

**Estandarización de Parámetros Operacionales para el Ensayo de Indentación en el
Laboratorio de Mecánica de Rocas del ICP**

Víctor Alberto Porras Galvis

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

Director(a):

Zuly Himelda Calderón Carrillo, PhD en Ingeniería Química

Codirectores:

Jenny Mabel Carvajal, Magíster en Ingeniería área Énfasis Hidrocarburos;

Néstor Fernando Saavedra, Magíster en Ingeniería de Petróleos; Jhoao Alexander

Villabona Camacho, Químico



Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Químicas

Escuela de Ingeniería Petróleos

Bucaramanga

2018

Agradecimientos

El autor extiende sus agradecimientos a:

Dios por ser quien guía cada uno de mis pasos.

La Universidad Industrial de Santander por haberme brindado una educación de calidad a nivel profesional y personal.

El grupo de investigación de Estabilidad de Pozo por la oportunidad de elaborar este trabajo.

La Doctora Zuly Calderón, Ingeniera Jenny Carvajal, Ingeniero Néstor Saavedra, Jhoao Villabona, Ingeniero Miguel Palencia y demás profesionales del grupo de investigación de Estabilidad de Pozos y del Instituto Colombiano de Petróleos por sus consejos y guía durante el desarrollo del trabajo.

Al Instituto Colombiano de Petróleo ICP, por ofrecer sus instalaciones y permitir el uso de los implementos necesarios para el desarrollo de la investigación.

A mis padres por su paciencia infinita y a mis hermanas por el apoyo incondicional.

A Mariana Pérez la ayuda brindada a lo largo de toda la elaboración de la tesis.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Marco Teórico.....	17
2.1 Vidrio.....	17
2.2 Propiedades mecánicas del vidrio.....	18
2.2.1 La Elasticidad del vidrio	18
2.2.3 Propiedades Generales de los vidrios sodo-cálcicos.....	20
2.3 Caracterización de la formación Tambor.....	22
2.4 Formación Tetuán.	23
2.4.1 Descripción Litológica de las Calizas de Tetuán.....	24
2.4.2 Ambiente Sedimentario	25
2.5 Formación La Luna.....	26
2.6 Equipo.....	27
2.6.1 Analizador de texturas	27
2.6.2 Especificaciones técnicas del equipo.....	28
2.6.3 Parámetros del equipo.....	28
2.7 Gráfica carga vs desplazamiento.	29
3. Diseño Experimental en Medio Controlado	31
3.1 Terminología.....	33

3.2 Factores que conforman el diseño experimental.....	34
3.3 Detección de las variables.....	35
2.4 Definición de las variables.....	36
3.4.1 Profundidad de penetración o desplazamiento	36
3.4.2 Tiempo de la prueba.....	36
3.4.3 Fuerza Aplicada	36
3.4.4 Tamaño de la muestra.	36
3.4.5 Velocidad de prueba de la carga aplicada.....	36
3.4.6 Velocidad pre-prueba.....	36
3.4.7 Velocidad pos-prueba.	36
3.4.8 Fuerza crítica de Transición (CTF).....	36
3.4.9 Módulo de Indentación (IM).....	37
3.5 Clasificación de diseños experimentales	37
3.5.1 Experimento Puro	37
3.5.2 Pre – Experimento.....	38
3.5.3 Cuasi–experimentos.....	38
4. Metodología para la Elaboración del Análisis de Sensibilidad.	39
5. Análisis de Sensibilidad.....	43
5.1 Medio controlado.....	45
5.2 Resultados análisis de sensibilidad.	47
6. Tratamiento Estadístico	53
6.1 Cajas y bigotes.....	53
6.2 ANOVA simple.	57

6.2.1 Resumen ANOVA IM	58
6.2.2 Análisis de varianza IM	58
6.2.3 Resumen ANOVA CTF.....	59
6.2.4 Análisis de varianza CTF.....	60
6.3 Prueba de TUKEY.	60
7. Error Sistemático.	71
7.1 Módulo de Young (E).	71
7.2 Dureza superficial (H).....	73
8. Selección de la Mejor Combinatoria.....	78
9. Selección de Litologías	84
9.1 Preparación de muestras	85
10. Pruebas Preliminares en Rocas	86
10.1 Diseño experimental.	89
11. Análisis de Resultados.	91
11.1 Resultados finales.	96
12. Conclusiones	98
13. Recomendaciones	100
Referencias Bibliográficas	101
Apéndices.....	104

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Variables dependientes e independientes.</i>	37
Tabla 2. <i>Parámetros utilizados en la literatura.</i>	39
Tabla 3. <i>Combinatoria de parámetros, prueba base.</i>	40
Tabla 4. <i>Matriz análisis de sensibilidad.</i>	44
Tabla 5. <i>Resultados análisis de sensibilidad.</i>	48
Tabla 6. <i>Parámetros con mejor coeficiente de variación.</i>	49
Tabla 7. <i>Matriz combinatoria de parámetros con mejor coeficiente de variación.</i>	50
Tabla 8. <i>Resultados IM y CTF para las combinatorias.</i>	51
Tabla 9. <i>Datos construcción gráfico cajas y bigotes.</i>	54
Tabla 10. <i>Discretización de los valores atípicos.</i>	56
Tabla 11. <i>Resumen ANOVA IM</i>	58
Tabla 12. <i>Análisis de varianza IM</i>	58
Tabla 13. <i>Resumen ANOVA CTF</i>	59
Tabla 14. <i>Análisis de varianza CTF</i>	60
Tabla 15a. <i>Reemplazo de valores atípicos para CTF.</i>	62
Tabla 15b. <i>Reemplazo de valores atípicos para CTF.</i>	62
Tabla 16. <i>Resumen datos análisis de Tukey para CTF.</i>	63
Tabla 17. <i>Matriz ejemplo analisis de Tukey.</i>	63
Tabla 18. <i>Matriz resultados cuantitativos análisis de Tukey para CTF.</i>	65
Tabla 19. <i>Matriz resultados cualitativa análisis de Tukey para CTF</i>	66
Tabla 20a. <i>Reemplazo de valores atípicos para IM.</i>	67
Tabla 20b. <i>Reemplazo de valores atípicos para IM</i>	67

