



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

El criterio de rotura de Úcar: Aplicaciones en geología estructural e ingeniería geológica

The Úcar failure criterion: Applications in structural geology and geological engineering

Autora

Vanessa Cordón Aurín

Directores

Luis Arlegui Crespo y José Luis Simón Gómez

Grado en Geología

2023



Facultad de Ciencias
Universidad Zaragoza

Índice

Acknowledgments	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	4
OBJETIVOS DEL PRESENTE ESTUDIO	4
MODELOS DE ROTURA Y SU IMPLICACIÓN EN LA INGENIERÍA GEOLÓGICA.....	5
CRITERIO DE HOEK – BROWN	5
CRITERIO DE ROBERTO ÚCAR.....	6
METODOLOGÍA	7
METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL ÁREA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	8
METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL ÁREA DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL	12
RESULTADOS: VALIDACIÓN DEL CRITERIO DE ROBERTO ÚCAR	15
SENSIBILIDAD DEL CRITERIO DE ROBERTO ÚCAR.....	18
DISCUSIÓN	19
IMPLICACIONES DEL USO DEL CRITERIO PROPUESTO POR ROBERTO ÚCAR EN EL ÁREA DE LA INGENIERÍA GEOLÓGICA.....	19
IMPLICACIONES DEL USO DEL CRITERIO PROPUESTO POR ROBERTO ÚCAR EN EL ÁREA DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL	20
CONCLUSIONES	23
BIBLIOGRAFÍA	23

Acknowledgments

Special thanks to my directors, Luis Arlegui and José Luis Simón, for all their support and work throughout this TFG, to Roberto Úcar, developer of the criteria on which this study is based, to my mother for her support to me in all my projects and to Gustavo, for his help in the preparation of the cores for the laboratory tests.

ABSTRACT

The failure criterion proposed by Roberto Úcar is a method used to evaluate the strength of the rock matrix through simple compressive and tensile strength tests. In this study, an analysis of its validation has been carried out through the comparison of this criterion with the currently most widely used failure criterion, the Hoek and Brown criterion, by means of an exhaustive statistical analysis.

After the validation of the breakage criterion proposed by Roberto Úcar as an alternative to the use of the Hoek and Brown criterion in the execution of geological engineering and civil construction projects, it was concluded that its use does not imply a loss in the quality of the results obtained, on the contrary, its use could mean an improvement of 0.51% in the accuracy of the data in comparison with the other criterion as well as a possible saving of 87.97% with respect to the funds allocated for the tests necessary for the mechanical characterization of the materials present in the building project due to the lack of need for the use of triaxial tests.

Likewise, its use in the field of structural analysis made it possible to define the intrinsic resistance line of Miocene limestones present in the Ebro basin and an analysis of the faults present in these materials.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

OBJETIVOS DEL PRESENTE ESTUDIO

Un criterio de rotura es una forma de definir el comportamiento de una roca en rotura mediante su estado de tensiones, en el caso de un material isótropo cualquier dirección es dirección principal, con lo que las tres tensiones principales se representan como σ_1 , σ_2 , σ_3 ([Ramsay, 1967](#)).

El ejemplo de criterio de rotura, posiblemente más conocido, es el criterio lineal de Mohr-Culomb donde se define el criterio de rotura en función de la tensión tangencial y la tensión normal en un plano mediante la siguiente ecuación: ([Ramsay, 1967](#)).

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- c es la cohesión
- φ es el ángulo de fricción
- τ es la tensión tangencial que actúa en el plano de rotura
- σ es la tensión normal que actúa en el plano de rotura

En base a esta ecuación se genera una envolvente que delimita los esfuerzos de rotura máximos que soportaría el material estudiado.

Sin embargo, hay que tener en consideración que este criterio es aplicable exclusivamente a suelos, el comportamiento en roca presenta un comportamiento no lineal, de modo que es necesario el uso de criterios no lineales para su modelización (como el criterio de Hoek y Brown o el criterio de Roberto Úcar).

El estudio que será presentado a continuación tiene como su principal objetivo analizar la validez del recién propuesto criterio de rotura definido por el profesor Roberto Úcar. Esto se

llevará a cabo a través de un análisis estadístico y comparativo que contrastará dicho criterio ([Úcar, 2021](#)) con el criterio predominante en la actualidad en ingeniería geológica, el criterio de [Hoek y Brown \(1980,2019\)](#).

Además, se abordarán detalladamente las implicaciones que este nuevo criterio tiene en los campos de la ingeniería geológica y el análisis estructural.

MODELOS DE ROTURA Y SU IMPLICACIÓN EN LA INGENIERÍA GEOLÓGICA

Los diferentes modelos de rotura de materiales consisten en la aplicación de enfoques tanto teóricos como empíricos con el fin de predecir y modelizar el comportamiento de los materiales una vez son sometidos a esfuerzos lo suficientemente grandes como para provocar su rotura o fractura.

Por un lado, los métodos empíricos proporcionan un valor de la resistencia del material intacto cuando éste es analizado en laboratorio frente a diferentes condiciones de esfuerzo ([González y Martínez, 2020](#)), algunos ejemplos de ello son el criterio de [Hoek y Brown \(1980, 2018\)](#), utilizado para evaluar y predecir la resistencia y deformación de rocas intactas bajo diferentes condiciones de carga o el criterio de Roberto [Úcar \(2021\)](#), utilizado para evaluar la resistencia de la matriz rocosa a través de ensayos de resistencia a la compresión simple y tracción ([Úcar, 2021](#)). Estos métodos son los analizados en el presente estudio.

Por otro lado, los modelos matemáticos permiten estimar la resistencia del material a través de una modelización numérica de diferentes leyes mecánicas aplicadas al sistema de esfuerzos ejercido, así como la consideración de los diferentes factores extrínsecos que pueden llegar a influir en el proceso (presencia de agua, porosidad del material etc.). Algunos ejemplos de ello son la teoría de elasticidad lineal o el criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb ([González y Martínez, 2020](#)).

Con relación a su implicación en la ingeniería geológica y edificación, cabe resaltar la importancia que cobran dichos métodos en áreas como la evaluación de estabilidad de taludes, presas, túneles y excavaciones o el asentamiento de cimentaciones.

Respecto a la evaluación de estabilidad de las estructuras geotécnicas mencionadas anteriormente, el previo análisis de las condiciones geomecánicas del área seleccionada con los modelos de rotura pertinentes permitirá la aplicación de una serie de factores de seguridad estandarizados dotando al sistema de integridad estructural frente a roturas ejercidas por fallas o diaclasas ([Fernández et al., 2018](#)).

Con relación al asentamiento de cimentaciones, conocer, predecir y modelizar el comportamiento mecánico de éstos ayuda a estimar cuantitativamente la cantidad de carga máxima que éstos van a poder soportar antes de ser afectados por procesos de deformación o fractura, poniendo en peligro la integridad de la estructura edificada sobre ellos ([Álvarez et al., 2019](#)).

CRITERIO DE HOEK – BROWN

Como ha sido previamente mencionado, el presente criterio se emplea con el propósito de predecir la resistencia y la deformación de rocas intactas bajo diferentes condiciones de carga. En el contexto actual, esta metodología es ampliamente utilizada en proyectos de ingeniería geológica y geotecnia.

La definición de este criterio se formula mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Ecuación 2

En la cual:

- σ_1 representa el esfuerzo principal mayor presente en el momento de la fractura.
- σ_3 corresponde al esfuerzo principal menor aplicado sobre la muestra.
- σ_c es la resistencia a compresión simple del material rocoso.
- Los términos m_b , s y a , son constantes que varían en función de las propiedades específicas de la roca y del macizo rocoso ([Hoek y Brown, 2018](#)).

Estas constantes intrínsecas al macizo rocoso engloban el nivel de fracturación que posee la roca, el grado de movilidad que poseen los bloques dentro del sistema y la litología constituyente del macizo. Esta última característica es particularmente relevante, ya que se encuentra estrechamente relacionada con el parámetro m_i , parámetro que se emplea para determinar la constante m_b ([Hoek y Brown, 1980](#)).

Desde 2019, los autores aconsejan la definición del parámetro m_i a través de una regresión lineal múltiple empleando varios ensayos triaxiales (ensayos donde el esfuerzo $\sigma_3 \neq 0$) y de compresión simple (donde el esfuerzo $\sigma_3 = 0$), correspondiente a una versión de ajuste del modelo, en vez de utilizar el criterio estrictamente litológico descrito anteriormente (el cual estaba normalizado mediante una tabla), correspondiente con la versión predictiva de este modelo.

CRITERIO DE ROBERTO ÚCAR

Las principales aplicaciones del nuevo criterio de rotura propuesto por Roberto Úcar son comparables a las ofrecidas por el criterio de Hoek y Brown. Sin embargo, su principal ventaja viene dada por la no obligatoriedad del uso de ensayos triaxiales para su definición, que como se desarrollará en el apartado de discusiones, supone un gran ahorro económico para la empresa encargada de la ejecución del proyecto ([Úcar, 2021](#)).

La génesis del desarrollo matemático de este criterio tiene como base el análisis de la envolvente ligada al criterio de Mohr-Coulomb. Esta envolvente proporciona la traza de la resistencia intrínseca del material estudiado, de tal manera que cualquier sistema de tensiones que sobrepase ese contorno provocará la fractura del material. Por lo tanto, la obtención de la ecuación que define esta envolvente (una ecuación cuadrática que toma la forma de una parábola en su versión canónica) permitirá la elaboración de un modelo de rotura del material ([Úcar, 2021](#)).

