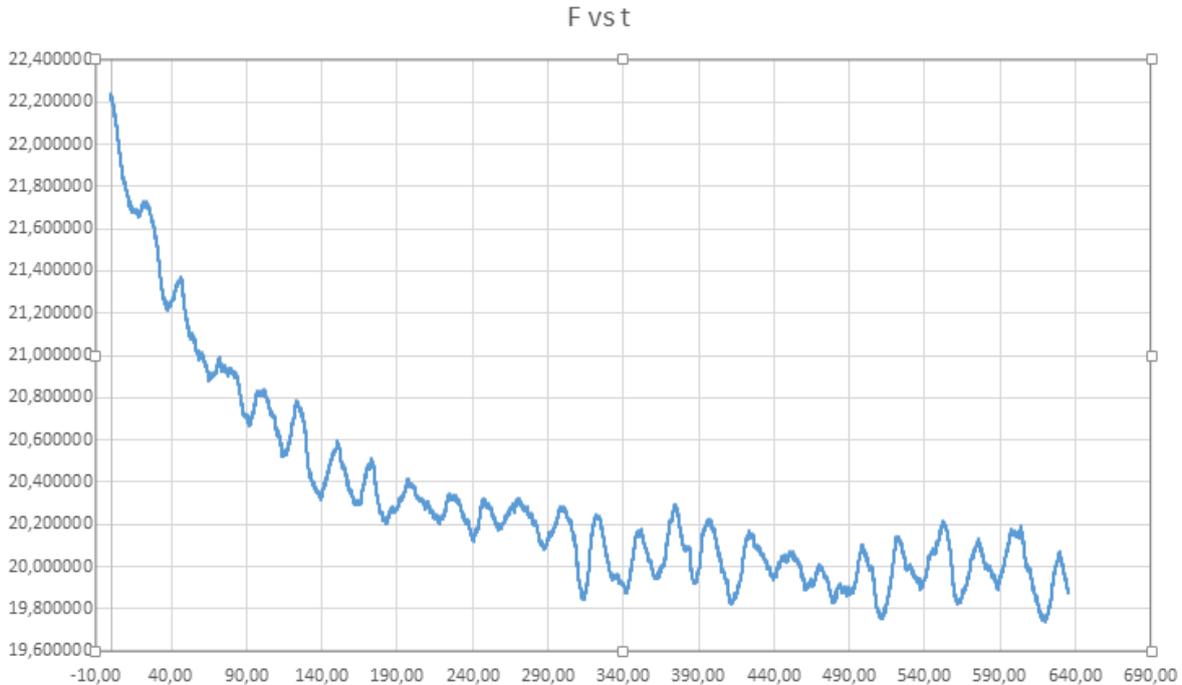


Fig. 5: Relajación de la carga en función del tiempo. Datos obtenidos de ensayo

Como puede observarse, la curva de relajación de carga, tiene mucha dispersión, por lo que es necesario su ajuste.

Ajuste de Datos Obtenidos, a la Curva P(t): Para realizar el ajuste, se utiliza cualquier herramienta informática adecuada, esto es, un software que permita realizar dicho ajuste de manera matemática, pero que además permita su visualización gráfica.

Se opta entonces por recurrir al programa **EXCEL**.

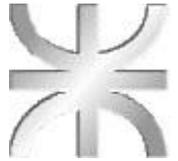
Ajuste de datos utilizando Excel.

Se debe confeccionar la siguiente planilla: (ver figura 6)

Paso 1: Ingresar los datos. En este caso los datos obtenidos del ensayo. Siempre es útil etiquetar los datos, para que pueda realizar un seguimiento de sus manipulaciones con la mínima confusión. (en el ejemplo de la figura, columnas A y B)

Paso 2: Definir el modelo / fórmula para el ajuste. En este caso la expresión de P(t) (la Ecuación 8)

La fórmula tiene tres parámetros, P_i , P'_i , n , que se utilizarán para "ajustar" los datos utilizando el Solver en Excel. Creamos una línea donde se enumeran estos parámetros. (Celdas F2, G2, H2 respectivamente)



Paso 3: Usar el modelo con la primera estimación de los valores de los parámetros (1, 1 y 1 por ejemplo) para calcular un valor de distancia en los valores de tiempo dados en los datos iniciales (Celda C5). Se realizó un gráfico que muestra los valores experimentales y de **modelo** de la distancia. Luego, es posible comenzar a desarrollar una buena estimación inicial de los valores de los parámetros utilizados en el Solver.