Tabla 21. <i>Resumen datos análisis de Tukey para IM.</i>	68
Tabla 22. <i>Matriz resultados cuantitativos análisis de Tukey para IM.</i>	69
Tabla 23. <i>Matriz resultados cualitativos análisis de Tukey para IM.</i>	70
Tabla 24. <i>Resultados módulo de Young y dureza superficial.</i>	74
Tabla 25. <i>Módulo de Young y Dureza superficial Teóricos.</i>	75
Tabla 26. <i>Selección combinatoria según valor teórico de E y H.</i>	79
Tabla 27. <i>Selección combinatoria según promedio de E y H.</i>	80
Tabla 28. <i>Selección combinatoria según coeficiente de variación de E y H.</i>	81
Tabla 29. <i>Selección combinatoria según promedio de CTF & IM.</i>	82
Tabla 30. <i>Selección combinatoria según coeficiente de variación de CTF & IM</i>	83
Tabla 31. <i>Combinatorias seleccionadas para hacer los ensayos en rocas.</i>	84
Tabla 32. <i>Matriz combinatorias rocas.</i>	90
Tabla 33a. <i>Resultados fuerza crítica de transición y módulo de indentación para las tres litologías.</i>	91
Tabla 33b. <i>Resultados dureza superficial y módulo de Young para las tres litologías.</i>	92
Tabla 34. <i>Selección combinatoria areniscas según E & H.</i>	93
Tabla 35. <i>Selección combinatoria areniscas según CTF & IM.</i>	94
Tabla 36. <i>Selección combinatoria caliza según E & H.</i>	94
Tabla 37. <i>Selección combinatoria caliza según CTF & IM.</i>	95
Tabla 38. <i>Selección combinatoria Shale según E & H.</i>	95
Tabla 39. <i>Selección combinatoria Shale según CTF & IM.</i>	96
Tabla 40. <i>Parámetros óptimos para arenisca, shale y vidrio.</i>	97
Tabla 41. <i>Coefficientes de variación de los parámetros óptimos.</i>	97

Lista de Figura

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Analizador de textura.....	28
<i>Figura 2.</i> Carga vs desplazamiento.	30
<i>Figura 3.</i> Modelo General de un proceso.	32
<i>Figura 4.</i> Fuerza Vs Desplazamiento para velocidad de preprueba máxima.	40
<i>Figura 5.</i> Fuerza Vs Desplazamiento para velocidad de preprueba de 3.75, 2.5, 0.75 [mm/sec].	41
<i>Figura 6.</i> Fuerza Vs Desplazamiento VP = 0.01 y 2 [mm/sec]	42
<i>Figura 7.</i> Huella dejada por el indentador a diferentes velocidades de prueba.....	42
<i>Figura 8.</i> Pruebas preliminares en vidrio para determinar desplazamiento máximo óptimo.	43
<i>Figura 9.</i> Distribución de los puntos sobre el área del vidrio.....	45
<i>Figura 10.</i> Protocolo de indentación en muestras de vidrio.	46
<i>Figura 11.</i> Modificaciones del Analizador de Texturas.	46
<i>Figura 12.</i> Coeficiente de variación para IM y CTF.	48
<i>Figura 13.</i> Promedio CTF combinatorias análisis de sensibilidad.	52
<i>Figura 14.</i> Promedio IM combinatorias análisis de sensibilidad.	52
<i>Figura 15.</i> Diagrama cajas y bigotes.	54
<i>Figura 16.</i> Representación del Módulo de Young (a) Prueba del laboratorio, (b) relación constitutiva, y (c) resultado de una prueba de compresión.....	72
<i>Figura 17.</i> Módulo de Young en gráfica esfuerzo Vs Deformación.	73
<i>Figura 18.</i> Dureza superficial (H) en grafica esfuerzo Vs deformación.	74
<i>Figura 19.</i> Resultados dureza superficial (H).....	76

<i>Figura 20.</i> Resultados módulo de Young (E).....	76
<i>Figura 21.</i> Areniscas de Tambor (mesa de los santos).....	84
<i>Figura 22.</i> Calizas de Tetuán.....	85
<i>Figura 23.</i> Shale de la Luna.....	85
<i>Figura 24.</i> División de las muestras de Areniscas.....	86
<i>Figura 25.</i> Pulidora de caras.....	86
<i>Figura 26.</i> Pruebas preliminares en rocas.....	87
<i>Figura 27.</i> Carga Vs Desplazamiento para diferentes DM en arenisca.....	88

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Familia de Graficas CMB9 en Vidrio.....	105
Apéndice B. Familia de Graficas CMB7 en Arenisca.	108
Apéndice C. Familia de Graficas PB en Caliza.	111
Apéndice D. Familia de Gráficas VPP1R en Shale.	114

Resumen

Título: Estandarización de parámetros operacionales para el ensayo de indentación en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP.*

Autor: Víctor Alberto Porras Galvis**

Palabras Claves: Indentación, vidrio, shale, arenisca, caliza, estandarización.

Descripción:

Las pruebas índice han teniendo gran auge en los últimos años en la industria de los hidrocarburos pues permiten determinar aproximaciones de las propiedades mecánicas de las rocas de forma simple y más económica que las realizadas con equipos convencionales.

