

Caracterización de propiedades elásticas en una muestra de roca tipo arenisca mediante elementos finitos

Characterization of elastic properties in a sandstone rock sample using digital rock physics

Smelinyer Dariam Rivero-Méndez ^{1a}, Juan David Ordoñez-Martínez ^{1b}, Carlos Sebastián Correa- Díaz ^{2a}, Hernán Darío Mantilla-Hernández ^{2b}, Octavio Andrés González-Estrada ^{1c}

¹ Grupo de investigación en energía y medio ambiente (GIEMA), Universidad Industrial de Santander, Colombia.

Correos electrónicos: ^a smelinyer@gmail.com, ^b judaormal19@gmail.com, ^c agonzale@uis.edu.co

Orcid: ^c [0000-0002-2778-3389](https://orcid.org/0000-0002-2778-3389).

² Ecopetrol – Centro de Innovación y Tecnología ICP, Colombia. Correos electrónicos:

^a carlos_sebast@hotmail.com, ^b hernan.mantilla@ecopetrol.com.co

Recibido: 14 agosto, 2021. Aceptado: 30 diciembre, 2021. Versión final: 29 enero, 2022.

Resumen

Se propone una metodología basada en la física de roca digital para un grupo de imágenes tomográficas tomadas de un núcleo de arenisca extraído de un pozo de petróleo, considerando un modelo anisotrópico del material durante el proceso de segmentación. La muestra de roca, proporcionada por el Instituto Colombiano del Petróleo, está compuesta principalmente por minerales como el cuarzo y la calcita. Primero, se genera un modelo tridimensional a partir de las imágenes tomográficas. Luego, se crea una malla de elementos finitos considerando un modelo de material que relaciona la densidad y el módulo elástico con la escala Hounsfield. Finalmente, se realiza un estudio paramétrico del modelo numérico y los resultados se comparan con los valores de referencia. Se proponen tres ensayos diferentes para la evaluación de 2 propiedades elásticas, donde los minerales se estudian individualmente (cuarzo y calcita) y como compuesto (arenisca). Los resultados de estas pruebas se comparan con valores de referencia, mostrando porcentajes de diferencia entre 3 - 10% para el módulo de elasticidad y entre 0,7 - 2,1% para el coeficiente de Poisson.

Palabras clave: método de elementos finitos; física de roca digital; propiedades elásticas; arenisca.

Abstract

A methodology based on digital rock physics is proposed for a group of tomographic images taken from a core of sandstone extracted from an oil well, considering an anisotropic model of the material during the segmentation process. The rock sample, provided by the Colombian Petroleum Institute, is composed mainly of minerals such as quartz and calcite. First, a three-dimensional model is generated from the tomographic images. Then, a finite element mesh is created considering a material model that relates density and elastic modulus with the Hounsfield scale. Finally, a parametric study of the numerical model is performed and the results are compared with the reference values. Three different tests are proposed for the evaluation of elastic properties, where the minerals are studied individually (quartz and calcite) and as a composite (sandstone). The results of these tests are compared with reference values, showing difference percentages between 3 - 10% for the elastic modulus and between 0.7 - 2.1% for the Poisson's ratio.

Keywords: finite element method; digital rock physics; elastic properties; sandstone.

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, **CC BY-ND 4.0** 

Como citar: S. D. Rivero-Méndez, J. D. Ordoñez-Martínez, C. S. Correa- Díaz, H. D. Mantilla- Hernández, O. A. González-Estrada, "Caracterización de propiedades elásticas en una muestra de roca tipo arenisca mediante elementos finitos," *Rev. UIS Ing.*, vol. 21, no. 1, pp. 211-222, 2022, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022016>.

1. Introducción

El estudio de los módulos elásticos permite conocer el comportamiento mecánico de las rocas, cuya correcta estimación es clave en la planeación de campañas de perforación, estabilidad de pozos, operaciones de producción e inyección. La cuantificación de los parámetros mecánicos casi siempre requiere datos acústicos que provienen de información sísmica, registros de pozos o mediciones de laboratorio, estas últimas en su mayoría son de tipo destructivo [1], [2].

Mediante la incorporación de tecnologías computacionales en geociencia, surge la física de roca digital (DRP por sus siglas en inglés) que complementa la metodología de trabajo usada para la caracterización de rocas hechas en laboratorio. La DRP permite el cálculo de propiedades elásticas en un menor tiempo y mediante ensayos no destructivos, además permite la posibilidad de replicar, estudiar o variar parámetros en diferentes pruebas [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12].

La caracterización de materiales mediante técnicas numéricas ha sido ampliamente utilizada en diferentes ámbitos de la ingeniería [13], [14], [15]. El flujo de trabajo en DRP inicia con un conjunto de datos formado por un grupo de imágenes provenientes de una tomografía computarizada (CT) realizada al núcleo de roca extraído [3], [7], [16], [17]. Posteriormente, se realiza la segmentación de la imagen [4] con el propósito de reconstruir un modelo 3D de la muestra, eliminando defectos, como las sombras concéntricas en la imagen provenientes de la CT, delineando los poros y minerales [12], [18], [19], etc. Esta etapa es fundamental para el éxito de la estimación de propiedades físicas, dado que una segmentación incorrecta daría como resultado una identificación errónea del material [20]. Además, para minimizar los costos computacionales aplicando DRP, es importante determinar un volumen representativo de menor tamaño con respecto al total, que entregue resultados válidos del modelo constitutivo [21], en los que los resultados no varían con el cambio en el volumen de roca, y sea independiente a las condiciones de contorno [22].

Luego de tener definido el modelo numérico se pueden representar procesos físicos en el espacio poroso segmentado y la matriz mineral y, de este modo, obtener estimaciones de propiedades físicas promediadas por volumen [5]. Los estudios de DRP aplican simulaciones computacionales para determinar propiedades elásticas, porosidad, permeabilidad, entre otras [23], [24], [25]. Con el fin de validar los resultados obtenidos, es usual compararlos con ensayos de laboratorio. Para considerar

las diferencias entre los modelos numéricos y experimentales, es necesario comparar las tendencias formadas por estos grupos de datos en diferentes pruebas. El paradigma de validación se basa en el supuesto de que, si estas tendencias computacionales coinciden con las tendencias físicas determinadas en laboratorio, se puede asumir que los resultados obtenidos computacionalmente son correctos [26].

El Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) ha estado trabajando técnicas de física de roca digital mediante los softwares Abaqus y Avizo [27]. En colaboración con el ICP, en este trabajo se plantea modificar el proceso de segmentación, para tener en cuenta cambios de densidad en la roca para una misma muestra, así como las zonas de transición entre distintos minerales, aprovechando la información en escala Hounsfield de la imagen digital. En primer lugar, se realiza el proceso de segmentación para obtener una representación tridimensional del corazón de roca, utilizando un modelo que considere las condiciones anisótropas del material. Se utiliza una malla cartesiana regular de elementos finitos para la definición del modelo numérico, sobre la cual se realizan pruebas *in silico*. Se plantean tres pruebas, considerando zonas caracterizadas por calcita, cuarzo, y una zona mixta. Finalmente, se determinan las propiedades mecánicas de la roca a partir de los modelos numéricos: el módulo elástico y el coeficiente de Poisson.

2. Marco teórico

Para el proceso de caracterización de propiedades mecánicas mediante experimentos *in silico*, se inicia con la obtención y procesamiento de imágenes tomográficas de la roca. Posteriormente, se selecciona un volumen representativo y se genera la discretización de la geometría para la aproximación numérica. Se realiza la asignación de propiedades elásticas considerando una caracterización anisótropa del material y finaliza con el cálculo de las propiedades elásticas.

2.1. Muestra de roca

La muestra de roca tipo arenisca se representó a partir de un grupo de 130 imágenes de tomografía axial computarizada (CAT) suministradas por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), las cuales fueron tomadas de un núcleo de arenisca constituido predominantemente por valores de densidad media. La arenisca es una roca sedimentaria con contenido de cuarzo y valores de alta densidad que conforman una fractura de forma irregular asociada a la presencia de calcita.

El valor promedio en la escala Hounsfield obtenido en esta tomografía es de 1597 HU para el cuarzo y 2359 HU para la calcita. Se utilizó un tomógrafo GE OPTIMA 660, el tamaño de vóxel de la muestra está definido por un píxel de 244.411 μm de lado y un espesor de slice de 330 μm .

En la [figura 1](#) se muestra la representación tridimensional del núcleo de roca luego de un proceso de segmentación, en donde se separan los dos minerales y se observa la geometría irregular que poseen, además de diferentes aglomeraciones de calcita en forma de partículas que se encuentran incrustadas en el cuarzo. Debido a lo compleja que resulta ser esta geometría, en la etapa de mallado se proponen modificaciones al método de segmentación utilizado.

Aunque se tienen unos valores típicos establecidos de propiedades elásticas para los diferentes tipos de roca, ver [tabla 1](#), existen una serie de factores que influyen en su estimación, como la mineralogía, litología, porosidad, presencia de fluidos, geometría de los granos y de los poros.

Tabla 1. Propiedades elásticas típicas de minerales formadores de roca

Mineral	Módulo elástico (GPa)	Coefficiente de Poisson
Cuarzo	80	0,17
Calcita	55	0,21
Líticos	60	0,20
Feldespatos	70	0,29

Fuente: adaptado de [28].

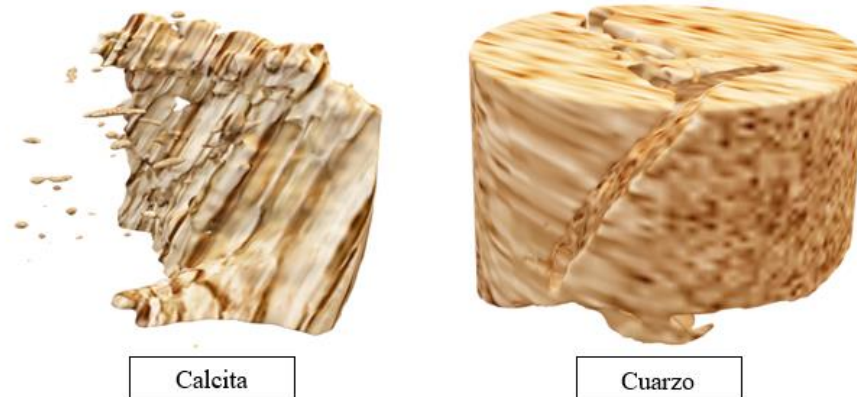


Figura 1. Representación segmentada en 3D de la tomografía computacional realizada a la muestra de arenisca. Fuente: elaboración propia.

En [29] se documenta una compilación de valores de módulo elástico y coeficiente de Poisson obtenidos en pruebas de laboratorio por medio de una carga estática para muestras de diferentes litologías (areniscas, calizas y lutita) con diferentes porosidades. La porosidad es definida a partir de mediciones empíricas, y es el principal mecanismo que controla los módulos elásticos ya que interviene en la integridad estructural y la rigidez de la roca.

Para entender el efecto de estos dos factores, en la [tabla 2](#) se muestran algunos rangos de módulos elásticos con mayor frecuencia en las pruebas, en función de tres rangos de porosidad. Se observa que, para las areniscas, rocas de interés en este trabajo, los módulos elásticos más altos se registran en las muestras que poseen una porosidad menor a 8%, y las areniscas de porosidad relativamente alta (> 16%) tienen módulos elásticos significativamente más bajos.

Tabla 2. Rangos de módulos elásticos obtenidos en pruebas de laboratorio

Litología	Porosidad <8% (GPa)	Porosidad 8-16% (GPa)	Porosidad >16% (GPa)
Areniscas	40-70	15-30	10-30
Calizas	60-85	10-30	30-40
Lutita	35-40	10-15	30-35

Fuente: adaptado de [29].

La **tabla 3** muestra valores de coeficiente de Poisson obtenidos en la ejecución de los mismos ensayos de laboratorio, en donde se muestra que, las areniscas con porosidad óptima, relativamente alta (8- 16%), presentan relaciones de Poisson más altas. muestra valores de coeficiente de Poisson obtenidos en la ejecución de los mismos ensayos de laboratorio, en donde se muestra que, las areniscas con porosidad óptima, relativamente alta (8- 16%), presentan relaciones de Poisson más altas.