Este criterio propone la siguiente ecuación para relacionar los esfuerzos principales mayor y menor:

$$\bar{\sigma}_1 = k_1(\bar{\sigma}_3 - \xi) + k_2(\bar{\sigma}_3 - \xi)^{1/2}$$

Ecuación 3

En la cual:

- $\xi = (\sigma_t / \sigma_c)$; siendo σ_c es la resistencia frente a compresión simple y σ_t es la resistencia a tracción de la roca intacta.
- k_1 y k_2 son constantes dependientes del material estudiado

El procedimiento para obtener analíticamente los valores de k_1 y k_2 ha sido desarrollado mediante una exploración geométrico - analítica de las propiedades de la parábola mencionada anteriormente, aplicándose el concepto de *Latus rectum* (línea que conecta los dos puntos donde la curva y su directriz se intersecan), obteniéndose las siguientes expresiones ([Úcar, 2021](#)):

$$k_1 = \frac{-(1 + |\xi|) + \sqrt{(1 + 7|\xi|)(1 - |\xi|)}}{2|\xi|} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$k_2 = \frac{[\eta_m - k_1(-\xi_m)]}{\sqrt{-\xi_m}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde $\eta_m = \sigma_c$ y $\xi_m = (\sigma_t / \sigma_c)$

Aunque no es necesario contar con datos de ensayos triaxiales para aplicar este criterio, en caso de disponer de estos resultados, se puede realizar un ajuste del método mediante el empleo del análisis de regresión (correspondiente a la versión ajustada del modelo), la versión analítica correspondería a una versión predictiva de éste mismo.

METODOLOGÍA

El desarrollo metodológico de este estudio puede dividirse en dos enfoques bien diferenciados:

En primer lugar, se abordará el proceso empleado para analizar la validez del criterio de rotura propuesto por Roberto Úcar, además de la evaluación de sus repercusiones dentro del ámbito de la ingeniería geológica.

Por otro lado, se indagará en la metodología seguida para analizar las implicaciones que posee dicho método en el área del análisis estructural.

No obstante, es recomendable aclarar previamente algunos términos que pueden ayudar a la buena comprensión de esta metodología:

Ensayo triaxial: *Se trata de una técnica de laboratorio utilizada en la mecánica de suelos y la ingeniería geotécnica para evaluar las propiedades mecánicas un material bajo condiciones de carga específicas. En este ensayo, una muestra cilíndrica del material es sometida a esfuerzos de confinamiento controlados en tres direcciones perpendiculares entre sí* ([Kovari, 1983](#)).

Este procedimiento se encuentra regulado mediante la norma [UNE 22-950-4:1992](#): *Que describe tres tipos diferentes de ensayo de compresión triaxial cuyo objetivo es medir la resistencia de probetas cilíndricas de roca en función del confinamiento.*

Ensayo de compresión simple: Similar al ensayo triaxial, a diferencia de que, en este caso, la presión confinante es nula, permitiendo la expansión del material de manera lateral.

Este procedimiento se encuentra regulado por la norma [UNE-EN ISO 17892-7:2019](#): *Cuyo objetivo es establecer el método para medir la resistencia a la compresión uniaxial de una probeta de roca con forma cilíndrica regular, sin confinamiento.*

Ensayo de tracción directa: Este ensayo consiste en la aplicación gradual de una fuerza de tracción uniaxial a una probeta cilíndrica de dimensiones normalizadas, su objetivo es cuantificar la resistencia del material estudiado frente a cargas de tensión.

Este procedimiento aplicado en rocas no posee una regulación concreta, sino que se basa en la regulación existente para hormigones recogida mediante la norma [UNE-EN 14488-4:2006+A1:2008](#).

Según un estudio llevado a cabo por los autores Matthew A. Perras y Mark S. Diederichs, este ensayo se correlaciona mediante un factor dependiente, ligado a la litología estudiada, con el ensayo brasileño, ensayo que posee una mayor simplicidad de ejecución ([Perras y Diederichs, 2014](#)).

Ensayo brasileño: En este ensayo, la muestra cilíndrica se coloca entre dos placas planas de carga, y se aplica una fuerza de compresión en el centro de la muestra, perpendicular a la superficie de contacto de las placas, lo que equivaldría a un esfuerzo de tracción indirecto.

Este procedimiento se encuentra regulado mediante la norma [UNE 22-950-90](#): *que especifica el método para medir la resistencia a tracción uniaxial de probetas de roca*.

El procedimiento de los ensayos utilizados en el presente estudio se ha llevado a cabo bajo las recomendaciones de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, su desarrollo se indicará en el apartado: “Metodología seguida en el área de análisis estructural”.

METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL ÁREA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

El procedimiento llevado a cabo para el análisis de la validez del criterio de rotura propuesto por Roberto Úcar ha tenido un enfoque plenamente empírico y bibliográfico.

En primer lugar, como punto de partida, se realizó una búsqueda bibliográfica (teniendo como principal recurso la exhaustiva recopilación de bases de datos de ensayos triaxiales de [Sheorey \(1997\)](#) centrándose, por supuesto, en aquellos que cuentan con información de resistencia tensional, así como algunos trabajos más modernos como [Moshrefi et al. \(2017\)](#) o [Guo y Wang \(2020\)](#) que contienen una información similar.

A continuación, teniendo como referencia los datos experimentales, se implementaron las ecuaciones de [Úcar \(2021\)](#) y [Hoek y Brown \(2019\)](#) en hojas de cálculo preparadas ad hoc con el objetivo de predecir los diferentes valores de σ_1 (asociados a su respectivo σ_3), obteniendo los datos correspondientes a ensayos triaxiales sin necesidad de éstos y consiguiendo una idea avanzada del comportamiento de los diferentes materiales analizados frente a la rotura. Esta fase correspondería a la versión predictiva de los criterios, que en el caso del criterio de Hoek y Brown, implica el uso de una tabla de valores para el valor m_i definido en base a la litología estudiada. De este modo, se aplicó el criterio tal y como lo recomendaban los autores Hoek y Brown antes del 2019 cuando añadieron las correcciones en base a ensayos triaxiales.

Posteriormente, se aplicaron regresiones múltiples sobre los pares $\sigma_3 - \sigma_1$ mediante el uso de los datos de ensayos triaxiales procedentes de la bibliografía con el fin de obtener una versión ajustada de los criterios.

Así mismo, se realizaron gráficas $\sigma_3 - \sigma_1$ (ver figuras 1 y 2 y Anexo 2) para ilustrar de manera efectiva las interacciones entre los esfuerzos involucrados en el análisis.

El siguiente paso fue realizar un análisis estadístico en el que se estudió el margen de error entre los resultados obtenidos mediante la predicción de ambos criterios y los datos originales proporcionados por la bibliografía (dicho análisis se realizó mediante el complemento ANÁLISIS DE DATOS, disponible en las principales hojas de cálculo, como Excel o LibreOffice).

Como parámetros utilizados para evaluar este margen de error se han utilizado el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar de la regresión.

El coeficiente de determinación (R^2) es una medida que indica qué proporción de la variabilidad de la variable dependiente en un modelo de regresión lineal puede ser explicada por las variables independientes incluidas en el modelo. R^2 varía entre 0 y 1, donde 0 indica que el modelo no explica ninguna variabilidad y 1 indica que el modelo explica toda la variabilidad (Noval, 2010).

De acuerdo con su definición, el coeficiente de determinación R^2 se aplica específicamente a modelos de regresión lineal. Sin embargo, es importante destacar que los criterios de rotura estudiados (Hoek - Brown y Roberto Úcar) no poseen un comportamiento lineal de regresión. No obstante, diversos autores, como [Bineshian et al. \(2012\)](#), [Moshrefi et al. \(2017\)](#) o [Guo y Wang, \(2020\)](#), han empleado este parámetro en sus análisis de características similares. Por lo tanto, con el objetivo de facilitar la comparación con otros estudios, se ha optado por utilizar este parámetro, a pesar de que los criterios de rotura no se ajustan a un modelo de regresión lineal.

Para obtener un análisis estadístico completo, también se analizó el error estándar de la regresión, una medida que indica la dispersión de los valores observados con respecto a la línea de regresión en un modelo de regresión (cuantifica la cercanía de los datos reales a la línea de regresión generada), además, este parámetro cuenta con la ventaja de tener las mismas unidades que la variable independiente.

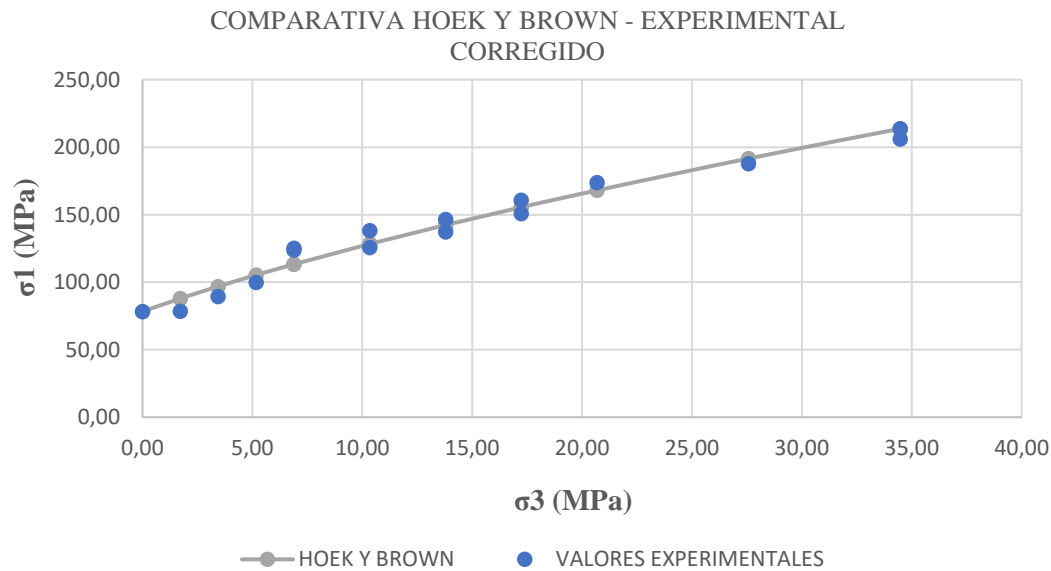
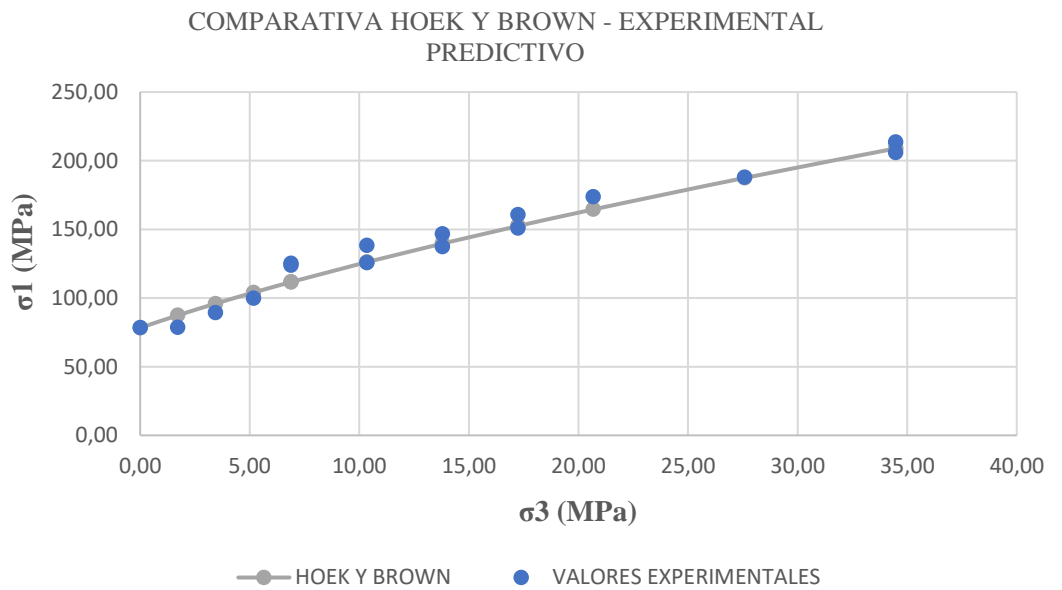
Tras este primer análisis finalizado, se procedió a realizar un ajuste de los criterios variando los parámetros determinantes de las ecuaciones, en el caso del criterio de Hoek y Brown se optimizó el parámetro m_i y en el caso del criterio de Roberto Úcar se rectificó el parámetro ξ , para ello se empleó el complemento SOLVER, disponible en las principales hojas de cálculo, como Excel o LibreOffice. Este complemento ajusta mediante un procedimiento iterativo los valores de una llamada “celda de variable de decisión”, en este caso se usó el valor de m_i para el criterio de Hoek y Brown y el de ξ para el criterio de Roberto Úcar, consiguiendo así que cumpla con los límites de las llamadas “celdas de restricción” y se obtenga el resultado deseado en la “celda objetivo” que en este caso consta de minimizar el sumatorio de los cuadrados de los errores residuales de la regresión.