El ensayo de indentación es de carácter no destructivo y brinda un valor aproximado de parámetros geomecánicos como los son: Fuerza crítica de transición, dureza superficial, módulo de Young y módulo de indentación; parámetros utilizados para la caracterización de las rocas.

Para determinar y estandarizar la combinatoria de parámetros óptimos, en las diferentes litologías (arenisca, caliza y shale), se utilizó la estadística por medio de: Cajas y bigotes, para identificar y eliminar los puntos atípicos; ANOVA, para determinar si habían diferencias significativas entre los resultados arrojados por las diversas combinatorias; prueba de Tukey, para individualizar cuales eran las combinatorias que presentaban diferencia honestamente significativa y finalmente un error estadístico para determinar cuál de las combinatorias estaba más cerca de un valor nominal.

Con el fin de mejorar la exactitud de los resultados del ensayo de indentación se identificaron las variables críticas del proceso, se realizó el análisis de sensibilidad de las variables en un medio controlado y se extrapolaron los resultados obtenidos a litologías tipo reservorio.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director(a): Zuly Himelda Calderón Carrillo, PhD.

Abstract

Title: Standardization of operational parameters for the indentation test in the ICP laboratory of rock mechanics*.

Author: Victor Alberto Porras Galvis**

Keywords: Indentation, glass, shale, sandstone, limestone, standardization.

Description:

The tests have been very important in recent years in the hydrocarbons industry because they allow to determine approximations of the mechanic properties of rocks in a simple and more economic way than those made with conventional equipment.

The indentation test is non-destructive and provides an approximate value of geomechanical parameters such as: Transition force, hardness-superficial, Young module and indentation module; parameters used for the characterization of rocks.

To determine and standardize the combination of optimal parameters, in different lithologies (sandstone, limestone and shale), the statistics are used by means of: boxes and whiskers, to identify and eliminate the atypical points; ANOVA, to determine if there were significant differences between the results by the various combinatorial; the Tukey test, to identify which were the combinatorial that presented significant difference and finally a statistical error to determine which of the combinatorial was closer to a nominal value.

In order to improve the accuracy of the results of the trial of indentation there were identified the critical variables of the process, it was analyzed the sensitivity of the variables in a controlled medium and extrapolated the results obtained for litholiges reservoir type.

* Degree Work

** Faculty of physical-chemical engineering. Petroleum Engineering School. Director: Zuly Himelda Calderon Carrillo, PhD.

Introducción

La caracterización geomecánica de las formaciones en Colombia, ha tenido gran auge en los últimos años, pues permite conocer y comprender el comportamiento mecánico de las rocas, aplicado a la industria de los hidrocarburos se traduce en un menor costo de producción. Los registros de pozo brindan la mayor cantidad de información para caracterizar geomecánicamente un yacimiento; sin embargo, tiene que ser calibrados con pruebas de laboratorio.

Generalmente no se dispone de muestras de un tamaño ideal para realizar las pruebas de laboratorio convencionales y poder calibrar los registros, por esto se crean las pruebas índice, las cuales nos permite tener un valor aproximado de los parámetros geomecánicos y se pueden realizar en muestras de menor tamaño.

La indentación es una prueba índice de carácter no destructivo y se puede realizar en rípios de perforación, con la cual se obtiene valores de módulo de indentación, fuerza crítica de transición, dureza superficial y módulo de Young. Debido a que requiere la elaboración e interpretación de 17 ensayos para obtener el valor de un resultado, se han venido presentado porcentajes de coeficiente de variación del orden de 23% al 45%, lo que disminuye la exactitud del ensayo.

Con el fin de mejorar la confiabilidad, la exactitud y dispersión de las variables respuesta en el ensayo de indentación, se decide estandarizar los parámetros operacionales para litologías reservorio. Para esto se realiza un análisis de sensibilidad en un medio controlado, para identificar las variables críticas del ensayo, luego se extrapolan los resultados a un medio no controlado y se selecciona la mejor combinatoria para litologías tipo reservorio.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

El objetivo de este trabajo de investigación es obtener coeficientes de variación máximos del 15% en el ensayo de indentación, estandarizando los parámetros operacionales del equipo en litologías tipo reservorio, para mejorar la confiabilidad y exactitud del ensayo.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar las diferentes variables dependientes e independientes involucradas en la prueba de indentación mediante revisión bibliográfica detallada.
- Realizar un análisis de sensibilidad para identificar las variables más influyentes del ensayo de indentación utilizando un medio controlado
- Realizar la estandarización del ensayo de indentación en un medio no controlado con base en los resultados del análisis de sensibilidad.
- Validar los resultados de la estandarización con datos obtenidos en el laboratorio de mecánica de rocas en el ICP.

2. Marco Teórico

2.1 Vidrio.

El vidrio es un material que ha sido usado por el hombre desde hace milenios. Posiblemente sea el material más viejo fabricado por el hombre y que aún continúa afectando la vida presente. El vidrio está presente en formas tan diversas como: ventanas, vasos, envases de todo tipo, telescopios, en la industria nuclear como escudo de radiación, en electrónica como sustrato sólido para circuitos, en la industria del transporte, de la construcción etc. (Pearson, 2009).

Por sus características intrínsecas (brillantez, resistencia al uso, transparencia, etc.), el vidrio es un material difícilmente sustituible (y a veces, realmente insustituible) en la mayoría de sus aplicaciones. Igualmente, remarcable es la disponibilidad y bajo costo de las materias primas usadas para producirlo, especialmente su componente más importante: la sílice (que se encuentra en la arena). El vidrio es un material amorfo producido por la fusión de sílice y aditivos a muy altas temperaturas. Al enfriar se convierte en un material duro y brillante sin estructura de grano. (Pearson, 2009).