Tabla 3. Rangos del coeficiente de Poisson obtenidos en pruebas de laboratorio

Litología	Porosidad <8%	Porosidad 8-16%	Porosidad >16%
Areniscas	0,10-0,15	0,25-3	0,15-0,20
Calizas	0,20-0,30	0,22-0,25	0,25-0,27
Lutita	0,12-0,15	0,1-0,12	0,22-0,25

Fuente: adaptado de [29].

2.2. Geometría y mallado

Debido a la cantidad de partículas de calcita y que estas se encuentran envueltas en el cuarzo, realizar un estudio por elementos finitos (FEM) resultaría complejo al momento de delimitar correctamente la geometría de los minerales y las regiones de contacto. Por esto se optó por una metodología que no tenga una dependencia directa de la geometría segmentada. Para ello, se extrajo un volumen de la muestra sobre el cual se realizó un mallado cartesiano regular. Las propiedades del material se asociaron a nivel de elemento, teniendo en cuenta la información extraída de la imagen tomográfica.

En primer lugar, se creó un cubo de 10 mm de arista, el cual se ubicó en un área de interés de la tomografía analizada como se muestra en la **figura 2**. A los elementos de la malla cartesiana se asignaron propiedades del material en el software Bonemat [30] mediante las relaciones entre escala Hounsfield - densidad y densidad - módulo elástico.

El mallado se realiza con elementos hexaédricos lineales. Para verificar la independencia de malla, se lleva a cabo un estudio de convergencia en el que se analizó el desplazamiento total versus el número de nodos de la malla para una carga de compresión. En la **figura 3** se observa que el valor en el que convergen los resultados es de $4,66\text{e-}07$ m. Los datos de la **tabla 4** muestran que a partir de la tercera iteración el cambio en el desplazamiento total no es mayor a 1%. Finalmente, se utiliza una malla de 216000 elementos y 226981 nodos.

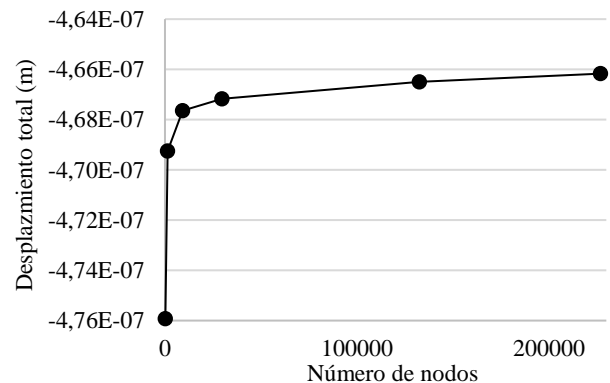


Figura 3. Curva de desplazamiento vs número de nodos correspondiente a el análisis de convergencia de malla.

Fuente: elaboración propia.

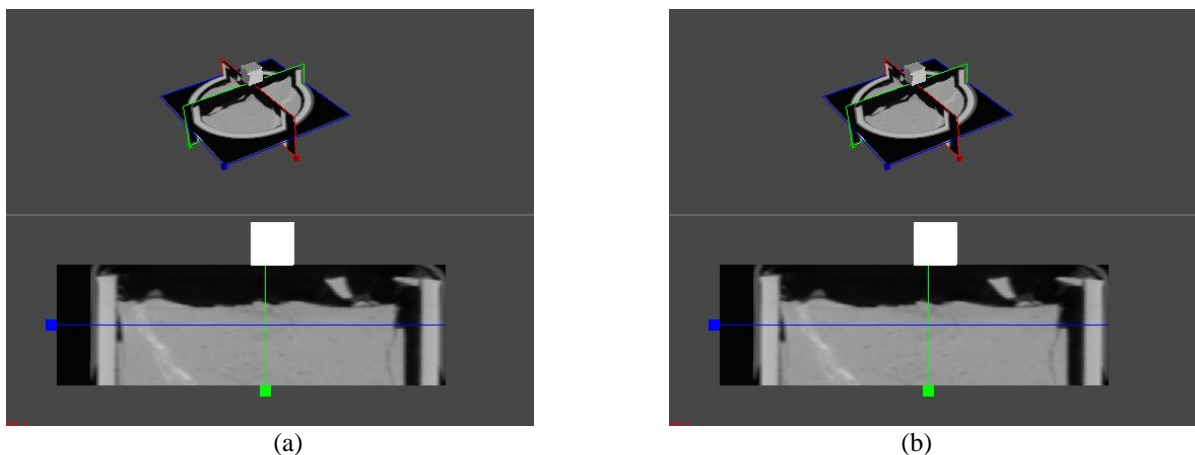


Figura 2. Ubicación del cubo mallado en el software Bonemat. a) Ubicación por defecto luego de la importación en Bonemat, b) ubicación modificada al área de interés. Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Convergencia de la malla en desplazamientos máximos totales

Iteración	Número de nodos	Número de elementos	Desplazamiento (m)	% Cambio
1	216	125	-4,7592E-07	-
2	1331	1000	-4,6925E-07	1,401
3	9261	8000	-4,6764E-07	0,343
4	29791	27000	-4,6717E-07	0,101
5	132651	125000	-4,6650E-07	0,143
6	226981	216000	-4,6617E-07	0,071

Fuente: elaboración propia.

Se tomaron de la [tabla 5](#) los valores de densidad promedio para el cuarzo y la calcita para obtener la función lineal que relaciona la densidad con la escala Hounsfield. Se comprobó que efectivamente los minerales presentes en la muestra tuvieran valores HU cercanos a los promedios. Con los valores de HU y densidad para ambos minerales, se propuso la función lineal.

$$\rho = 0,12HU + 2439,05 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1)$$

Tabla 5. Valores de Hounsfield (HU) y densidad de algunos minerales y fluidos

Minerales y Fluidos	Hounsfield (HU) Promedio	Densidad (g/cm ³)
Barita	3070,95	3,44
Diabasa	2918,27	3,24
Dolomita porosa	1940,62	2,39
Serpentina	1476,21	2,15
Calcita	2392,23	2,72
Cuarzo	1628,81	2,62
Yeso	1970,96	2,57
Asfaltito	124,83	1,18
Agua de capa	56,98	1,00
Petróleo pesado	34,85	0,85

Fuente: adaptado de [31].