Una vez obtenidos los nuevos resultados ajustados se siguió la misma metodología de análisis estadístico mencionada anteriormente, así como la generación de gráficos comparativos $\sigma_3 - \sigma_1$ (ejemplos en las figuras 1 y 2 y Anexo 2).

Tras la obtención de todos los datos del análisis se generó una tabla a modo de síntesis de toda la información (ver tabla 1 y anexo 1) para poder realizar una comparación de la precisión de ambos criterios. Además, se generó un gráfico comparativo de los ensayos requeridos para la elaboración del criterio de Roberto Úcar, esto con el fin de analizar la sensibilidad de dicho criterio frente a las diferentes variables (ver figura 6 presente en el apartado de resultados).

Para finalizar, las implicaciones del criterio propuesto por Roberto Úcar en el sector de la ingeniería geológica y la edificación civil son de carácter económico, derivadas de la reducción del precio del proyecto al no contar con la necesidad de realizar ensayos triaxiales (considerablemente más caros que otros ensayos como el ensayo de compresión simple o el ensayo brasileño). Para ello se ha realizado un análisis económico de un proyecto promedio obteniendo unos porcentajes de ahorro en el presupuesto de éste respecto a su ejecución mediante el criterio de Hoek y Brown.

Valor del coeficiente de
determinación $R^2 = 0,97171689408$
Valor del error estándar de la
regresión = 7,19404010617



Valor del coeficiente de
determinación $R^2 = 0,9722283804$
Valor del error estándar de la
regresión = 7,01157198891

Figura 1. Ejemplo del procedimiento seguido, en este caso aplicado a los datos de [\(Shah, 1992\)](#).

a) Modelo predictivo, de Hoek y Brown, usando un valor de m_i de 9 a partir de la carta de valores en función de la litología [\(Hoek & Brwon, 2019\)](#). b) Modo de ajuste, con SOLVER se ha optimizado el valor de m_i de modo que los errores residuales quedasen minimizados, el nuevo valor de m_i es de 9,624

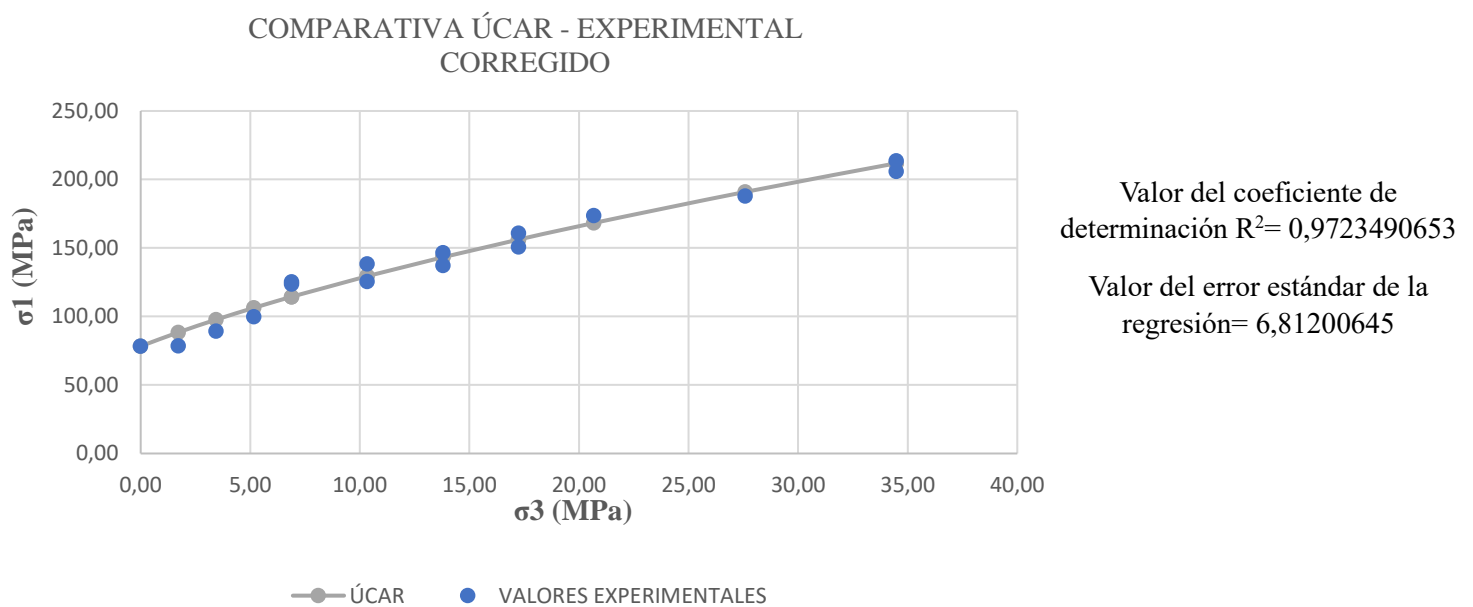
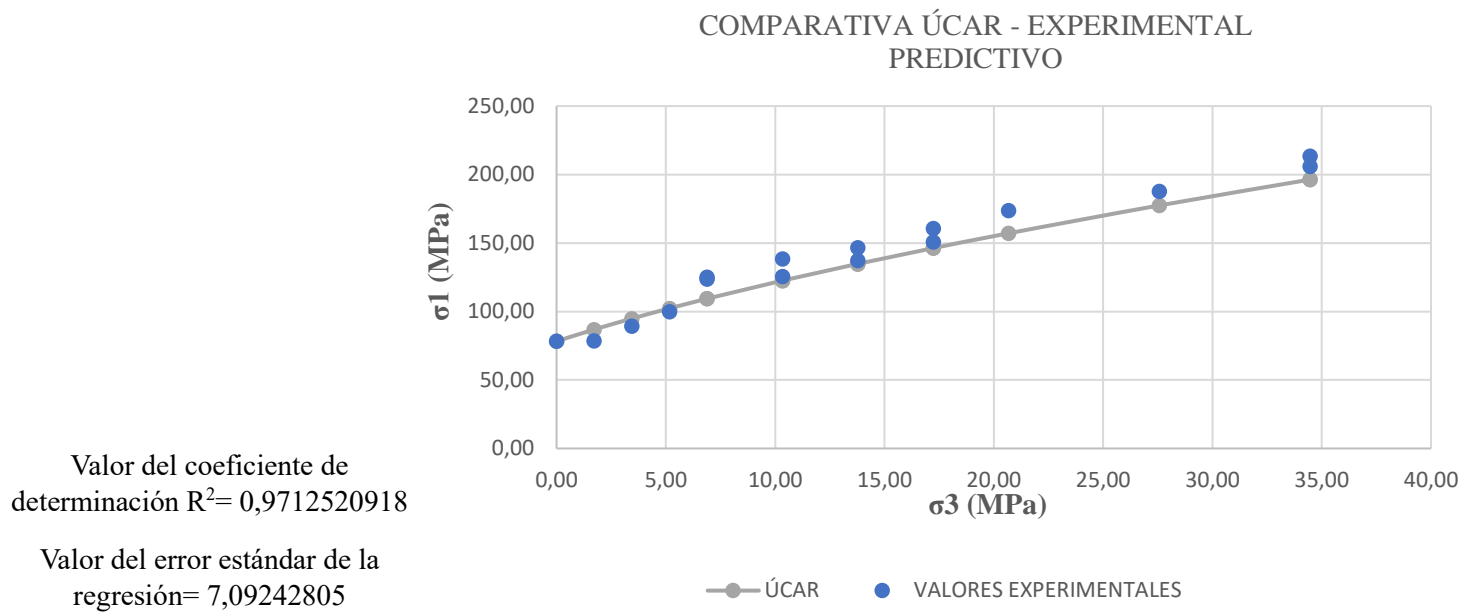


Figura 2 Ejemplo del procedimiento seguido, en este caso aplicado a los datos de (Shah, 1992). a) Modelo predictivo usando (Úcar, 2021) y b) modo ajuste de Úcar, variando el parámetro ξ .

METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL ÁREA DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Este estudio propone un análisis de las fallas presentes en las calizas miocenas de la cuenca del Ebro (contexto geológico desarrollado en el apartado de discusiones).

Las implicaciones en el área del análisis estructural atienden a que, a través de las ecuaciones derivadas del criterio de rotura propuesto por Roberto Úcar, se puede delimitar de manera gráfica la línea de resistencia intrínseca del material estudiado a través de una regresión de los diferentes pares $\sigma_3 - \sigma_1$ obtenidos mediante dicho criterio. La línea obtenida se representó en un gráfico $\sigma - \tau$ en superposición con un círculo de Mohr representativo del par de esfuerzos $\sigma_3 - \sigma_1$ que ocasionaron la generación de las fallas estudiadas.

Para llevar a cabo la representación mencionada previamente, han de conocerse diferentes parámetros de la litología estudiada: σ_c (resistencia a la compresión simple) y σ_t (resistencia a la tracción) así como el buzamiento de las estructuras que se van a analizar (con el fin de establecer el ángulo 2α , ángulo complementario al formado entre la normal al plano de rotura y σ_1 , y así poder comparar su valor entre las estructuras medidas en campo y el gráfico $\sigma - \tau$ obtenido).

Para la obtención de estos parámetros, en primer lugar, se realizó una salida de campo en el entorno de La Plana, estructura situada en el municipio de Cadrete, con el fin de medir datos de dirección, buzamiento y localización de las fallas generadas en las calizas a estudiar (ver datos en la tabla 4).

A continuación, se llevó a cabo una segunda salida de campo en el mismo entorno con el objetivo de recolectar muestras de unos 200 kg de estas calizas para posteriormente, poder realizar los ensayos pertinentes en el laboratorio (llevando a cabo la preparación de 45 probetas adicionales que se enviaron a la Universidad Politécnica de Valencia para efectuar ensayos triaxiales de cara a un futuro trabajo que ampliará los resultados de este TFG).

Una vez finalizado el muestreo, se realizaron ensayos en laboratorio de compresión simple y brasileño en la prensa de compresión simple (almacén de Geodinámica Interna, sótano del edificio de Geología) del Servicio de preparación de rocas y materiales duros (SAI de Unizar).

Ensayo de compresión simple: Para la realización de este ensayo se siguieron los siguientes pasos ([Bieniawski y Bernede, 1979](#)):

1. Preparación de la muestra: La muestra a ensayar debe estar normalizada, por lo que se generaron diez probetas cilíndricas de 54mm de diámetro y 12cm de longitud con ayuda de una perforadora hidráulica y una cortadora paralela (las superficies del cilindro deben ser planas y paralelas entre sí).
2. Comprobación del calibrado y el buen funcionamiento de la máquina de ensayo que se va a utilizar.
3. Inserción en la prensa: Se inserta la muestra en la prensa con las superficies del cilindro en contacta con las placas que ejercerán el esfuerzo compresivo.
4. Aplicación de la carga, se empieza el ensayo aplicando una carga a un ritmo pausado, que permita hacer las mediciones oportunas.
5. Medición de la fuerza ejercida y la deformación longitudinal: Con el fin de generar unas gráficas esfuerzo – deformación (ver figura 4) se llevó una medición del esfuerzo ejercido sobre la probeta y la deformación experimentada por ésta en cada ciclo de incremento de esfuerzo.

6. Anotación del punto de rotura: Se observa y anota el punto en el que la muestra se rompe por completo, este dato corresponde con la resistencia de esa muestra a la compresión simple.

Dicho procedimiento se llevó a cabo para las diez probetas a ensayar (ver figura 3a), los resultados de este ensayo y del posterior ensayo brasileño se pueden observar en la tabla 3a.

Ensayo brasileño: Para la realización de este ensayo se siguieron los siguientes pasos ([Bieniawski y Bernede. 1979](#)):

1. Preparación de la muestra: La muestra a ensayar debe estar normalizada, por lo que se generaron diez probetas cilíndricas de 54mm de diámetro y 1,8cm de longitud con ayuda de una perforadora hidráulica y una cortadora paralela (las superficies del cilindro deben ser planas y paralelas entre sí).
Para finalizar la preparación, se rodeó con cinta adhesiva el contorno de la probeta, éste paso está normalizado con el objetivo de permitir una distribución más homogénea de las fuerzas ejercidas en la superficie a ensayar.
2. Comprobación del calibrado y el buen funcionamiento de la máquina de ensayo que se va a utilizar.
3. Inserción en la prensa: Se sitúa el centro de la muestra perpendicular a la superficie de contacto de las placas (el contorno de la probeta debe encontrarse en contacto con las placas de la prensa).
4. Aplicación de la carga, se empieza el ensayo aplicando una carga a un ritmo pausado, que permita hacer las mediciones oportunas.
5. Anotación del punto de rotura: Se observa y anota el punto en el que la muestra se rompe por completo, este dato corresponde con la resistencia de esa muestra a la tracción indirecta.

Este procedimiento se llevó a cabo para las diez probetas a ensayar (ver figura 3b).

Una vez finalizada la obtención de datos de los ensayos, se generaron gráficas esfuerzo – deformación del material (ver figura 4) con el objetivo de caracterizar de manera visual el comportamiento de las calizas estudiadas ante el incremento de esfuerzo ejercido. También se calculó un promedio de resistencia a la compresión simple y tracción indirecta del material estudiado a través de las diez probetas, datos necesarios para el desarrollo matemático llevado a cabo en el cálculo de los diferentes pares $\sigma_3 - \sigma_1$ de los que se obtuvo la línea de resistencia intrínseca del material a través de regresiones múltiples.

En segundo lugar, se dedujo un posible par de esfuerzos $\sigma_3 - \sigma_1$ que fueran capaces de ocasionar la generación de las fallas estudiadas, en base a criterios bibliográficos y al desarrollo matemático implícito en el criterio de rotura de Roberto Úcar (los cálculos llevados a cabo tienen como base la suposición de un sistema horizontal, en el que la presencia de fallas conjugadas, según el modelo de fracturación de Anderson, conllevaría la posición de un σ_1 vertical, a priori, correspondiente con la carga litostática del medio).

Para finalizar, se generó un gráfico $\sigma - \tau$ que superponía el círculo de Mohr representativo del par de esfuerzos $\sigma_3 - \sigma_1$ que ocasionaron la generación de las fallas estudiadas con la línea de resistencia intrínseca del material. El ángulo 2α medido en ese gráfico se comparó con el ángulo 2α deducido de los datos de buzamiento medidos en campo.

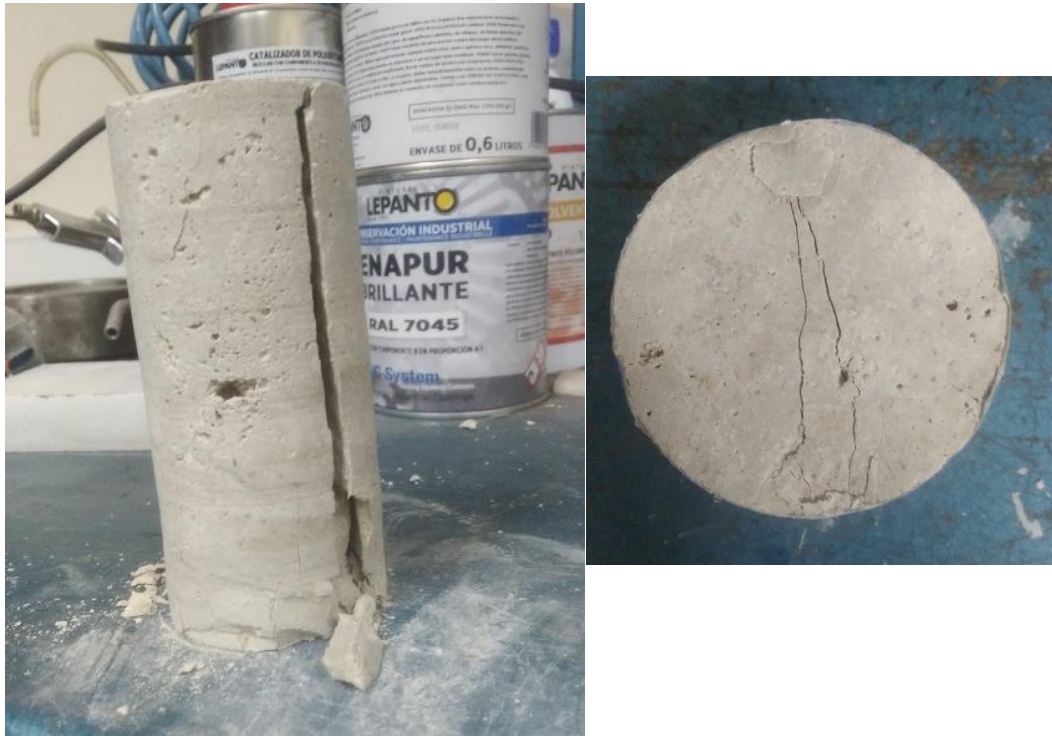


Figura 3a y 3b: Resultado visible en las probetas del ensayo a compresión simple y brasileño respectivamente