Pero el término “vidrio” no es claro. A diferencia de otros productos usados cotidianamente, la palabra “vidrio” no describe exactamente una composición y propiedades definidas del producto. Esto es porque la palabra “vidrio” define -en realidad - un estado de la materia (como “gas”, “líquido” y “sólido cristalino”). Más correctamente: un “vidrio” es un sólido no cristalino, aunque realmente esta definición no nos lleva muy lejos (muchos plásticos también son sólidos no cristalinos). Una verdadera definición de “vidrio” está aún pendiente. (Pearson, 2009).

El producto llamado vidrio es una sustancia dura, normalmente brillante y transparente, compuesta principalmente de silicatos y álcalis fusionados a alta temperatura. Se lo considera un sólido amorfo, porque no es ni sólido ni líquido, sino que existe en un estado vítreo. Los componentes principales del vidrio, como ya se dijo, son productos que se encuentran fácilmente en la naturaleza: sílice, cal y carbonato de sodio. Los materiales secundarios son usados para dar propiedades especiales o para facilitar el proceso de fabricación. De la mezcla de los materiales secundarios con las materias primas básicas en el porcentaje correcto se pueden obtener diferentes tipos de vidrio, los cuales pueden ser clasificados de acuerdo con su composición química. Dentro de cada tipo, a su vez, hay numerosas composiciones distintas. (Pearson, 2009).

Una posible clasificación de los vidrios según su composición química sería la siguiente:

- Vidrio sodio- cálcico
- Vidrio Plomado
- Vidrio Borosilicato
- Vidrio Especiales

2.2 Propiedades mecánicas del vidrio.

2.2.1 La Elasticidad del vidrio. Si se ejerce un empuje en el centro de una placa de vidrio, o si se trata de doblarla, se observa que ésta, en efecto, se doblará. No mucho realmente, pero algún grado de curvado o doblado es posible. De hecho, las reflexiones que se producen en un vidrio grande cuando un viento fuerte incide sobre él, son debidas a que el vidrio se dobla por la presión del viento.

El vidrio es un material inusual en este aspecto, no porque se doble o curve, la mayoría de los materiales lo hacen, sino porque retorna exactamente a su forma original cuando el doblado o fuerza de curvado es removida.

Esta característica del vidrio lo clasifica como un material perfectamente elástico. Si se va aumentando la fuerza aplicada, el vidrio finalmente romperá cuando se alcance su última capacidad de resistencia. Pero en cualquier punto antes de la rotura, el vidrio no deformará permanentemente. Para ser preciso, el vidrio debe ser clasificado como cercano a la elasticidad perfecta.

Un vidrio colocado en su marco se verá sometido a las siguientes fuerzas:

La fuerza de flexión: producida por las cargas de viento, nieve o personas apoyándose sobre el vidrio.

La fuerza de flexión actuante genera:

- Compresión sobre la superficie del vidrio expuesta a la carga del viento.
- Tracción sobre la cara opuesta.

Mientras la fuerza de Compresión actúa “prensando” el material, la de tracción lo hace tendiendo a “separar” el material.

- La fuerza de corte: actúa en los extremos sujetos del vidrio y actúa como hojas de una cuchilla que tiende a separar dos partes del material.

El vidrio tiene mucha resistencia a los esfuerzos de compresión y corte, pero poca resistencia a los esfuerzos de tracción. Un vidrio rompe debido a los esfuerzos de tracción.

La resistencia del vidrio es sólo levemente afectada por su composición química, pero es altamente dependiente de la condición de la superficie. El vidrio producido comercialmente puede adquirir pequeñas picaduras y rayaduras en el curso de la manufactura y más tarde en el uso. Cualquier esfuerzo aplicado sobre el vidrio se concentrará en esos puntos de daños, de tal modo que la tensión se incrementará por encima de la cantidad de esfuerzo original aplicado. El vidrio no se desintegra ni explota sometido a las cargas de flexión, sino que la rotura se origina en un punto específico (donde hay una falla) la cual se convierte en una pequeña grieta y de allí progresa extendiéndose rápidamente sobre el vidrio y generando la rotura.

En la resistencia del vidrio a la rotura también influye el tiempo durante el cual se aplicó la tensión. A mayor tiempo de aplicación, la capacidad de resistencia del vidrio disminuye respecto a la original.

2.2.3 Propiedades Generales de los vidrios sodio-cálcicos. Las propiedades físicas más importantes son las siguientes: (Pearson, 2009).

- Densidad: 2,5 kg/m³, lo que significa un peso de 2,5 kg/m² por cada mm de espesor (es comparable con la densidad del aluminio: 2,6 kg/ m²).
- Punto de Ablandamiento: aproximadamente 730°C.
- Conductividad Térmica (coeficiente lambda) = 1.05 W/mK. La diferencia existente entre varios tipos diferentes de vidrio plano es muy pequeña como para ser considerada.
- Coeficiente de Dilatación Lineal: es el alargamiento experimentado por la unidad de longitud al variar 1° C la temperatura. Para el vidrio (entre 20 y 220°C) es $9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Por ejemplo: un vidrio de 2000 mm de longitud que aumente su temperatura en 30° C sufrirá un alargamiento de $2000 \times (9 \times 10^{-6}) \times 30 = 0.54 \text{ mm}$.

- Dureza: a continuación, se indican dos escalas que miden la dureza de los materiales. En la escala de Mohs esta de 6 a 7 y en la escala de Knoop está en 575 Kg/mm²- Escala Mohs.

- Módulo de Elasticidad (módulo de Young): $E = 700.000 \text{ kg/cm}^2$.
- Coeficiente de Poisson: varía entre 0,22 a 0,23.
- Resistencia a la intemperie: no presenta cambios.
- Resistencia Química: El vidrio resiste a la mayoría de los ácidos excepto al ácido fluorhídrico y al fosfórico. Los álcalis, sin embargo, atacan la superficie del vidrio. Si sobre el vidrio caen elementos típicos de la construcción (cal, cemento, etc.), los álcalis de esos productos al ser liberados por la lluvia causaran abrasión de la superficie del vidrio.