Como se muestra en la [tabla 1](#) y [tabla 2](#), los módulos elásticos de la calcita y el cuarzo varían según el porcentaje de porosidad que poseen, también se observa que estos valores son muy diferentes el uno del otro. Por lo tanto, se optó por una ecuación discontinua a tramos, conformada de dos funciones lineales, una para cada material. Para la formulación de estas ecuaciones se ajustaron los términos constantes de acuerdo a los valores en las tablas mencionadas anteriormente.

Para el cuarzo, se tomaron densidades entre 2600 y 2670 kg/m² y módulos elásticos entre 80 y 75 GPa, para obtener la ecuación:

$$E_{\text{cuarzo}} = -7,143 \times 10^7 \rho + 2,66 \times 10^{11} \quad (2)$$

Para la calcita, se tomaron densidades entre 2670 y 2720 kg/m² y módulos elásticos entre 50 y 55 GPa, para obtener la ecuación:

$$E_{\text{calcita}} = -5 \times 10^7 \rho + 1,88 \times 10^{11} \quad (3)$$

El coeficiente de Poisson para el cuarzo y calcita se tomó de los valores de la [tabla 1](#) y para la arenisca se tomó un valor promedio de $\nu = 0,19$.

Por último, se asignaron a cada elemento de la malla las propiedades locales de densidad y módulo de elástico de acuerdo a su ubicación en la tomografía utilizando Bonemat. Como resultado se obtiene el cubo de la [figura 4](#), el cual segmenta la geometría de referencia de la roca de acuerdo con los valores del módulo elástico. Se puede observar en color azul las zonas caracterizadas por el mineral de cuarzo. El color naranja representa la fractura rellena de calcita, para este mineral también se observaron distintas tonalidades. Por último, se observan zonas verdes que representan la zona de transición entre ambos minerales.

2.3. Modelo por elementos finitos

Para la determinación del módulo elástico y coeficiente de Poisson, se realizaron tres pruebas *in silico* utilizando una formulación tipo Galerkin de elementos finitos. Las dos primeras son la determinación de estas propiedades para cada mineral de manera individual con el propósito de verificar el ajuste del modelo numérico, para esto se ubicó un cubo de 0,5 mm en dos zonas de la tomografía donde solo se distingue mineral de cuarzo y en la otra calcita. El tamaño de este cubo se ajusta al espesor de la

veta de calcita, por otro lado, con el cuarzo se disponía de una mayor zona de material, pero se establecen las mismas condiciones para llevar a cabo el procedimiento. Para la tercera prueba se extrajo un cubo de 10 mm en una zona donde se presenta gran concentración de ambos minerales.

Como resultado se obtuvieron los cubos evidenciados en la figura 5, en esta se visualiza la variación del módulo elástico asignado según la escala Hounsfield, el cuarzo presentó mayor homogeneidad de sus propiedades, mientras que la calcita presenta una zona de homogénea y otra con variaciones. En el tercer cubo se observan variaciones tanto para las zonas de cuarzo y calcita.

Se llevó a cabo una prueba de compresión uniaxial en el software Ansys [32], aplicando una presión de 7 MPa en la cara superior de cada cubo, con esta presión se asegura no superar el límite elástico de las rocas, con lo cual el modelo está en el rango de desplazamiento elástico - lineal. Además, en la cara inferior se asignaron restricciones para evitar movimientos de sólido rígido, restringiendo el desplazamiento en dirección normal a la cara y restringiendo los grados de libertad en una arista de un elemento de la malla para evitar rotaciones y desplazamientos. En la figura 6 se muestra la configuración de las condiciones de contorno.

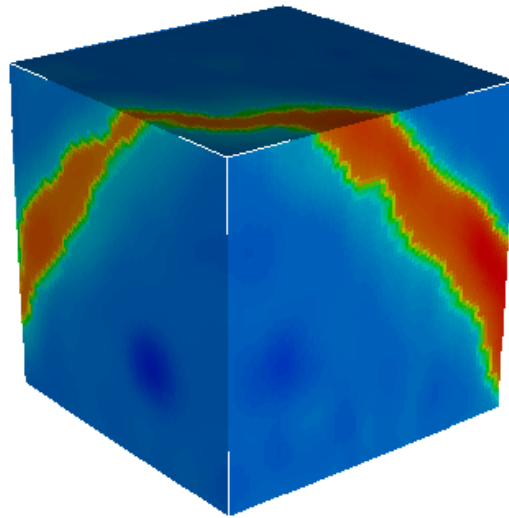


Figura 4. Variación del módulo elástico representando la segmentación de la muestra analizada. De color azul el cuarzo, naranja la calcita y verde las zonas de transición entre minerales. Fuente: elaboración propia.

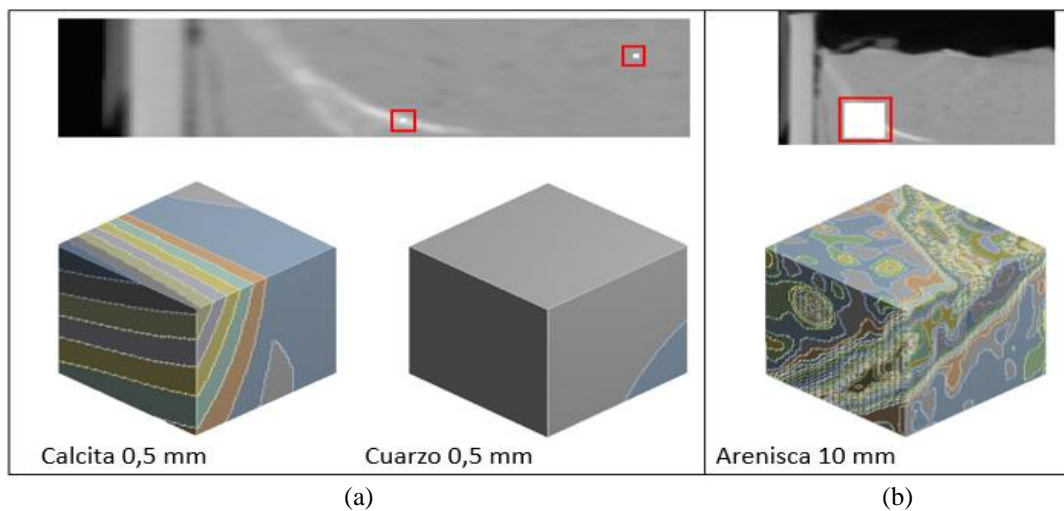


Figura 5. Ubicación de los cubos. a) calcita y cuarzo respectivamente b) arenisca. Fuente: elaboración propia

3. Resultados

Luego de solucionar los tres modelos numéricos planteados, se obtuvieron resultados de desplazamiento total y el esfuerzo de von Mises para las tres pruebas realizadas. En la **figura 7** se observan los resultados para el cuarzo, se obtuvo un desplazamiento máximo de $4,539E-05$ m, con una distribución uniforme en el eje vertical. El esfuerzo de von Mises obtenido fue de 7 MPa con una distribución uniforme en el cubo, lo cual quiere decir y como se esperaba en esta prueba, que las propiedades asignadas para este mineral son muy similares en el dominio seleccionado.