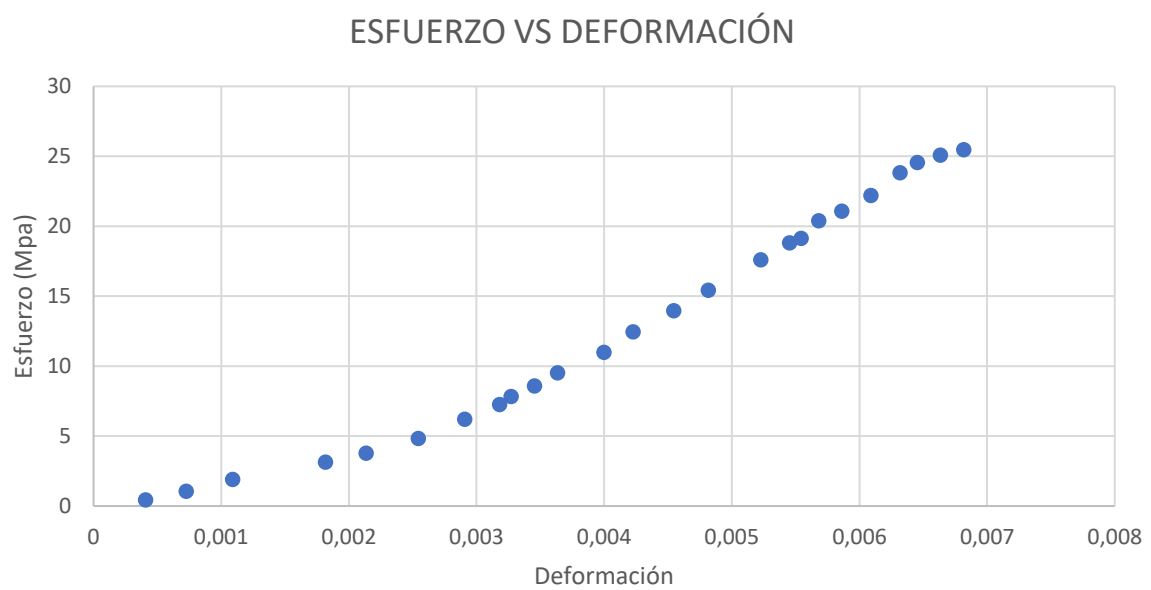


Figura 4: Ejemplo de gráfica Esfuerzo – deformación obtenida mediante un ensayo de compresión simple llevado a cabo en laboratorio

RESULTADOS: VALIDACIÓN DEL CRITERIO DE ROBERTO ÚCAR

A continuación, se presenta la tabla 1 que, por problemas de espacio, sólo incluye algunos de los resultados del análisis estadístico realizado sobre los ensayos obtenidos en la búsqueda bibliográfica. Para consultar la tabla completa (84 ensayos) con el análisis detallado ver anexo 1.

Ensayo	σ_c	σ_t	Úcar predicción	Úcar ajuste	H-B predicción	H-B ajuste	Úcar predicción	Úcar ajuste	H-B predicción	H-B ajuste	σ_t Ajustado	Δt	Úcar predicción normalizado	Úcar ajuste normalizado	H-B predicción normalizado	H-B ajuste normalizado
	Experimentales (MPa)		R ^ 2				Error típico (MPa)						Error típico			
Sheo_Barat_schist	92,9	-8,44	0,95829164	0,98180285	0,95846467	0,98067303	16,6386552	10,9902715	16,6041062	12,095374	-2,46	5,98	0,17910286	0,11830217	0,17873096	0,13019778
Sheo_Bet_1_2 cuarzodiorita	155,1	-12,3	0,97744367	0,96871107	0,97198243	0,96950341	9,47667017	9,83056559	10,561772	9,72024726	-4,85	7,45	0,06110039	0,06338211	0,06809653	0,06267084
Sheo_Bet_1_3 granito	223,9	-12,94	0,99994871	0,99957705	0,99900454	0,99976817	0,83917424	2,39167623	3,69697727	1,77443348	-8,5	4,44	0,00374799	0,01068189	0,01651173	0,00792512
Sheo_Bet_1_4 sandstone	145,8	-6,8	0,99942942	0,99942942	0,99864947	0,99953074	2,46192735	2,1673263	3,78766135	2,23603913	-6	0,8	0,01688565	0,01486506	0,02597847	0,01533635
Sheo_Bet_1_6 limestone	56,4	-5,4	0,98485565	0,98485565	0,98624417	0,98536735	7,30242269	7,99435206	7,23199897	7,87987841	-2,77	2,63	0,12947558	0,14174383	0,12822693	0,13971416
Sheo_Bet_1_7 gneiss	326,8	-15,9	0,94568099	0,94762096	0,95032594	0,94458011	12,9522381	13,5222592	12,6133625	13,6923097	-19,62	3,72	0,03963353	0,04137778	0,03859658	0,04189813
Sheo_Bet_1_8 granodiorita	83,3	-12,1	0,93164458	0,96016822	0,96515379	0,95729342	13,2643236	10,1254297	9,4705755	11,4610017	-3,67	8,43	0,15923558	0,12155378	0,11369238	0,13758706
Sheo_Bet_1_9 limestone	128,1	-9,4	0,97519287	0,97453928	0,97839848	0,97631747	10,0023257	10,2854215	9,33372248	9,94368987	-8,73	0,67	0,07808217	0,08029213	0,07286278	0,07762443
Sheo_Bet_2_0 cuarzodiorita	184,5	-14,9	0,93402531	0,9363837	0,91506891	0,94085807	11,8215302	9,76112489	13,4127665	9,45827743	-16,58	1,68	0,06407333	0,05290583	0,07269792	0,05126438
Sheo_Bet_2_1 gran. brecha	363	-17,8	0,98603605	0,98603605	0,98947737	0,98480214	0,99015267	5,0537278	4,20949236	5,28705804	-31,83	14,03	0,00272769	0,01392212	0,0115964	0,0145649
Sheo_Bet_2_1 gneiss	44,7	-16,6	0,85872025	0,91246531	0,92501039	0,905973	13,523104	10,6445312	9,85228513	12,4034954	-2,47	14,13	0,30253029	0,23813269	0,22040906	0,27748312
Sheo_Bet_2_3 diorita	58,8	-12,8	0,97900347	0,97948553	0,97711862	0,97978877	4,34842509	4,3358191	4,53940938	4,34522141	-5,55	7,25	0,07395281	0,07373842	0,07720084	0,07389832

Tabla 1: Resultados del análisis estadístico aplicado los criterios de rotura de Hoek – Brown y Roberto Úcar, desarrollados a partir de ensayos de compresión simple, triaxiales y brasileños extraídos del libro *Empirical rock Failure criterial. P.R Sheorey, 1997*

*Anotación I: Error estándar de la regresión = Error típico

*Anotación II: Los valores normalizados representan el valor original dividido entre el valor de σ_c , esto se realizó con el objetivo de poder realizar una comparativa entre las diferentes variables de los criterios más estricta

Para sintetizar los resultados mostrados en la tabla completa presente en el anexo 1 se muestra a continuación la tabla 2 que contiene un promedio de los valores estadísticos analizados (el coeficiente de determinación R^2 y el error estándar (en MPa) de la regresión) para la comparativa de los criterios de rotura de Roberto Úcar y de Hoek – Brown, tanto en su versión predictiva como en su versión ajustada mediante regresiones.

Media	R. ÚCAR Predicción	H-B Predicción	R. ÚCAR Ajuste	H-B Ajuste
R^2	0,964534424	0,95767511	0,966866578	0,959596821
Error estándar (MPa)	9,913293861	11,95430806	9,580433287	11,74978396

Tabla 2: Promedio de los parámetros estadísticos estudiados en el análisis del criterio de rotura de Roberto Úcar y en el criterio de Hoek y Brown

El razonamiento estadístico llevado a cabo mediante los datos mostrados en la tabla 2 es el siguiente:

Atendiendo a los valores del coeficiente de determinación de R^2 y teniendo en consideración que un valor de $R^2 = 1$ indica que el modelo explica toda la variabilidad, se puede observar una mejor predicción y ajuste a los valores experimentales por parte del criterio de Roberto Úcar. Así mismo, el incremento de mejora en el ajuste de éste a través de regresiones ha sido un 0,4% superior al ajuste mediante el modelo de Hoek y Brown. Aunque las mejoras son numéricamente marginales, merece la pena resaltar que el criterio de Úcar es consistentemente mejor que el de Hoek y Brown.

En adición, si se realiza una comparativa de los valores de R^2 otorgados por la versión predictora del criterio de Roberto Úcar frente a los valores proporcionados por el ajuste mediante el uso de ensayos triaxiales del modelo de Hoek y Brown se observa un valor de R^2 de 0,964534424 para el criterio de Roberto Úcar y un valor de 0,959596821 para el criterio de Hoek y Brown, lo que significa que, incluso en este escenario, el criterio de Roberto Úcar sigue mostrando una mayor calidad en sus resultados.

Por otro lado, los valores de error estándar de la regresión, que cuantifican el grado de dispersión del modelo respecto a los datos originales, son más positivos en el caso del criterio propuesto por Roberto Úcar (tanto en su versión predictiva como en su versión ajustada) ya que un valor más bajo conlleva una menor dispersión de los valores otorgados por el modelo. De este modo, se corroboran los datos obtenidos del análisis mediante el coeficiente R^2 .

Con todos estos datos, sería razonable suponer que el criterio de Roberto Úcar podría llegar a proporcionar una predicción del 0,51% más exacta que el método de Hoek y Brown en su versión de ajuste.

Dicha afirmación se puede observar gráficamente en la figura 5, donde se muestran unos histogramas que reflejan la variabilidad del coeficiente de determinación R^2 para diferentes ensayos analizados con ambos criterios (el de Roberto Úcar en su versión predictiva y el de Hoek y Brown en su versión ajustada).