- Resistencia Mecánica: El vidrio siempre rompe por tensiones de tracción en su superficie.

- Resistencia a la Tracción: varía entre 300 y 700 kg/cm², dependiendo de la duración de la carga. Si la carga es permanente la resistencia a la tracción disminuye un 40%.

- Resistencia a la Compresión: aproximadamente 10.000 kg/cm² es el peso necesario para romper un cubo de vidrio de 1 cm de lado).

- Varios: un vidrio con su superficie esmerilada o arenada tiene un 30% menos de resistencia a la tracción. El vidrio laminado simétrico en condiciones normales de uso en aberturas presenta una resistencia por lo menos un 10% menor que un float monolítico de igual espesor total.

- Resistencia a la Temperatura: un vidrio de 6 mm calentado a una mayor temperatura y sumergido en agua a 21° C romperá cuando la diferencia de temperatura alcance los 55° C aproximadamente.

- Índice de Refracción: 1,52 (El índice de refracción varía para luces de diferentes longitudes de onda).
- Transmitancia Térmica (valor U): 5,8 W/m² °C.
- Transmisión de luz visible: depende del tipo de vidrio; para el vidrio Float: 87%, Vidrio Armado 75%, Translúcido 70 a 85% (estos son valores aproximados para vidrio de 6 mm basados en luz difusa incidentes desde el cielo sobre la ventana). Los vidrios color y reflectivos tienen valores significativamente menores.
- Transmisión de Infrarrojos: El vidrio común tiene la propiedad de ser relativamente transparente a los rayos infrarrojos de onda corta, pero relativamente opacos a los de longitud de onda larga. Esta es la razón por la que los vidrios para horticultura acumulan calor en el interior de los invernaderos. La radiación de los rayos del sol de onda corta pasa por el vidrio y es absorbida por plantas, paredes, etc., la que reirradia parte de esta como radiación de longitud de onda larga la que, parcialmente, es reflejada hacia el interior.
- Transmisión Ultravioleta: el vidrio común transmite una proporción de los rayos UV del sol. Para impedir el ingreso de los rayos UV, se debe utilizar vidrios laminados.

2.3 Caracterización de la formación Tambor.

La formación Tambor es una arenisca cretácica discordante con la formación Girón en un ángulo muy suave. Debido a esta situación ha sido difícil identificar los límites exactos entre estas dos formaciones; sin embargo, el límite se puede observar con facilidad cuando la formación Tambor reposa sobre los sedimentos lutíticos finos de la formación Girón.

En el caso cuando la Formación Tambor se apoya sobre las areniscas de Girón, diferenciar los límites entre estas es bastante complicado debido a la similitud presentada entre los sedimentos de la formación Girón con los sedimentos de Tambor Inferior.

En la formación Tambor perteneciente a la región de la Mesa de los Santos y Zapatoca se distinguen tres niveles, dos niveles uno inferior y otro superior de arenisca y un nivel medio el cual es más lutítico.

En la región de la Mesa de los Santos se puede observar que los niveles inferior y medio de la formación Tambor adelgazan hacia el este, hacia el macizo, viéndose también una leve discordancia en el borde este de la Mesa entre el nivel superior e inferior.

En la carretera que conduce a la Mesa se puede observar que la formación Tambor presenta un espesor aproximado de 120 m frente a más de 200 m que presenta el otro borde de la Mesa en la región de San Javier.

La formación Tambor está ausente, se destacan, algunos puntos en la región de Guaca – San Andrés, al este del Macizo. Esto se debe al hecho que existen áreas donde Tambor no se depositó, o se depositó con poco espesor y de manera incompleta por lo cual fue erosionada inmediatamente. (Revistas UIS, Boletín de Geología, 1963).

2.4 Formación Tetuán.

De acuerdo con la literatura geológica, el término Calizas de Tetuán fue establecido por la Texas Petroleum Company (1962), para designar las calizas en el campo Ortega (Barrio y Coffield 1962, en Peña J., et al., 1999). En con estudios anteriores, las calizas de Tetuán son una intercalación de calizas y shales calcáreos fisiles en las que en algunas zonas se encuentran niveles concrecionales e impregnaciones de hidrocarburos y alto contenido de materia orgánica. También

se encontró que este miembro Tetuán infrayace a la Shale de Bambucá y suprayace concordantemente a la formación Caballos. (Sanabria & Trespalacios, 2010).

2.4.1 Descripción Litológica de las Calizas de Tetuán. Según estudios realizados por varios autores, el Miembro Tetuán se subdivide informalmente en 3 segmentos. A continuación, se hace la descripción de cada uno.

- Segmento 1: Suprayace concordantemente al nivel superior de la Formación Caballos. Se inicia con una capa muy gruesa de Packstone que grada a Wackstone muy gruesa, que al tope es de color gris oscuro a claro y con límites ligeramente ondulados (Modificado de Peña J., et al 1999). Seguidamente se encuentra una sucesión de capas medianas de Wackstone intercaladas con shales calcáreos muy fisiles de color negro (Sanabria & Trespalacios, 2010).

- Segmento 2: Hacia la base de éste se encuentra un paquete de Shales calcáreos fisiles de color negro con laminación muy fina ondulosa no paralela. Ocasionalmente se encuentran capas finas de Mudstone con presencia de conchas (Sanabria & Trespalacios, 2010).