Para el caso de la calcita, en la **figura 8**, se obtuvo un desplazamiento máximo de $7,083E-05$ m, este resulta mayor al obtenido en el cuarzo debido a que posee menor rigidez, de igual manera la distribución del desplazamiento resultó ser uniforme en dirección vertical. El esfuerzo de von Mises también fue uniforme, alrededor de los 7 MPa, indicando un material homogéneo en el dominio.

El siguiente modelo corresponde a la muestra compuesta por ambos minerales. Como se observa en la **figura 9**, el desplazamiento y el esfuerzo no son homogéneos, esto es debido a la distribución de los minerales en el dominio seleccionado. El desplazamiento máximo obtenido fue de $1,1479E-06$ m en la esquina superior del cubo, indicando que en esta región se concentra mayor cantidad de calcita.

En la **tabla 6**, se resumen los valores de esfuerzo y desplazamiento obtenidos de los modelos numéricos, también se registraron en las dos últimas filas los módulos elásticos y el coeficiente de Poisson calculado para cada prueba. El módulo de Young o elástico E se calcula a partir de la ley constitutiva $E = \sigma L / \delta$, donde σ es el esfuerzo promedio, L es la longitud inicial y δ es el desplazamiento máximo. De igual manera, el coeficiente de Poisson se determina con la relación entre deformaciones transversales y axiales $\nu = \epsilon_x / \epsilon_y$, donde ϵ_x está dado por el desplazamiento en el eje X y ϵ_y se obtiene con el desplazamiento en el eje Y.

B: Static Structural
Fixed Support
Time: 1. s
1/5/2021 12:46 PM

- A Pressure: 7.e+006 Pa
- B Frictionless Support
- C Fixed Support

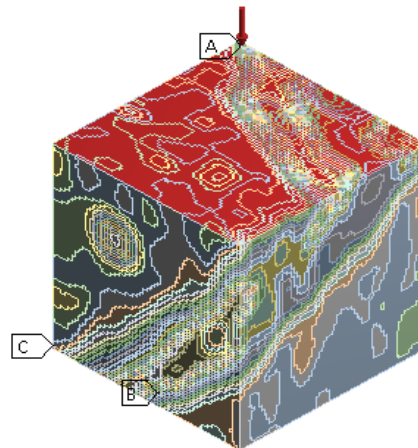
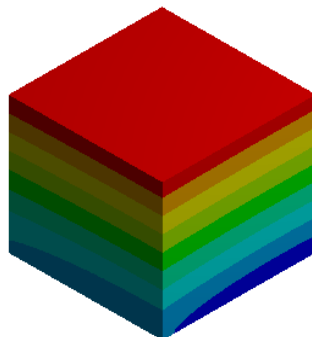


Figura 6. Condiciones de carga y soporte para la simulación en el software Ansys. Fuente: elaboración propia.

B: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1
1/5/2021 3:09 PM

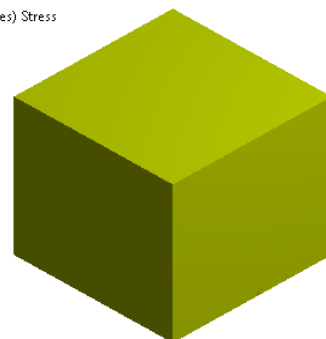
- 4.539e-8 Max
- 4.0347e-8
- 3.5304e-8
- 3.026e-8
- 2.5217e-8
- 2.0173e-8
- 1.513e-8
- 1.0087e-8
- 5.0434e-9
- 0 Min



(a)

B: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
1/5/2021 3:42 PM

- 7.1629 Max
- 7.0833
- 7.0037
- 6.9241
- 6.8445
- 6.7649
- 6.6853
- 6.6057
- 6.5262 Min



(b)

Figura 7. Resultados para el cuarzo de a) desplazamiento, b) esfuerzo de von Mises. Fuente: elaboración propia.

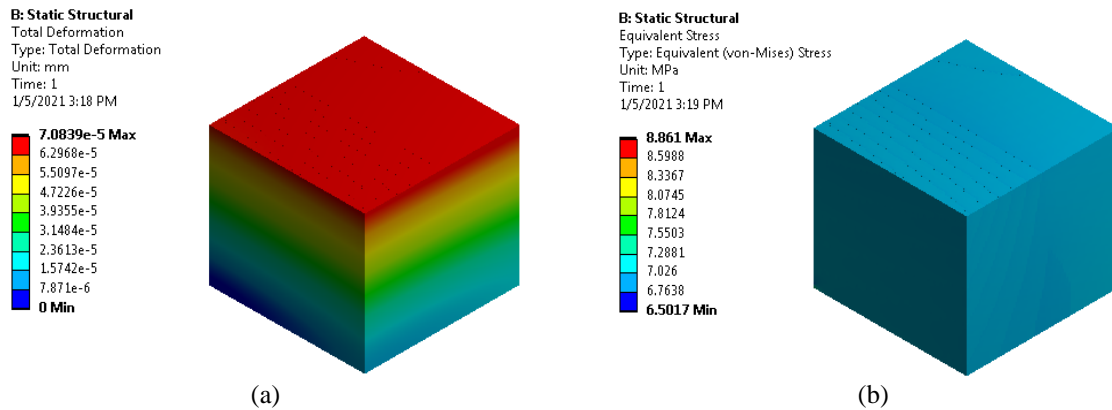


Figura 8. Resultados para la calcita de a) desplazamiento, b) esfuerzo de von Mises. Fuente: elaboración propia.