Una vez que se define el modelo $[P(t)]$ y se calcula el valor de la distancia para el valor de tiempo inicial, se copia y pega la fórmula en las celdas restantes de la columna (columna C). Esta debe calcular correctamente los valores de 'modelo' apropiados.

Paso 4: Calcular el error entre los valores del modelo y los valores de los datos (verdaderos). Copiar y pegar en las celdas restantes (columna D)

Paso 5: Calcular el cuadrado del valor de error: La fórmula para el **error cuadrático** en la celda "E5" se escribe como: " $=E5^2$ " Esta fórmula se copió en las celdas restantes de esa columna.

Paso 6: Crear un gráfico que muestre tanto los datos como los valores del modelo.

Se puede usar esto para ajustar los parámetros del modelo para desarrollar una buena estimación inicial para el Solver.

Paso 7: Calcular la suma de los términos de error cuadrático. Realizar la suma del rango o en este caso la columna de error cuadrático (Celda K2).

Paso 8: Utilizar el Solver para minimizar la suma de los términos de error cuadrático variando los valores de los parámetros del modelo. El comando **Solver** se encuentra en **Herramientas** en la barra de menú. Si el Solver no está incluido en la lista de Herramientas, se tendrá que agregar.

Cuando se abre la herramienta de resolución, se observa un cuadro titulado "Parámetros de resolución":

- El primer campo se debe hacer referencia al valor que está intentando optimizar: en este caso, la suma de los términos de error al cuadrado (K2).
- El segundo campo es una entrada de burbuja para lo que quiere hacer, en este caso "Mín.", Para MINIMIZAR
- El tercer campo identifica las celdas que desea ajustar para minimizar su celda objetivo: estos son los parámetros del modelo o celda (rango F2:H2).

Luego, pulsar el botón **Resolver**: aparecerá la conexión optimizada.

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional La Plata

INGENIERIA MECANICA

PRACTICA PROFESIONAL SUPERVISADA.

PABLO ALBARIÑO.

Calle 60 esquina 124 s/n.

La Plata - Buenos Aires - Argentina

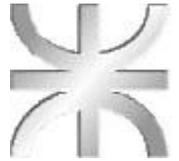
Tel: +54-221-421-7578 / +54-221-489-0421 / 482-4855



La planilla confeccionada y los parámetros arrojados por el Solver, se muestran a continuación:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		P_i			parámetros	P_i	P_i'	n			
2	$P = \frac{P_i}{\left(1 - (n+1) \cdot \left(\frac{P_i'}{P_i}\right) \cdot t\right) P^{\frac{1}{n+1}}}$					22,536329	-0,16273202	40,0496875		suma de e^2	476,208044
4	Time (s)	F (lb)	P (lb)	error [P-F]	error cuadrático						
5	0,01	22,238520	22,5347046	0,296185	0,087725						
6	0,02	22,236510	22,5330846	0,296575	0,087957						
7	0,04	22,236940	22,5298594	0,292919	0,085802						
8	0,06	22,236810	22,5266534	0,289843	0,084009						
9	0,08	22,234270	22,5234665	0,289196	0,083635						
10	0,10	22,229960	22,5202984	0,290338	0,084296						
11	0,12	22,227770	22,517149	0,289379	0,083740						
12	0,14	22,222250	22,514018	0,291768	0,085129						
13	0,16	22,220960	22,5109052	0,289945	0,084068						
14	0,18	22,215980	22,5078104	0,291830	0,085165						
15	0,20	22,213210	22,5047334	0,291523	0,084986						
16	0,22	22,214230	22,501674	0,287444	0,082624						
17	0,24	22,214810	22,4986319	0,283822	0,080555						
18	0,26	22,212180	22,4956071	0,283427	0,080331						
19	0,28	22,213660	22,4925993	0,278939	0,077807						
20	0,30	22,216250	22,4896083	0,273358	0,074725						