Hacia el tope del segmento se encuentra una sucesión constante de capas gruesas a medias de Wackstone de color gris oscuro de manera tabular y con límites ligeramente ondulados, intercaladas con shales calcáreos fisiles de color negro. En las calizas se presenta bioturbación; se encuentran bivalvos, gasterópodos, amonitas, foraminíferos, fragmentos de equinodermos. Se encuentran impregnaciones de hidrocarburos. (Sanabria & Trespalacios, 2010).

- Segmento 3: Este segmento es la parte superior del Miembro Tetuán está compuesto por una intercalación de capas finas de Mudstone de color gris oscuro y forma lenticular, intercaladas con capas finas a medias de Shale calcáreo fisil. En este segmento se hace notable el fuerte olor a

petróleo al romper una roca debido a la impregnación ocasionada por la presencia de hidrocarburos. (Sanabria & Trespalacios, 2010).

2.4.2 Ambiente Sedimentario. El ambiente en el cual se depositaron las calizas de Tetuán se ha interpretado como una plataforma carbonatada abierta, tipo rampa (Read, 1985, James & Kendall, 1992, Jones & Desrochers, 1992; en Peña J., 1999), desarrollada en un ambiente tectónico pericratónico de aguas cálidas y con moderada velocidad de producción de carbonatos (Sanabria & Trespalacios, 2010).

- Segmento 1: Este intervalo se encuentra inicialmente en un ambiente de plataforma mixta, predominantemente carbonática, que finaliza en un ambiente dominado totalmente por la depositación de carbonatos. La fauna fósil en este segmento es principalmente del Cretácico (bivalvos con concha gruesa) (Como se citó en Peña J., 1999).

El decrecimiento en el porcentaje y tamaño de terrígenos evidencia una progresiva migración del área fuente o entrapamiento de sedimentos en la línea de costa durante la transgresión, que estimuló la producción y acumulación de carbonatos. Este hecho permitió la depositación de capas de Packstone y Wackstone (1999), (Inden, R. & Moore, C 1983; en Peña J., et al. 1999), son típicas de ambientes de transición entre la parte baja de la rampa somera y la parte superior de la rampa profunda en donde prevalecen las condiciones de baja energía. (Sanabria & Trespalacios, 2010).

- Segmento 2: En la parte inferior se tiene un ambiente deposicional de aguas tranquilas en la tras-rampa (facies de llanuras mareales en un ambiente protegido y/o subaéreo) a rampa somera. Las condiciones ambientales que afectaron la producción de carbonatos son: temperatura del agua,

disponibilidad de luz, oxígeno en el agua, tasa de sedimentación, aporte de material terrígeno. (Sanabria & Trespalacios, 2010).

En la parte superior hay presencia de litofacies de Wackstone gruesas a finas y Packstone gruesas y finas; son comunes en ambientes de rampa somera (Peña J., *et al*, 1999).

La parte final de este segmento se interpreta como la transición de un ambiente de rampa somera a profunda. Esto se evidencia en el decrecimiento del tamaño y cantidad de la macrofauna, representada principalmente por bivalvos en las capas superiores, y el aumento simultáneo de la microfauna (Peña J., *et al*, 1999).

- Segmento 3: Está representado por la profundización y posterior ahogamiento de la plataforma carbonatada. La depositación de los Mudstone foraminíferos señala condiciones ambientales adecuadas solamente para la proliferación de organismos plantónicos. Tales características permiten interpretar un ambiente anóxico de aguas tranquilas y profundas por debajo del nivel de acción de las tormentas, debido a la ausencia de tormentitas que interrumpen la secuencia de sedimentación uniforme hacia el tope de la unidad (Peña J., *et al*, 1999).

2.5 Formación La Luna.

La Formación La Luna de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena es una unidad calcárea fina constituida por biomicritas, con variaciones graduales a lo largo de la sucesión. Estas variaciones proporcionan las características que permiten definir adecuadamente cada uno de los Miembros (Salada, Pujamana y Galembo). Los sedimentos basales de la unidad se desarrollaron sobre la superficie transgresiva que coincide con la inundación regional a inicios del Turoniano. Las intercalaciones de capas enriquecidas en terrígenos en las biomicritas o son cenizas volcánicas

o provienen de áreas continentales lejanas y se constituyen en los aportes secundarios que definen los cambios que sustentan los miembros (Pérez, Puentes, & Sierra, 2015).

El Miembro Salada está compuesto por biomicritas de foraminíferos plantónicos, con capas intercaladas afectadas por procesos diagenéticos particulares, asociados al aporte terrígeno extracuenca, al parecer derivadas de episodios de cenizas. (Pérez, *et al*, 2015).

El Miembro Pujamana son biomicritas de foraminíferos plantónicos y bentónicos que contienen material fino terrígeno, aspecto que singenéticamente disminuye la porosidad.

El Miembro Galembo es el conjunto calcáreo de biomicritas donde predominan los foraminíferos bentónicos del género Siphogenerinoides, típicos del Campaniano. Estas biomicritas se mezclan, con material fosfático fino, singenético o en forma de bioclastos, pelets y oolitos de origen primario o por reemplazamiento. El material terrígeno se presenta como limo de cuarzo y todo el conjunto de elementos del armazón se van formando en sucesiones granocrecientes, somerizantes separadas por superficies de inundación. El contacto superior con la Formación Umir es una superficie de somerización y de cambio de la configuración costera (Pérez, *et al*, 2015).

2.6 Equipo.

2.6.1 Analizador de texturas. Las pruebas se realizarán con el analizador de texturas, es un equipo adaptado para realizar ensayos de indentación en muestras de roca, el cual consta de dos dispositivos básicos, los datos resultantes de la prueba son analizados por el software Exponent Texture 32 para el control automático del TA_HD plus, este equipo se encuentra en las instalaciones del laboratorio de mecánica de rocas del ICP (instituto colombiano de petróleo), se muestra en la figura 1.