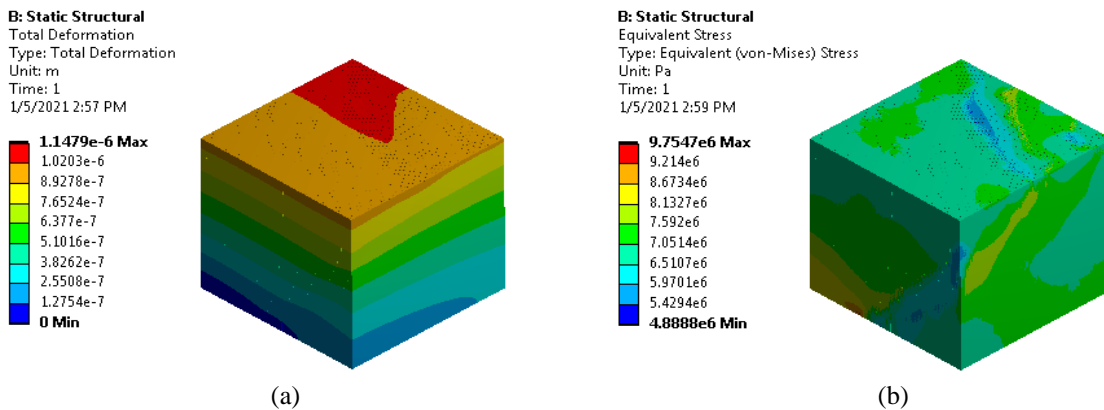


Figura 9. Resultados para la arenisca de a) desplazamiento, b) esfuerzo de von Mises. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Resultados de desplazamiento, esfuerzo y cálculo del módulo elástico y coeficiente de Poisson

Datos	Cuarzo	Calcita	Arenisca
Esfuerzo promedio (Pa)	7,0000E+06	7,0000E+06	6,9500E+06
Longitud inicial (m)	5,0000E-04	5,0000E-04	1,0000E-02
Desplazamiento máximo (m)	4,5390E-08	7,0839E-08	1,1479E-06
Desplazamiento en Y (m)	4,4404E-08	6,8211E-08	1,1259E-06
Desplazamiento en X (m)	7,7117E-09	1,4221E-08	2,3320E-07
Módulo elástico (Pa)	7,7109E+10	4,9408E+10	6,0545E+10
Coficiente de Poisson	1,7367E-01	2,0849E-01	2,0712E-01

Fuente: elaboración propia.

Una vez calculadas las propiedades elásticas anteriormente mencionadas, en la [tabla 7](#) se determina el porcentaje de diferencia entre las propiedades elásticas consultadas en la literatura y las calculadas con los datos del modelo numérico. En cuanto al módulo elástico, se obtuvo para el cuarzo 77,1 GPa, con un porcentaje de 3,61% de diferencia con respecto al valor de referencia, y para la calcita un valor de 49,4 GPa, con un 10,16% de diferencia. Los valores son aceptables considerando que se presentan variaciones de densidad en un mismo

mineral, como se observó en la [figura 4](#). El coeficiente de Poisson presentó menores porcentajes, con 2,15% para el cuarzo y 0.72% en la calcita.

En la [tabla 8](#) se muestran los resultados para la prueba tres, correspondiente a una muestra de arenisca que contiene ambos minerales (cuarzo y calcita). Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos determinados por la literatura para arenisca con porosidad menor al 8%.

Tabla 7. Resultados para el cuarzo y la calcita

Propiedad	Cuarzo			Calcita		
	Ref. [28]	Prueba 1	% diferencia	Ref. [28]	Prueba 2	% diferencia
Módulo elástico (GPa)	80	77,109	3,613	55	49,407	10,167
Coefficiente de Poisson	0,17	0,173	2,159	0,21	0,208	0,721

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Resultados para la arenisca

Propiedades	Arenisca	
	Porosidad < 8% [29]	Prueba 3
Módulo elástico (GPa)	40 - 70	60,55
Coefficiente de Poisson	0,1 - 0,15	0,2071

Fuente: elaboración propia.

Por último, se estudió la influencia del volumen representativo en la caracterización de las propiedades mecánicas. Para ello, se tomaron cuatro dominios definidos por cubos de diferente tamaño de arista como se muestra en la [figura 10](#), desde 7.5 mm hasta 15 mm. Estos cubos fueron ubicados en la tomografía manteniendo constantes las coordenadas de su centro geométrico. Se observa que en la primera muestra la fractura rellena de cuarzo ocupa gran parte del volumen seleccionado y que a medida que se aumenta el tamaño, la proporción de minerales es mayor para el cuarzo.

En la [tabla 9](#) se presentan el módulo elástico y el coeficiente de Poisson para cada muestra. Se observa que a medida que aumentó el tamaño de la muestra se incrementó el valor del módulo elástico, asociado al hecho de que se toma mayor proporción de cuarzo que de calcita al incrementar el tamaño del volumen representativo.

Tabla 9. Módulo elástico y coeficiente de Poisson para muestras de diferente tamaño

	Muestra			
	1	2	3	4
Longitud inicial (mm)	7,5	10	12,5	15
Módulo elástico (GPa)	63,498	67,889	69,805	71,427
Coefficiente de Poisson	0,214	0,177	0,186	0,164

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Se desarrolló una variación del método DRP en la etapa de segmentación por medio del software Bonemat, donde el mallado no depende de la geometría que presenta la roca, sino que se ajusta el modelo de material a partir de la escala Hounsfield que es registrada en la tomografía. Este proceso permite un análisis más preciso de las diferentes composiciones de la roca, puesto que tiene en cuenta cambios de densidades en un mismo mineral y en las zonas de transición entre minerales.

Con el fin de obtener resultados precisos se llevó a cabo un análisis de independencia de malla, donde se evidencia que, a partir de los 9260 nodos, la variación del desplazamiento es inferior al 1%. La malla cartesiana regular se puede trasladar y rotar según se requiera, para extraer el volumen representativo de la roca sobre el cual se van a caracterizar las propiedades mecánicas. Para desarrollar el modelo de elementos finitos en el software Ansys, fue indispensable la correcta asignación de condiciones de contorno, para asegurar que el modelo numérico correspondiera a lo que sería un ensayo de laboratorio real.