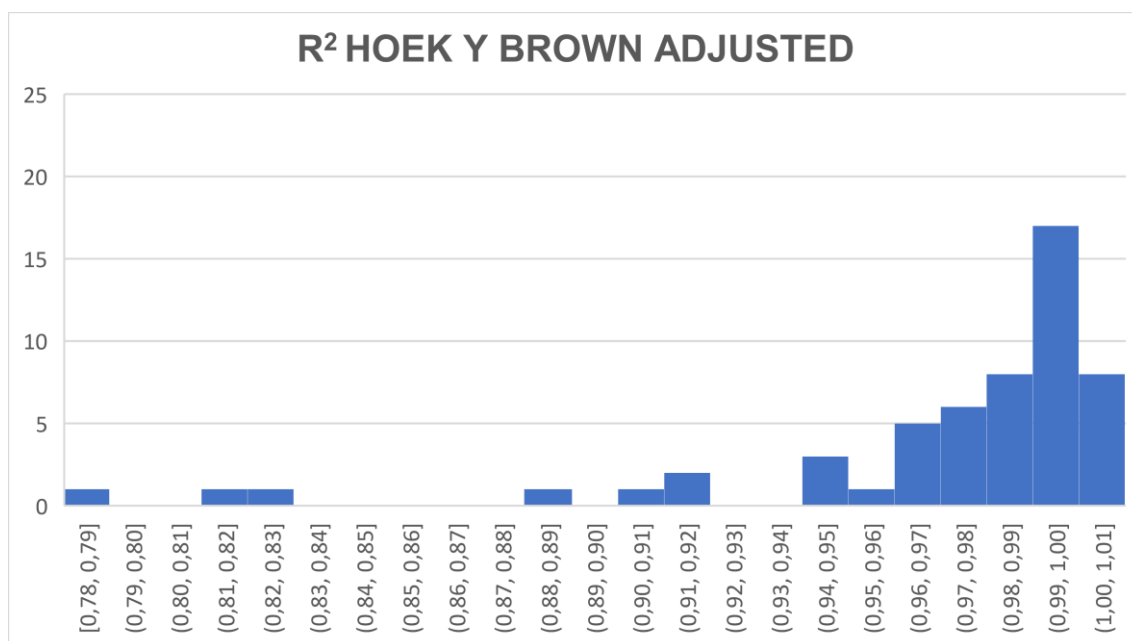
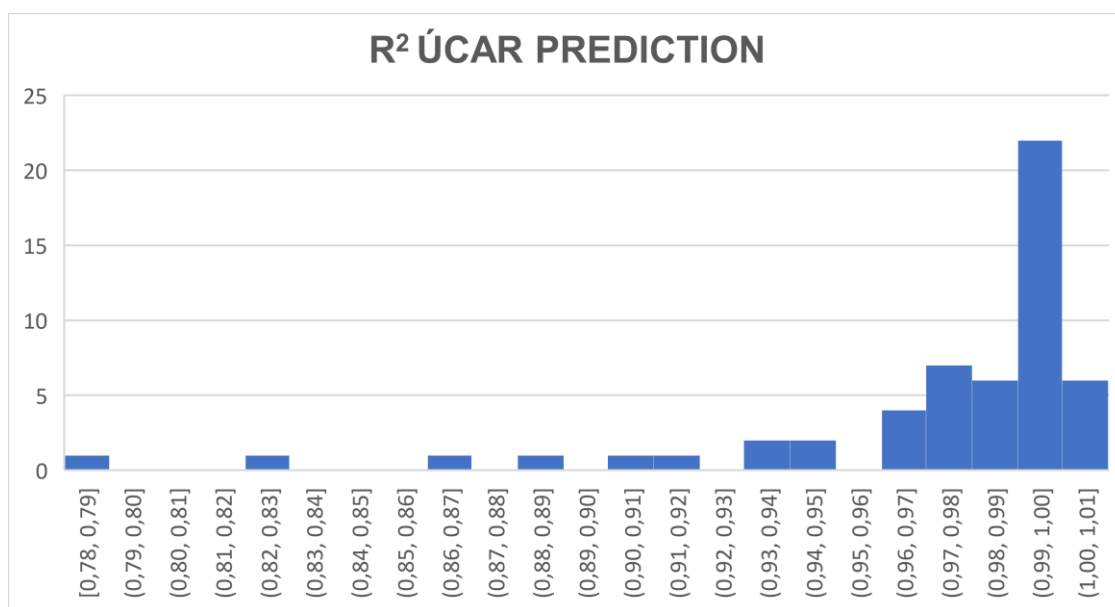


Figura 5: Histogramas representativos del valor del coeficiente de determinación R^2 para el criterio de Roberto Úcar en su versión predictiva y para el criterio de Hoek y Brown en su versión ajustada

Como se observa en la figura 5, en los histogramas representativo del criterio de Roberto Úcar y de Hoek y Brown, aparece una columna con un intervalo de valores comprendido entre el 1,00 y el 1,01, como se ha explicado anteriormente, el coeficiente utilizado proporciona unos resultados comprendidos entre 0 y 1, de modo que la presencia de esta columna en el histograma viene explicada por el redondeo de decimales que se ha considerado para la mejor comprensión del gráfico, realmente el término menor del intervalo se sitúa en el valor de 0,99916907 y todos los datos del análisis llevado a cabo son <1 .

Atendiendo al número total de ensayos que se sitúan en las últimas cuatro columnas del histograma, intervalo comprendido entre 0,97 y “1,01”, siendo éstos los valores que representan

la mejor coherencia del modelo con los datos experimentales, se observa que el Criterio de Roberto Úcar posee un total de 41 ensayos con estas características mientras que el modelo de Hoek y Brown muestra un total de 39 ensayos que cumplen éste requisito. Esta comparativa más visual avala la afirmación previa, el criterio de Roberto Úcar utilizado con finalidad predictiva podría poseer una mayor calidad que el modelo de Hoek y Brown tras haber pasado un proceso de rectificación (aunque la mejora es numéricamente marginal).

SENSIBILIDAD DEL CRITERIO DE ROBERTO ÚCAR

Una vez validado el criterio propuesto por Roberto Úcar, cabe analizar la sensibilidad de dicho criterio respecto a sus posibles variables.

Como se ha explicado en la introducción del presente estudio, las ecuaciones en las que se basa este criterio tienen como variables los términos k_1 , k_2 Y ξ . Las primeras variables son dependientes del parámetro ξ , siendo ésta la única variable independiente a analizar.

Ahora bien, como se ha mencionado anteriormente, el parámetro ξ se define como la relación existente entre la resistencia a la tracción simple y a la tracción indirecta de la roca, de modo que estos ensayos delimitan la posible sensibilidad del criterio.

Partiendo de la base que los resultados obtenidos por el criterio de Roberto Úcar se engloban en conjuntos de pares $\sigma_1 - \sigma_3$ y que un ensayo de compresión simple, medido de manera experimental, ejerce un esfuerzo $\sigma_3 = 0$, no es razonable pensar que el modelo presente una alta sensibilidad a dicho ensayo pues este primer par de valores $\sigma_3 = 0$, $\sigma_1 = \sigma_c$ (σ_c = resistencia a la compresión simple de la roca) no poseen un carácter predictivo sino experimental.

Teniendo en consideración este razonamiento, el único ensayo que podría tener un gran impacto sobre la correcta predicción de valores ofrecida por este criterio podría ser el ensayo de resistencia a la tracción (ya sea tracción convencional o ensayo brasileño). Para estudiar esta relación se ha generado un gráfico comparativo entre la variación de resistencia a la tracción obtenido tras un ajuste del criterio, $\Delta \sigma_t$ (en MPa) y el coeficiente de determinación R^2 utilizado en el análisis estadístico (ver figura 6).

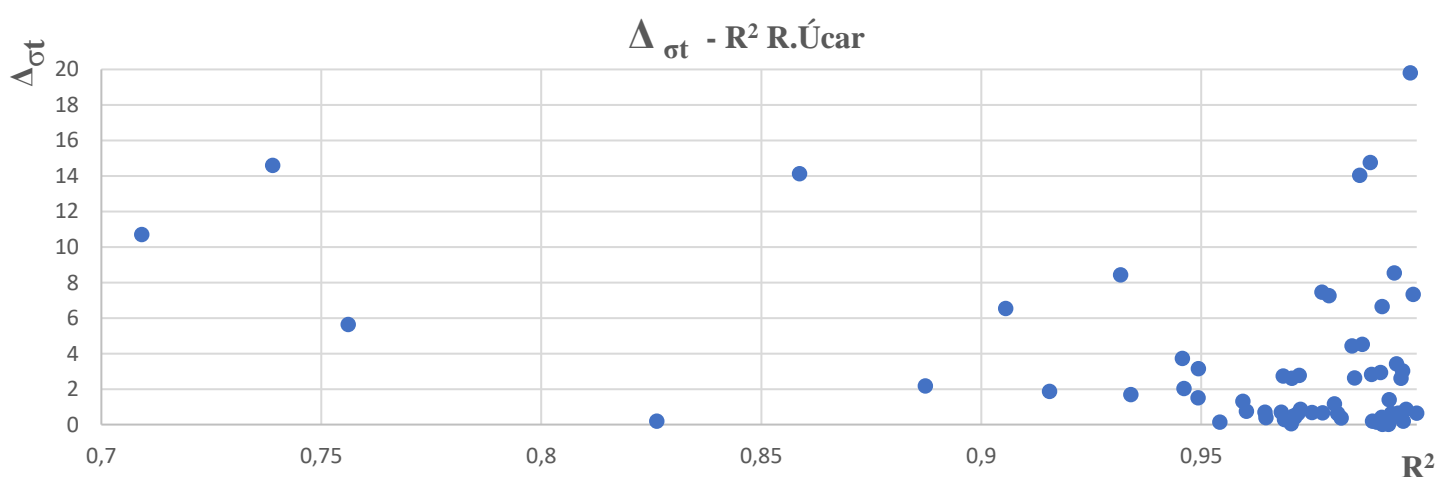


Figura 6: Gráfico comparativo $R^2 - \Delta \sigma_t$ del criterio de Roberto Úcar

Como se observa en la figura 6, existe una agrupación de datos en el área descrita por altos valores del coeficiente de R^2 (representación de una buena predicción del criterio) y un bajo incremento en la corrección al ensayo de tracción.

De esta relación cabría deducir que la mayoría de los ensayos a los que se les aplicó una corrección menor para valores experimentales de resistencia a la tracción obtuvieron mejores predicciones que otros ensayos con mayor corrección en este parámetro, por lo que se podría interpretar como una alta influencia del ensayo mencionado en la buena predicción de los valores obtenidos mediante el criterio de Roberto Úcar y, por lo tanto, una alta sensibilidad a éste.

Por otro lado, hay que tener en consideración que el ensayo brasileño no aporta unos valores exactos de resistencia a la tracción, sino que según los autores [Perras y Diderichs \(2014\)](#), existe un coeficiente que correlaciona el resultado obtenido mediante este ensayo y el valor exacto de tracción directa en función de la litología ensayada. Partiendo de esta afirmación, si los datos de resistencia a la tracción obtenidos mediante la búsqueda bibliográfica hubieran sido obtenidos como resultado de diferentes ensayos brasileños, el criterio propuesto por Roberto Úcar podría mejorar considerablemente su versión predictiva aplicándole la correlación al ensayo de tracción recomendada por los autores [Perras y Diderichs \(2014\)](#).