Figura 1. Analizador de textura.

2.6.2 Especificaciones técnicas del equipo. Las especificaciones técnicas del equipo duty-texture analyzer (TA_DH) son:

- Capacidad de carga: 5kg a 750kg.
- Capacidad de penetración: 0,1mm a 524mm.
- Resolución de distancia: 0,001mm.
- Capacidad de velocidad de carga: para cargas menores a 500kg (0,01mm/sec hasta 20mm/sec) y para cargas de 500kg a 700kg (0,01 mm/sec hasta 13mm/sec).

2.6.3 Parámetros del equipo. Los parámetros que se deben cargar en el momento de realizar la prueba son:

- Modo de prueba: Se seleccionará la opción de compresión.
- Velocidad preprueba: Velocidad del indentador antes de entrar en contacto con la muestra.

- Velocidad de prueba: Velocidad de penetración del indentador.
- Velocidad posprueba: Velocidad con la que el indentador sale de la muestra.
- Modo de objetivo: Se seleccionará distancia, el desplazamiento máximo del indentador, que es la profundidad a la cual el equipo detiene la aplicación de la carga.
- Tipo de sensor: Seleccione fuerza.
- Fuerza de sensor: 2 N.
- Unidades de prueba son: Milímetros (mm), Newtons (N), segundos (sec).

Se ubica la probeta de ensayo debajo del indentador, garantizando que la punta del indentador quede en dirección del punto de aplicación de la carga y dejando la menor distancia posible; aproximadamente el grosor de una hoja de papel.

2.7 Gráfica carga vs desplazamiento.

El software Exponent arroja una gráfica de carga vs desplazamiento que se interpreta de la siguiente forma para extraer los valores de fuerza crítica de transición (CTF) y módulo de indentación (IM):

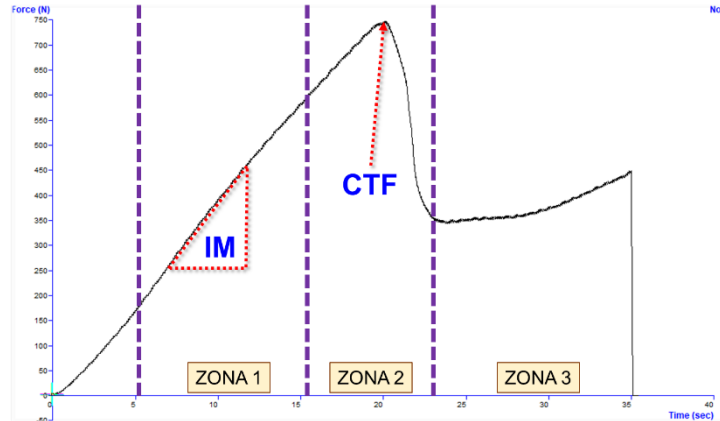


Figura 2. Carga vs desplazamiento.

De la gráfica carga vs desplazamiento se interpretan los datos para obtener los valores de CTF e IM.

- **Zona 1:** Módulo de indentación (IM). En esta gráfica se puede observar una zona lineal que corresponde al comportamiento elástico de la roca, y se define como la resistencia de una muestra a ser penetrada por un indentador. De este tramo se obtiene la pendiente, que es uno de los parámetros más importantes de la prueba, se llama módulo de indentación (IM) y tiene unidades de N/mm.

$$IM = \frac{C_2 - C_1}{D_2 - D_1} \left[\frac{N}{mm} \right]$$

Ecuación 1: Módulo de indentación.

Donde C1 y C2 corresponden a la carga inicial y final respectivamente; D1 y D2 son los desplazamientos final e inicial respectivamente para la zona de proporcionalidad.

Más adelante se encontrará un punto donde se pierde el comportamiento lineal o proporcional, este punto corresponderá al nivel de carga donde el material se deforma sin que

exista un aumento considerable en la carga aplicada, se llama fuerza crítica de transición (CTF) y tiene unidades de Newtons.

- **Zona 2:** Fuerza crítica de transición (CTF). Es el punto donde la linealidad se pierde en un gráfico carga versus desplazamiento, se medirá en newton (N) y marcará el punto donde la roca deja de tener un comportamiento elástico e inicia su comportamiento plástico.

- **Zona 3:** Finalmente en el gráfico de carga versus desplazamiento del indentador, se puede ver una tercera zona conocida como región de fractura, donde la deformación de la roca no es proporcional a la carga aplicada.

3. Diseño Experimental en Medio Controlado.

Un diseño experimental se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes, para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos o consecuentes), dentro de una situación de control para el investigador (Montgomery, 2006).

Así es que en los diseños experimentales se pretende establecer el posible efecto o influencia de una causa o hecho que se manipula. Es decir, los diseños experimentales se utilizan cuando el investigador puede manipular el posible efecto de una causa. Entonces, el primer requisito para un diseño experimental es poder realizar la manipulación intencional de una o más variables independientes. La variable independiente es la que se considera como supuesta causa en una relación entre variables, es la condición antecedente, y al efecto provocado por dicha causa se le denomina variable dependiente (consecuente). (Montgomery, 2006).