Los resultados obtenidos presentan un bajo porcentaje de error con respecto a los valores de referencia. Para el módulo elástico, el valor del cuarzo fue de 77,11 GPa, con una diferencia del 4%, y la calcita con 49,408 GPa presenta una diferencia de 10,1%. Se puede esperar que estos porcentajes disminuyan o aumenten según la ubicación en la tomografía en donde se realice la prueba, puesto que se partió de la premisa de que pueden existir variaciones de densidades dentro de un mismo mineral. Por otro lado, la asignación de propiedades estuvo limitada en cuanto al coeficiente de Poisson, puesto que en las tres pruebas se asignó como un valor constante. Sin embargo, en los resultados esta propiedad mostró porcentajes de diferencia menores al 3%. Para el caso de la arenisca, los resultados obtenidos se encuentran entre los rangos comunes.

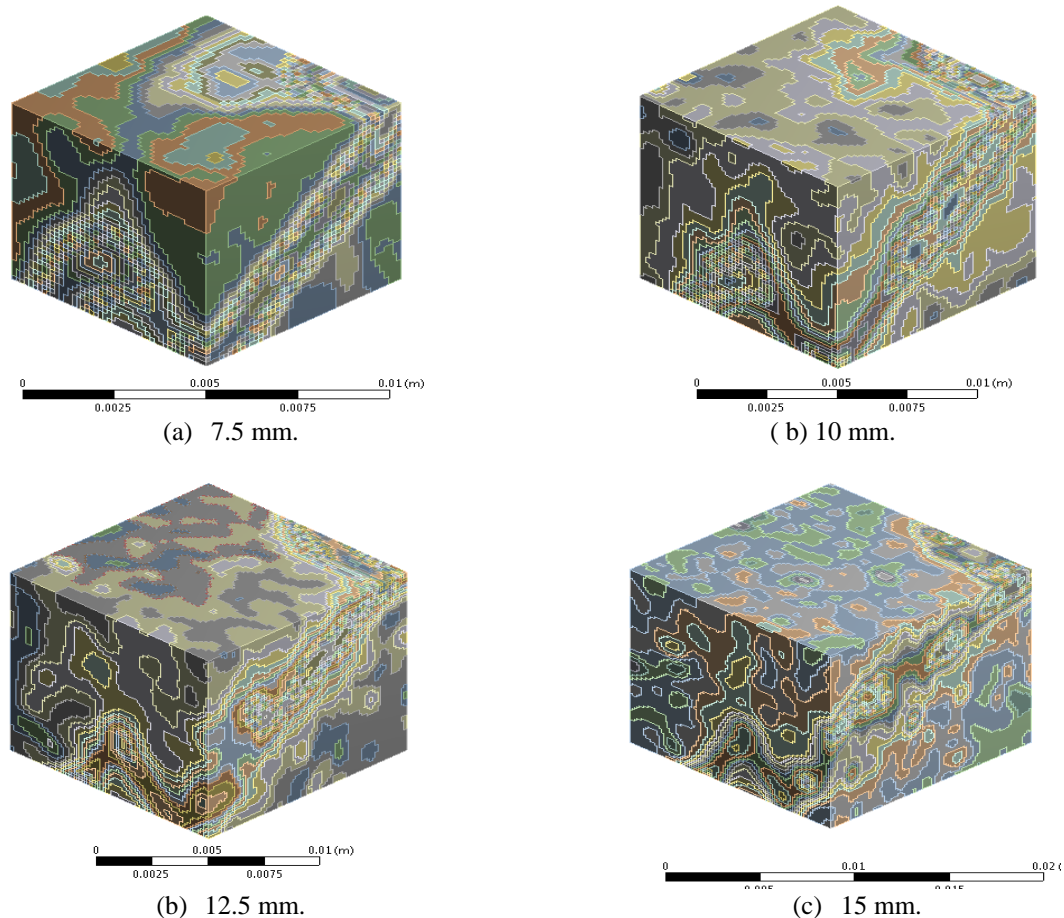


Figura 10. Variación de la proporción entre mineral de cuarzo y calcita. Fuente: elaboración propia.

El trabajo desarrollado permite mejorar los modelos que representan el comportamiento mecánico de las rocas al introducir información detallada del modelo del material, con el propósito de mejorar la planeación de campañas de perforación, estabilidad de pozos, operaciones de producción e inyección.

5. Recomendaciones

Para estudios posteriores se recomienda que el método de obtención de imágenes sea a partir de microtomografía computarizada, ya que esta tecnología presenta mejor resolución y puede suministrar más información de la escala Hounsfield. Para un mejor análisis y verificación de resultados, se deben realizar más ensayos mecánicos en laboratorio en muestras de roca para poder compararlos con los resultados numéricos. Se sugiere realizar un estudio más a fondo donde se puedan obtener nuevas relaciones entre Hounsfield - densidad, densidad - módulo elástico, teniendo en cuenta la porosidad presente en distintas muestras y tipos de rocas además de calcitas.

Referencias

- [1] C. S. Correa, "Metodología para estimar propiedades elásticas en muestras de rocas a través del uso de Física de Roca Digital (DRP). Caso de estudio: arenisca," trabajo de fin de grado Universidad Industrial de Santander, 2019.
- [2] Y. P. Goyes-Peñañiel, S. Khurama-Velasquez, O. Nikolaevich-Kovin, "Exploración de gilsonita usando tomografías de resistividad eléctrica con geometría tipo gradiente: Caso de estudio en Rionegro (Colombia)," *Rev. UIS Ing.*, vol. 19, no. 2, pp. 77–84, 2020, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020008>
- [3] V. Cnudde and M. N. Boone, "High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications," *Earth-Science Rev.*, vol. 123, pp. 1–17, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.003>