Fig. 6: Planilla Excel para el ajuste de curva de relajación de carga



RESULTADOS DEL AJUSTE

Finalmente, el gráfico con la curva de ajuste se presenta a continuación (la línea celeste representa $F(t)$, la línea naranja representa $P(t)$):

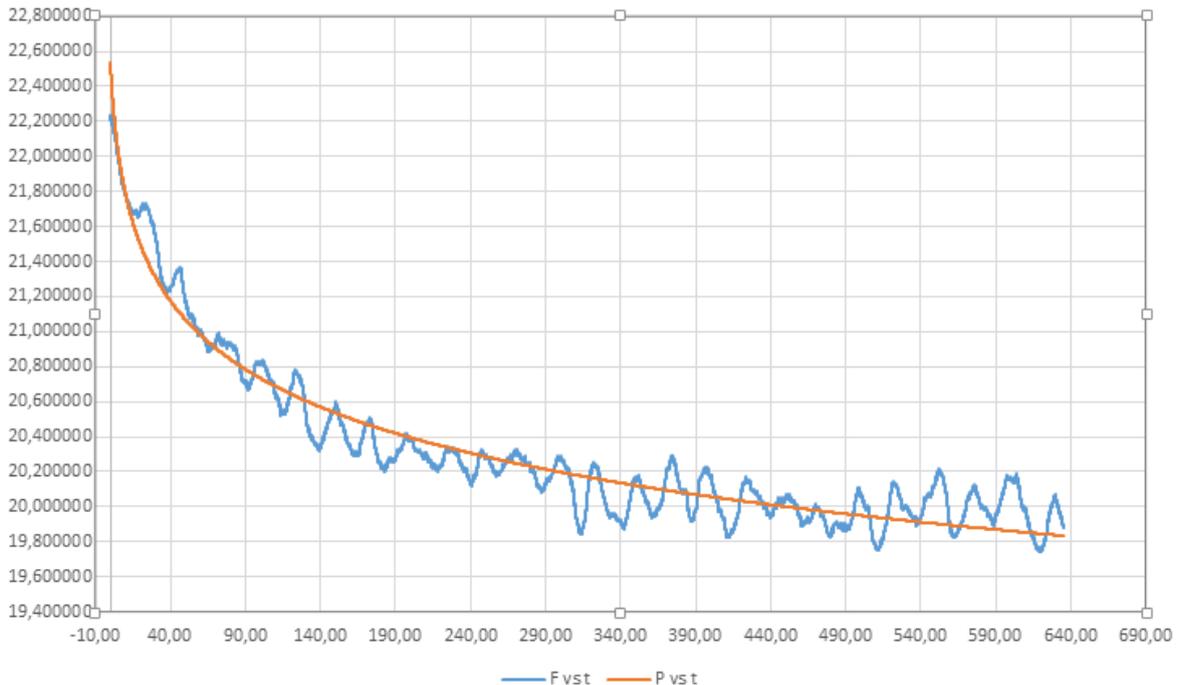


Fig. 7: Detalle del ajuste realizado, donde $F(t)$ es la curva del ensayo, y $P(t)$ es la curva suavizada resultante

A continuación se deben obtener las expresiones de K_i y V

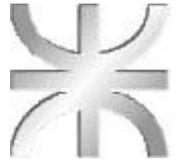
Para ello se elaboró otra planilla en Excel, a fin de copiar los valores de la carga P y obtener los correspondientes de K_i y V , todo esto en función del tiempo. Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

$$K_i = P * W_m * \left[\frac{3(1 + \nu)}{W * d^3 * dn} \right]^{1/2}$$

$$V = \frac{da}{dt} = - \frac{W * d^3 * E * y}{6 * W_m^2 * P^2 * (1 + \nu)} * \frac{dP}{dt}$$

Cálculo de la derivada temporal de $P(t)$: $P'(t) = dP/dt$

$$P' = \frac{dP}{dt} = (-P_i') * [1 - (n + 1) * \left(\frac{P_i'}{P_i} \right) * t]^{-(\frac{n+2}{n+1})}$$



Datos para el material ensayado (vidrio):

MODULO DE YOUNG: • 720.000 Kg/cm2

COEFICIENTE DE POISSON • Varia entre 0.22 y 0.23

W (ancho de muestra): 60mm para muestras grandes, 30mm para muestras chicas.