DISCUSIÓN

IMPLICACIONES DEL USO DEL CRITERIO PROPUESTO POR ROBERTO ÚCAR EN EL ÁREA DE LA INGENIERÍA GEOLÓGICA

Tras la validación del criterio de rotura propuesto por Roberto Úcar como una alternativa al uso del criterio de Hoek y Brown en la ejecución de proyectos de ingeniería geológica y edificación civil se desarrollará a continuación una reflexión acerca de las implicaciones que este cambio podría conllevar en las áreas mencionadas previamente.

En primer lugar, cabe destacar que el beneficio de la aplicación del criterio de Roberto Úcar reside en que, a diferencia del criterio de Hoek y Brown, no se requiere la realización de ensayos triaxiales para su desarrollo.

En adición, con base en el estudio estadístico llevado a cabo, es importante tener en cuenta que su utilización no supone una pérdida en la calidad de los resultados obtenidos, por el contrario, su empleo podría suponer una mejora del 0,51% de la precisión de los datos en comparación con el otro criterio.

Según la disposición 18663 del [BOE número 282 de 2009](#), el precio, en los laboratorios del CEDEX, de realización de los ensayos brasileños, de resistencia a la compresión simple y triaxiales está regulado a 38,26€ para los dos primeros y a 127,24€ para los ensayos triaxiales, por unidad de probeta.

Si se parte de un escenario simplificado en el que sólo se quiere analizar el comportamiento mecánico de un tipo de litología:

El criterio de rotura de Hoek y Brown recomienda la realización de un total de 25 triaxiales como método correctivo del desarrollo matemático inicial, lo que supone un coste mínimo de 3181€ en la ejecución del proyecto, por unidad litológica ensayada (este valor se debe multiplicar por el número de unidades geotécnicas a caracterizar).

Por otro lado, para el desarrollo del criterio propuesto por Roberto Úcar sería necesaria la ejecución de cinco ensayos de compresión simple y cinco ensayos brasileños, lo que conllevaría un coste mínimo de 382,6€ por unidad litológica ensayada (este valor se debe multiplicar por el número de unidades geotécnicas a caracterizar).

Según este desarrollo simplista (ya que no tiene en consideración otros costos comunes a la realización del proyecto como puede ser el tallado de las probetas y se considera una única litología a estudiar) el uso del nuevo criterio de rotura podría llegar a suponer un ahorro del 85 - 90% respecto a los fondos destinados para los ensayos necesarios en la caracterización mecánica de los materiales presentes en el proyecto de construcción.

Otro punto que tener en consideración es el número de laboratorios que poseen los equipos necesarios para la correcta realización de ensayos triaxiales y de compresión simple.

Este primero es más complejo de realizar y necesita de equipos más refinados y costosos que los que son utilizados para un ensayo de compresión simple, por lo que no es tan común que los laboratorios dispongan del equipo necesario.

Como consecuencia de todo esto, el ahorro económico total podría suponer un porcentaje mayor al 85 - 90% mencionado anteriormente, debido a que, aunque la cuantía base de cada ensayo está regulada en lo que se refiere a las actividades del CEDEX, estos precios no afectan a la actividad de laboratorios privados, de modo que la poca oferta de laboratorios capaces de realizar ensayos triaxiales podría repercutir en un incremento de su coste final de mercado.

IMPLICACIONES DEL USO DEL CRITERIO PROPUESTO POR ROBERTO ÚCAR EN EL ÁREA DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Las implicaciones en el área del análisis estructural atienden a que, a través de las ecuaciones derivadas del criterio de rotura propuesto por Roberto Úcar, se puede delimitar de manera gráfica la línea de resistencia intrínseca del material estudiado a través de una regresión de los diferentes pares $\sigma_3 - \sigma_1$ obtenidos mediante dicho criterio.

En este estudio se ha realizado un análisis el comportamiento mecánico de las calizas miocenas de la cuenca del Ebro y de las fallas presentes en dicho material.

Contexto geológico relevante:

Durante comienzos y mediados del Mioceno, la cuenca del Ebro era una cuenca endorreica cuya parte centro-occidental, área comprendida entre Huesca y norte de Zaragoza, poseía depósitos obtenidos como resultado de procesos de sedimentación en abanicos aluviales y sistemas fluviales que pasaban hacia el centro de la cuenca a un sistema lacustre. El nivel de base que constituye este sistema lacustre endorreico se sitúa a lo que hoy en día correspondería a una altitud de 1000 m sobre el nivel del mar. Así mismo, la ausencia de canales de incisión en los abanicos aluviales marginales y sistemas fluviales indican una constancia del nivel de base a lo largo de todo este periodo ([Nichols, 2004](#)).

En primer lugar, para llevar a cabo este estudio, se supone un esfuerzo mayor de rotura (σ_1) de 10 MPa, valor razonable ya que, aunque según los ensayos llevados a cabo (ver tabla 3a) la resistencia media a la compresión simple de las calizas analizadas se sitúa en 24,18 MPa, este dato junto con el peso específico del material (2,4 kN/m³), conllevaría una profundidad de generación para las fallas cercana a los 1000m máximos que posee la cuenca en el área estudiada. Por otro lado, es razonable pensar que una combinación de los esfuerzos ejercidos por la presión de fluidos y un esfuerzo extensional (cuyo origen podría residir en el surco de Valencia ya que

esta área presenta un predominio de fallas normales miocenas que sugieren un régimen tectónico extensional homogéneo con dirección NE-SO) hayan desplazado el campo de esfuerzos convergiendo en un σ_1 de rotura menor. El valor exacto de 10MPa es una aproximación basada en el espesor total de materiales que suponemos que hubo, en el momento de colmatación de la cuenca, por encima de las capas en las que se han observado las fallas en el Mioceno de La Plana. Se ha estimado una profundidad de unos 425 m que, aplicando un peso específico medio de 24000 N/m³, arrojaría ese esfuerzo aproximado de 10 MPa.

A continuación, mediante las ecuaciones 3, 4 y 5 y el uso de los datos de resistencia a la compresión y tracción medios obtenidos en el laboratorio (ver tabla 3a) se calcula un σ_3 de rotura de -1,5 MPa, dato necesario para la representación gráfica del estado de esfuerzos de rotura de las fallas mediante el círculo de Mohr.

Aplicando la ecuación 3 a los datos experimentales, con el objetivo de obtener los diferentes pares $\sigma_3 - \sigma_1$, se obtuvieron los resultados presentes en la tabla 3b, que mediante una serie de regresiones dieron como resultado la línea de resistencia intrínseca de las calizas miocenas estudiadas, representada en la figura 7.

Tras la superposición del círculo de Mohr, obtenido a través del par $\sigma_3 - \sigma_1$ más factible para la rotura del material, junto con la línea de resistencia intrínseca de las calizas en un gráfico $\sigma - \tau$ se dedujo un valor de 2α de 32° (ver figura 7). Este dato no es del todo concordante con los datos de buzamiento obtenidos en campo (ver tabla 4) ya que estos reflejan un ángulo 2α de 48°. Esta discrepancia puede ser debida a una pequeña variación del comportamiento del material en las diferentes situaciones, cuando se generaron las fallas y cuando se estudió en el laboratorio, también podría ser posible una no representatividad de los datos medidos en campo y por lo tanto una no representatividad de su ángulo 2α asociado.

El signo negativo de σ_3 de ese círculo de Mohr de rotura (- 1,3 MPa) indica que actuó una componente de tracción (originada por el campo extensional del surco de Valencia), o bien existió una presión de fluidos que se restó asimismo a la componente horizontal del esfuerzo litostático, o ambas cosas simultáneamente.

nº Ensayo	σ_t (Mpa)	σ_c (Mpa)	σ_3 (MPa)	$\bar{\sigma}_3$	$\bar{\sigma}_1$	σ_1 (MPa)
3	-1,64668756	23,8503136	-1,5	-0,06202577	0,417812855	10,1041759
4	-1,82965285	20,455102	-1	-0,04135051	0,664009081	16,0580615
5	-1,51025169	25,5536234	0	0	1	24,1834968
6	-2,06028333	20,1154059	1,5	0,06202577	1,37329963	33,2111872
7	-1,60104884	19,9965867	2	0,08270103	1,480400063	35,8012502
8	-2,42707486	34,7023647	2,5	0,10337628	1,581710174	38,251283
9	-1,83144687	24,6110816	3	0,12405154	1,678205965	40,5848886
MEDIA	-1,843778	24,1834968	3,5	0,1447268	1,770616637	42,8197018
			4	0,16540205	1,859504016	44,9693095
			4,5	0,18607731	1,945311861	47,0444432
			5	0,20675257	2,028397931	49,0537549

Tabla 3: Parámetros que determinan el comportamiento de las calizas Miocenas estudiadas

a: Resultados de los ensayos de resistencia a la tracción indirecta y compresión simple llevados a cabo en laboratorio

b: Obtención de diferentes pares $\sigma_3 - \sigma_1$ mediante la versión predictiva del criterio de Roberto Úcar y los datos de resistencia a la tracción y compresión simple obtenidos en laboratorio.