- [4] H. Andrä et al., “Digital rock physics benchmarks—Part I: Imaging and segmentation,” *Comput. Geosci.*, vol. 50, pp. 25–32, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.005>
- [5] H. Andrä et al., “Digital rock physics benchmarks—Part II: Computing effective properties,” *Comput. Geosci.*, vol. 50, pp. 33–43, Jan. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.008>
- [6] I. Varfolomeev, I. Yakimchuk, I. Safonov, “An application of deep neural networks for segmentation of microtomographic images of rock samples,” *Computers*, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/computers8040072>
- [7] C. Madonna, B. S. G. Almqvist, E. H. Saenger, “Digital rock physics: Numerical prediction of pressure-dependent ultrasonic velocities using micro-CT imaging,” *Geophys. J. Int.*, vol. 189, no. 3, pp. 1475–1482, 2012, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05437.x>
- [8] D. Benavente, “Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales,” in *Utilización de rocas y minerales industriales. Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía*, 2, 2006.
- [9] T. Farhana Faisal, A. Islam, M. S. Jouini, R. S. Devarapalli, M. Jouiad, M. Sassi, “Numerical prediction of carbonate elastic properties based on multi-scale imaging,” *Geomech. Energy Environ.*, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.100125>
- [10] N. Saxena et al., “Rock properties from micro-CT images: Digital rock transforms for resolution, pore volume, and field of view,” *Adv. Water Resour.*, vol. 134, no. August, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103419>
- [11] Y. Wang, Q. Teng, X. He, J. Feng, T. Zhang, “CT-image of rock samples super resolution using 3D convolutional neural network,” *Comput. Geosci.*, vol. 133, no. November 2018, p. 104314, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104314>
- [12] S. Karimpouli, P. Tahmasebi, “Segmentation of digital rock images using deep convolutional autoencoder networks,” *Comput. Geosci.*, vol. 126, no. October 2018, pp. 142–150, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.02.003>
- [13] S. A. Ardila Parra, H. G. Sánchez-Acevedo, O. A. González-Estrada, “Evaluation of damage to the lumbar spine vertebrae L5 by finite element analysis,” *Respuestas*, vol. 24, no. 1, pp. 50–55, 2019, doi: <https://doi.org/10.22463/0122820X.1804>
- [14] B. Ferrandiz, M. Tur, E. Nadal, “Simulación estructural de espumas de aluminio a partir de imágenes 2D mediante la combinación de técnicas de homogeneización y machine learning,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 2, pp. 223–240, 2017, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018020>
- [15] S. Chauhan et al., “Processing of rock core microtomography images: Using seven different machine learning algorithms,” *Comput. Geosci.*, vol. 86, pp. 120–128, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.10.013>
- [16] X. Tang, Z. Jiang, S. Jiang, Z. Li, “Heterogeneous nanoporosity of the Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the Sichuan Basin using the QEMSCAN, FIB-SEM, and nano-CT methods,” *Mar. Pet. Geol.*, vol. 78, pp. 99–109, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.09.010>
- [17] C. Madonna et al., “Synchrotron-based X-ray tomographic microscopy for rock physics investigations,” *75th Eur. Assoc. Geosci. Eng. Conf. Exhib. 2013 Inc. SPE Eur. 2013 Chang. Front.*, vol. 78, no. 1, pp. 415–419, 2013, doi: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20130344>
- [18] M. Andrew, “A quantified study of segmentation techniques on synthetic geological XRM and FIB-SEM images,” *Comput. Geosci.*, vol. 22, no. 6, pp. 1503–1512, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s10596-018-9768-y>
- [19] P. Iassonov, T. Gebrenegus, M. Tuller, “Segmentation of X-ray computed tomography images of porous materials: A crucial step for characterization and quantitative analysis of pore structures,” *Water Resour. Res.*, vol. 45, no. 9, pp. 1–12, 2009, doi: <https://doi.org/10.1029/2009WR008087>
- [20] N. Saxena, R. Hofmann, F. O. Alpak, J. Dietderich, S. Hunter, R. J. Day-Stirrat, “Effect of image segmentation & voxel size on micro-CT computed effective transport & elastic properties,” *Mar. Pet. Geol.*, vol. 86, pp. 972–990, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.07.004>

- [21] I. Gitman, H. Askes, L. Sluys, “Representative volume: Existence and size determination,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 74, no. 16, pp. 2518–2534, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.12.021>
- [22] A. Kameda, J. Dvorkin, Y. Keehm, A. Nur, W. Bosl, “Permeability-porosity transforms from small sandstone fragments,” *Geophysics*, vol. 71, no. 1, pp. 11–19, 2006, doi: <https://doi.org/10.1190/1.2159054>
- [23] N. Saxena et al., “Imaging and computational considerations for image computed permeability: Operating envelope of Digital Rock Physics,” *Adv. Water Resour.*, vol. 116, no. March, pp. 127–144, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.04.001>
- [24] N. Saxena, G. Mavko, R. Hofmann, N. Srisutthiyakorn, “Estimating permeability from thin sections without reconstruction: Digital rock study of 3D properties from 2D images,” *Comput. Geosci.*, vol. 102, no. February, pp. 79–99, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.02.014>
- [25] N. Saxena et al., “References and benchmarks for pore-scale flow simulated using micro-CT images of porous media and digital rocks,” *Adv. Water Resour.*, vol. 109, pp. 211–235, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.09.007>
- [26] J. Dvorkin, N. Derzhi, E. Diaz, Q. Fang, “Relevance of computational rock physics,” *Geophysics*, vol. 76, no. 5, 2011, doi: <https://doi.org/10.1190/geo2010-0352.1>
- [27] I. W. Farmer, *Engineering properties of rocks*. Dunfermline, Reino Unido: Better World Books Ltd, 1968.
- [28] E. A. Winograd, S. Bosco, J. P. Álvarez, M. Álvarez Mendoza, D. Hryb, M. Sánchez, “Characterization of mechanical properties of rocks using numerical simulations and image analysis,” in *49th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, 2015.
- [29] R. D. Lama, V. S. Vutukuri, *Handbook on mechanical properties of rocks*. Clausthal, Germany: Trans Tech Publications, 1978.
- [30] E. C. Pegg and H. S. Gill, “An open source software tool to assign the material properties of bone for ABAQUS finite element simulations,” *J. Biomech.*, vol. 49, no. 13, pp. 3116–3121, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.07.037>
- [31] L. Miquel-González, G. Ortiz-Rabell, O. Castro-Castiñeira, “Tomography axial computerized technique application to improve Cuban oil fields seal and reservoir rocks characterization,” *Boletín Ciencias la Tierra*, no. 41, pp. 73–80, 2017, doi: <https://doi.org/10.15446/rbct.n41.55046>
- [32] ANSYS Inc, *ANSYS®Academic Research Mechanical, Release 19.2, Help System*. Canonsburg: ANSYS, Inc, 2018.