Wm (brazo de torsión): 27mm para muestras grandes, 14mm para muestras chicas.

D (espesor de muestra): 5mm para muestras grandes, 2mm para muestras chicas.

Dm (espesor menos ranura): 4,98mm para muestras grandes, 1,98mm para muestras chicas.

La planilla elaborada queda de esta manera:

t [seg]	t [seg]	P [N]	P' [N/s]	W [m]	Wm [m]	v (coef de poisson)	d [m]	ds [m]	E (mod de Young) [N/m2]	y (despl. vert.) [m]	KI [MNm ^{-3/2}]	V [m/s]	Log KI	Log V
424,51	0,00	40,5390498	238,80238312857100	0,03	0,014	0,225	0,002	0,0019	70560000000	0,0000391668	1,611194055	0,06690153	0,20714785	-1,17456398
424,53	0,02	38,3417011	6,59998179775456	0,03	0,014	0,225	0,002	0,0019	70560000000	0,0000391668	1,523862086	0,00206702	0,18294566	-2,68465552
424,55	0,04	37,9335699	3,31327372312675	0,03	0,014	0,225	0,002	0,0019	70560000000	0,0000391668	1,507641218	0,00106012	0,178298	-2,97464562
424,57	0,06	37,694672	2,20584064611017	0,03	0,014	0,225	0,002	0,0019	70560000000	0,0000391668	1,498146399	0,00071476	0,17555425	-3,14584131

Fig. 8: Planilla Excel, para obtener KI y V

RESULTADOS OBTENIDOS

Finalmente se grafican los datos de KI; Log KI; V; Log V, a fin de analizar lo ensayado.

Gráficos Obtenidos:

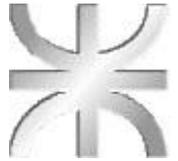


Diagrama para la relación entre V y Ki para vidrio

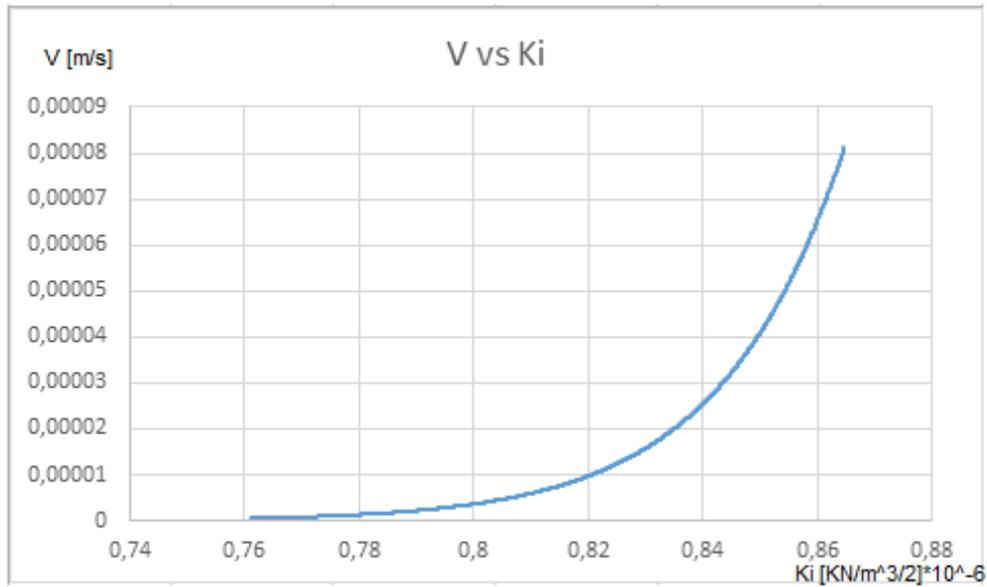


Fig. 9 : Diagrama V vs Ki para vidrio

Diagrama para la relación entre Log V y Ki para vidrio:

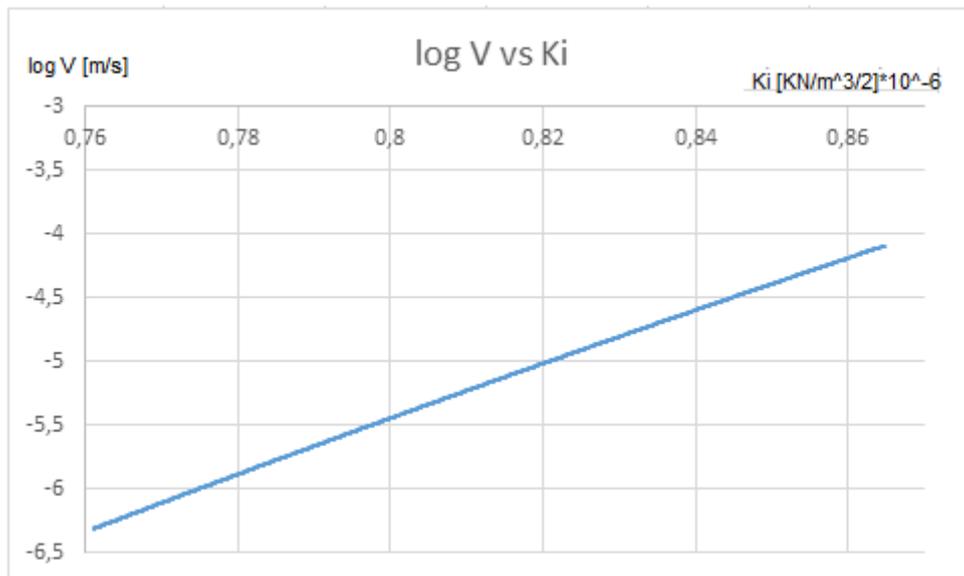


Fig. 10: Diagrama Log de V vs Ki para vidrio

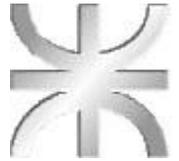


Diagrama para la relación entre Log V y Log KI para vidrio:

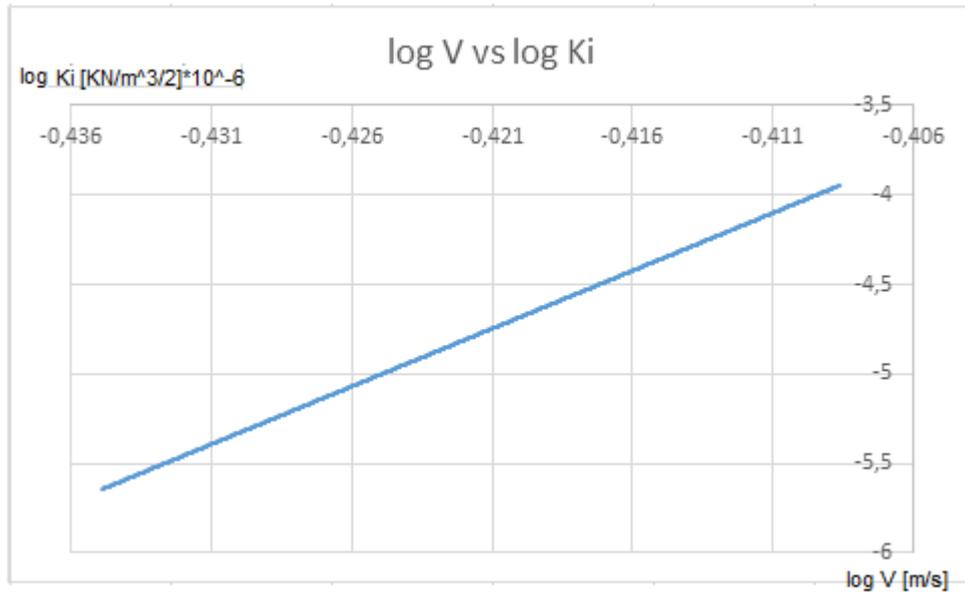


Fig. 11: Diagrama Log V vs Log Ki para vidrio

Comparación con otros Materiales:

El diagrama que se observa a continuación se extrae del artículo de Cao Ping, y se realizó para cuatro rocas diferentes: Mineral, Lertzolita, Mármol, Granito (grupos 1, 2, 3, 4 respectivamente)

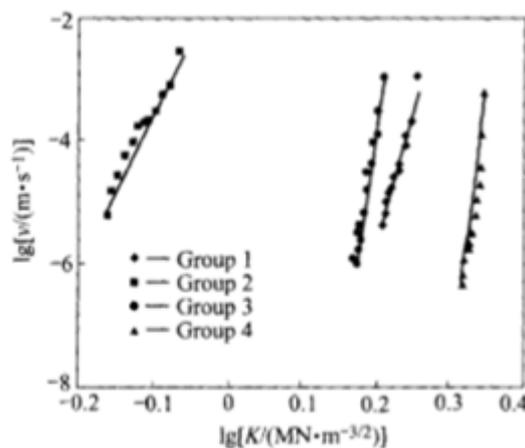
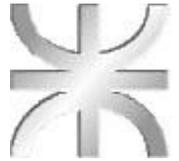


Fig. 12: Diagrama obtenido de CAO (2006)

A continuación se transcribe en un único diagrama, el diagrama anterior conjuntamente con la correspondiente curva para vidrio, a fin de evidenciar que entre otras cosas lo obtenido está dentro del rango adecuado, y si bien no se tiene la curva para vidrio de antemano, se deduce que ésta se encuentra dentro del rango de los demás materiales. Además se comprueba que al poseer el Vidrio un E más elevado que el resto de los



materiales, su curva se encuentra en la zona inferior y a la izquierda, cumpliendo con lo que se explicó anteriormente sobre la influencia del E en el diagrama.

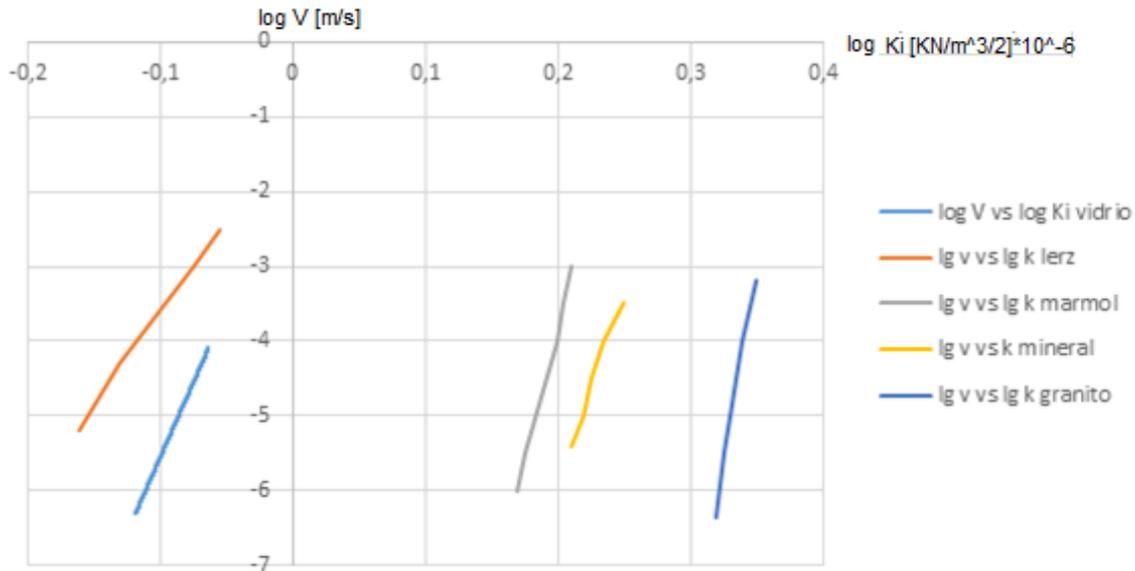


Fig. 13: Diagrama Log V vs Log Ki para varios materiales

CONCLUSIONES

Se realizó satisfactoriamente el diseño, fabricación, montaje, ensayo, y validación del dispositivo para ensayos de doble torsión. Los resultados permiten ahora, poder realizar ensayos con muestras de geomateriales, es decir, ensayar con muestras de formaciones y yacimientos reales. Esto es de un valor muy grande, ya que con este simple ensayo, se obtiene mucha información.