Nº	DIRECCIÓN	BUZAMIENTO	ESTRÍAS	COORDENADAS
3	030	76W	NO	41.53491, -0.956615
4	110	64S	NO	41.534605, -0.956399
5	019	68W	NO	41.534099, -0.956744
6	016	70W	NO	41.534286 -0.957804
7	070	67N	NO	41.531109 -0.957883
8	058	75S	NO	41.531109 -0.957883
9	040	60W	NO	41.529778 -0.956477
10	052	68E	NO	41.529778 -0.956477
11	106	62S	NO	41.532009 -0.957993
12	060	65N	NO	41.532009 -0.957993

Tabla 4: Mediciones de fallas en La Plana, las parejas de fallas 9 – 10 y 11 – 12 son fallas conjugadas

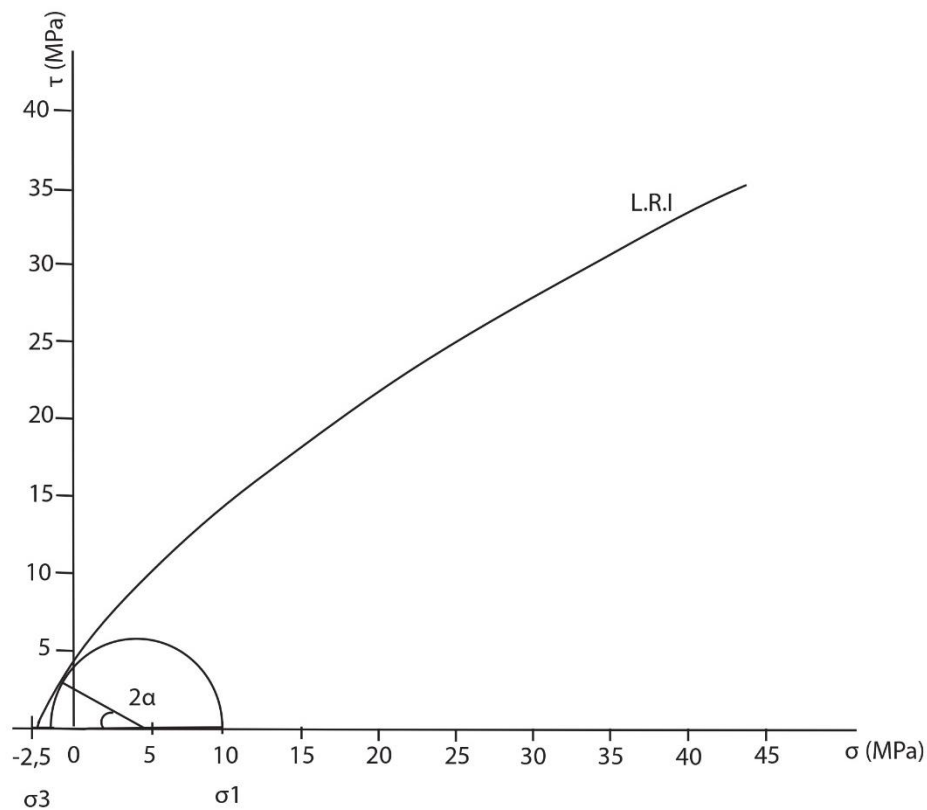


Figura 7: Gráfico σ - τ representativo del momento de generación de las fallas presentes en las calizas miocenas de la cuenca del Ebro a través de la superposición del círculo de Mohr obtenido para el par $\sigma_3 - \sigma_1$ de rotura y la línea de resistencia intrínseca del material (LRI).

CONCLUSIONES

Como conclusiones generales a este estudio se puede determinar que:

- El criterio de rotura propuesto por Roberto Úcar utilizado con finalidad predictiva podría poseer una mayor calidad que el modelo de Hoek y Brown tras haber pasado un proceso de rectificación. No obstante, aunque no existe obligatoriedad en el uso de ensayos triaxiales para un ajuste del modelo, el uso de estos supondría una aún mayor precisión de los datos.
- El uso del factor de correlación entre el ensayo de tracción directa y el ensayo de tracción indirecta propuesto por los autores [Perras y Diederichs \(2014\)](#) podría suponer una gran mejora en los resultados obtenidos mediante el criterio propuesto por Roberto Úcar, pues tras el análisis estadístico llevado a cabo se ha determinado la alta sensibilidad del modelo hacia el valor usado como resistencia a la tracción del material.
- El empleo del criterio propuesto por Roberto Úcar frente a la implementación del criterio de Hoek y Brown podría llegar a suponer un ahorro del 85 - 90% respecto a los fondos destinados para los ensayos necesarios en la caracterización mecánica de los materiales presentes en el proyecto de construcción.
- Mediante el empleo de las ecuaciones derivadas del criterio de Roberto Úcar y de datos obtenidos en laboratorio se ha logrado representar un gráfico $\sigma - \tau$ representativo del momento de generación de las fallas presentes en las calizas miocenas de la cuenca del Ebro a través de la superposición del círculo de Mohr obtenido para el par $\sigma_3 - \sigma_1$ de rotura y la línea de resistencia intrínseca de dichas calizas.
- La discrepancia entre el ángulo 2α obtenido analíticamente y medido en campo puede deberse a cambios en el comportamiento del material en los momentos en los que se generaron las fallas y cuando se estudió el comportamiento del material en laboratorio. También podría ser posible una no representatividad de los datos medidos en campo y por lo tanto una no representatividad de su ángulo 2α asociado.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez-Deulofeu, E. R., Beira-Fontaine, E., Cabrera-Castro, P. M., & Reyes-Pérez, O. (2019). Comparación de métodos geotécnicos para la evaluación de asentamientos por consolidación primaria para cimentaciones en balsa. *Minería y Geología*, 35(4), 369-383.
- Arlegui-Crespo, L. E. (2022). Comparación entre las predicciones hechas por dos criterios de rotura aplicados a una base de datos de ensayos. Universidad de Zaragoza.
- Arlegui-Crespo, L. E., & Simón-Gómez, J. L. (1998). Reliability of palaeostress analysis from fault striations in near multidirectional extension stress fields. Example from the Ebro Basin, Spain. *Journal of Structural Geology*, 20(7), 827-840.
- Arlegui, L., & Simón, J. L. (2001). Geometry and distribution of regional joint sets in a non-homogeneous stress field: case study in the Ebro basin (Spain). *Journal of Structural Geology*, 23(2-3), 297-313.
- Bineshian, H., Ghazvinian, A., & Bineshian, Z. (2012). Comprehensive compressive-tensile strength criterion for intact rock. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(2), 140-148.

- Bieniawski, Z. T., & Bernede, M. J. (1979, April). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 16, No. 2, pp. 138-140). Pergamon.
- BOE (2009). Resolución de 22 de octubre de 2009, del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, por la que se fijan los precios públicos que han de regir las prestaciones de servicios
- Edward-Schwartz, A. (1963) *An investigation of the strength of rock*. [Tesis de maestría no publicada]. Georgia Institute of Technology
- Fernández, W., Villalobos, S., & King, R. (2018). Evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en suelos residuales de granito completamente descompuesto. *Revista ingeniería de construcción*, 33(1), 5-14.
- Gil Peña, I., & Simón Gómez, J. L. (1991). Aproximación al cálculo de los valores absolutos de paleoesfuerzos compresivos en el Mioceno Inferior de Tudela (Navarra). *Geogaceta*, 11, 31-34.
- González-Díez, A., & Martínez Cedrún, P. (2020) *Caracterización geomecánica de suelos y rocas*. Dpto. de ciencias de la tierra y física de la materia condensada, Universidad de Cantabria.
- Guo, B., Wang, L., Li, Y., & Chen, Y. (2020). Triaxial Strength Criteria in Mohr Stress Space for Intact Rocks. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1-13.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of the geotechnical engineering division*, 106(9), 1013-1035.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek–Brown failure criterion and GSI–2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 445-463.
- Kovari, K., Tisa, A., Einstein, H. H., & Franklin, J. A. (1983). Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: revised version. *Intl J of Rock Mech & Mining Sci & Geomechanic Abs*, 20(6).
- Michelis, P. N. (1981). Work-softening and hardening behaviour of granular rocks. *Rock mechanics*, 14, 187-200.
- Moshrefi, S., Shahriar, K., Ramezanzadeh, A., & Goshtasbi, K. (2019). New empirical failure criterion for shale. *Journal of Mining and Environment*, 10(1), 287-304.
- Nichols, G. J. (2004). Sedimentation and base level in an endorheic basin: the early Miocene of the Ebro Basin, Spain. *Boletín Geológico y Minero*, 115(3), 427-438.
- Novales, A. (2010). *Análisis de regresión*. Universidad Complutense de Madrid: Madrid, Spain, 116.
- Peacock, D. C. P., Sanderson, D. J., & Leiss, B. (2021). Use of Mohr diagrams to predict fracturing in a potential geothermal reservoir. *Geosciences*, 11(12), 501.
- Perras, M. A., & Diederichs, M. S. (2014). A review of the tensile strength of rock: concepts and testing. *Geotechnical and geological engineering*, 32, 525-546.

- Read, S. A. L., & Richards, L. (2011, October). A comparative study of m_i , the Hoek-Brown constant for intact rock material. In ISRM Congress (pp. ISRM-12CONGRESS). ISRM.
- Reeher, L. J., Hughes, A. N., Davis, G. H., Kemeny, J. M., & Ferrill, D. A. (2023). Finding the right place in Mohr circle space: Geologic evidence and implications for applying a non-linear failure criterion to fractured rock. *Journal of Structural Geology*, 166, 104773.
- Ramsay, J.G. (1967) *Folding and Fracturing of Rocks*. McGraw-Hill, New York, 568.
- Shah, S. (1993). A study of the behaviour of jointed rock masses. PhD, University of Toronto
- Sheorey, P.R. (1997). *Empirical Rock Failure Criteria*. A.A. Balkema.
- Shen, J., Jimenez, R., Karakus, M., & Xu, C. (2014). A simplified failure criterion for intact rocks based on rock type and uniaxial compressive strength. *Rock mechanics and rock engineering*, 47, 357-369.
- Torres-Belandria, R. A., (1992) *Nuevos criterios sobre la resistencia del concreto*. [Tesis de maestría no publicada]. Universidad de los Andes.
- Úcar, R. (2021). Determination of a New Failure Criterion for Rock Mass and Concrete. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(5), 3795-3813.
- UNE-EN 14488-4:2006+A1:2008 (2008). Ensayos de hormigón proyectado. Parte 4: Resistencia al arrancamiento de testigos mediante tracción directa.
- UNE 22-950-4:1992: Propiedades mecánicas de las rocas. Ensayos para la determinación de la resistencia. Parte 4: resistencia a la compresión triaxial.
- UNE 22-950-90: Propiedades mecánicas de las rocas. ensayos para la determinación de la resistencia parte 1: resistencia a la compresión uniaxial.
- UNE 22-950-90: Propiedades mecánicas de las rocas ensayos para la determinación de la resistencia parte 2: resistencia a tracción por determinación indirecta (ensayo brasileño).
- Zuo, J., & Shen, J. (2020). *The Hoek-Brown Failure Criterion--From Theory to Application*. Singapore: Springer.