Luego de la realización de varios ensayos en vidrio sin atacar, tanto en muestras grandes como en muestras chicas, se obtuvieron seis ensayos satisfactorios. El hecho de ensayar varias veces y que muchas resulten erróneas sirve para encontrar una técnica adecuada y precisa en la realización del ensayo, ya que no se cuenta con la experiencia necesaria en estos ensayos y por otra parte la regulación de la aplicación de la carga no es automático si no que se modifica en la computadora que controla a la prensa uniaxial.

Queda por delante, perfeccionar la técnica del ensayo a fin de aumentar la precisión y confiabilidad del ensayo.

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional La Plata

INGENIERIA MECANICA

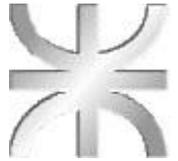
PRACTICA PROFESIONAL SUPERVISADA.

PABLO ALBARIÑO.

Calle 60 esquina 124 s/n.

La Plata - Buenos Aires - Argentina

Tel: +54-221-421-7578 / +54-221-489-0421 / 482-4855



RELACIÓN DEL PROYECTO CON LAS MATERIAS DE LA CARRERA

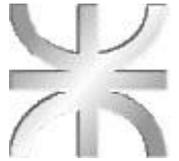
El trabajo realizado se relaciona íntimamente con varias materias cursadas en la carrera de Ing. Mecánica de la UTN FRLP, siendo éstas en realidad, la base para el desarrollo de este ensayo, ya que lo aprendido durante la carrera, sirve fundamentalmente para desarrollar un criterio y sentido común indispensable para sortear los distintos obstáculos que se presentaron a lo largo de todo el trabajo. Por citar algunas tenemos *Geomecánica de Reservorios*, fundamental, ya que en esta materia se adquirió los conocimientos sobre mecánica de rocas.

También se relaciona con *Materiales Metálicos*, para la elección de los materiales con los que se fabricó el dispositivo, teniendo en cuenta esfuerzos, y por sobre todo ambiente corrosivo. Claramente también, la técnica utilizada es capaz de analizar la propagación de fracturas en materiales metálicos.

Para el análisis de datos y la validación se vincula directamente con *Fundamentos de Informática*, ya que aquí se adquirió el conocimiento en manejo del software utilizados en este trabajo.

Por otra parte, toda la bibliografía de la que se vale este trabajo, está en inglés por lo que indefectiblemente es necesario comprender el idioma, por lo tanto se necesita de *Inglés I y II*.

Finalmente para la aplicación de normativa y metodología de ensayo, se relaciona con la materia *Mediciones y Ensayos*.



REFERENCIAS

- Ajuste de curva en Excel
<https://web.nmsu.edu/~snsm/classes/chem435/Assignment/fitting.html>
- A. G. Evans. (1972). "A method for evaluating the time- dependent failure characteristics of brittle materials- and its application to polycrystalline alumina."
- K.W. Kwok, R.H.C. Wong & K.T. Chau. "Subcritical crack growth of rocks using the double torsion method with consideration of the crack length"
- Jon E. Olson, Larry W. Lake & Steve E. Laubach. (2004). "
- A. Shyam & E. Lara Curzio. (2006). "The double- torsion testing technique for determination of fracture toughness and slow crack growth behavior of materials: A review"
- P. J. Diaz, J. M. Carvajal & M. F Palencia Muñoz (2011). "Double torsion testing machine to determine the subcritical fracture index in rocks."
- CAO Ping, Jiang-Teng, YUAN Hai-Ping "Testing study of subcritical crack growth rate and fracture toughness in different rocks."