El segundo requisito consiste en medir el efecto que la variable independiente tiene en la variable dependiente. Como en la variable dependiente se observa el efecto, la medición debe ser válida y confiable. Si no se puede asegurar que se midió de manera adecuada, los resultados no servirán y el experimento es una pérdida de tiempo. En la planeación de un experimento se debe precisar cómo se van a manipular las variables independientes y cómo medir las dependientes. El tercer requisito que todo experimento debe cumplir es el control o la validez interna de la situación experimental. En términos más sencillos, tener control significa saber qué está ocurriendo realmente. Todo proceso o sistema productivo puede representarse mediante el modelo mostrado en la figura 3. (Montgomery, 2006)

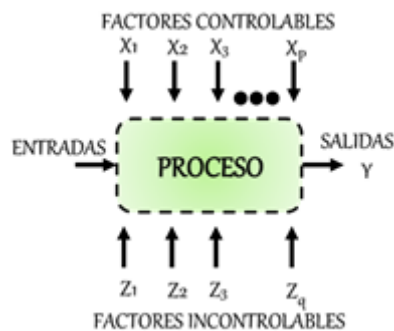


Figura 3. Modelo General de un proceso. Adaptado de Ferré y Rius (2002). Introducción al Diseño Estadístico de Experimentos. Universitat Rovira i Virgili: Departamento de Química Analítica y Química Orgánica.

Es decir, que puede ser visualizado como una combinación de máquinas, métodos, personas y otros recursos que transforman alguna entrada, en salida que tiene una o más respuestas observables. Algunas variables del proceso son controladas, mientras que otras son incontrolables. (Montgomery, 2006)

Un experimento diseñado tiene por objetivo:

- Determinar cuáles son las variables que tienen mayor influencia en las variables de respuestas (Montgomery, 2006).
- Determinar el mejor valor de las variables controlables que influyen en la respuesta, de manera que ésta, tenga casi siempre un valor cercano al valor nominal deseado (Montgomery, 2006).
- Determinar la mejor combinación de las variables controlables que ayuden a reducir la variabilidad de la respuesta (Montgomery, 2006).
- Establecer la combinación óptima de las variables controlables, con el objetivo de minimizar los efectos de las variables incontrolables (Montgomery, 2006).

3.1 Terminología.

El diseño de experimentos ha sido creado por matemáticos y estadísticos, por lo que posee su propio lenguaje, el cual es necesario conocer para su mejor comprensión y utilización. A continuación, se describen los términos más importantes (Montgomery, 2006):

- **Factor:** Una de las variables dependientes que son estudiadas en el experimento. Ésta puede ser cualitativa, como: cambios en el equipo, métodos, material utilizado (Montgomery, 2006).
- **Nivel:** Son los valores que puede tener el factor a estudiar (Montgomery, 2006).
- **Combinación:** Es la asignación de un solo nivel a un factor, o de varios niveles a todos los factores en una corrida experimental (Montgomery, 2006).
- **Variable de respuesta:** Es el resultado de una corrida experimental. Variable a estudiar (Montgomery, 2006).

- Efecto: Es el cambio en la variable de respuesta por el cambio del nivel de un factor (Montgomery, 2006).
- Interacción: Cuando uno o más factores trabajan juntos para producir un efecto diferente que los efectos producidos por aquellos factores de manera individual (Montgomery, 2006).
- Corrida experimental: Implementación de cada una de las combinaciones (Montgomery, 2006).
- Bloque: Agrupación planeada de factores o combinaciones. Es realizada a manera de minimizar la variación no incluida en el diseño (Montgomery, 2006).
- Replicación: Repetición de la corrida experimental (Montgomery, 2006).

3.2 Factores que conforman el diseño experimental.

Tener en cuenta los factores que conforman un diseño experimental y aplicarlos al tema de investigación, garantizan en gran medida que el investigador tenga éxito en su trabajo ya que le permite tener claridad de lo que va a realizar y como lo va a realizar, como lo va realizar implica aquellas modificaciones y optimizaciones puntuales sobre ciertos parámetros de las pruebas y/o experimentos que le ayuden al investigador a mejorar y obtener mejores y más confiables resultados. Por tal razón a continuación se detallan algunos factores esenciales a tener en cuenta en el planteamiento del diseño experimental y que se consideraron en este proyecto investigativo:

- Planteamiento del problema, justificación y forma de darle solución al problema.
- Detección de las variables más importantes que intervienen en el proyecto, su definición y clasificación.

- Clasificación de los tipos de diseños experimentales y selección del que se adecue al experimento.
- Selección de las muestras o población objetivo, sobre las cuales se aplicarán las pruebas y/o experimentos.
- Selección del tamaño las muestras (dimensiones), que se utilizarán en las pruebas de laboratorio involucradas en el proyecto (Montgomery, 2006).

3.3 Detección de las variables.

Una variable es un aspecto o característica de un fenómeno que se desea estudiar, y que puede tomar dos o más grados, estados o valores. Siendo redundantes, es una propiedad del fenómeno en estudio, que puede variar. A los estados que puede tomar una variable se organizaran en categorías. Desde luego, la mínima cantidad de categorías que puede tomar una variable, son dos: presencia/ausencia (de lo contrario, no sería variable). En una investigación se estudian varias variables, y a su vez cada variable tener varias categorías. Al aumentar las variables y el número de categorías de cada variable se tiene una idea más clara del problema investigado, pero a medida que se incrementa, aumenta la complejidad del trabajo de investigación. Las variables se pueden clasificar en: Variable Independiente, es la que se considera puede afectar a otras, es la variable que los investigadores pueden manipular para observar su efecto sobre otras variables. Variable Dependiente, es aquella donde una variable independiente puede tener un efecto, es decir, el valor de la variable dependiente depende del nivel de la variable independiente. Variable fija, es una variable fija, el investigador ha elegido los niveles específicos para utilizar en el estudio. En la tabla 4 se pueden observar las variables a utilizar en la investigación con sus respectivos niveles (Montgomery, 2006).

3.4 Definición de las variables.

3.4.1 Profundidad de penetración o desplazamiento. Corresponde al desplazamiento o penetración que realiza el indentador sobre las muestras, se mide en milímetros (mm).

3.4.2 Tiempo de la prueba. Corresponde al tiempo requerido por el indentador para penetrar la distancia o profundidad fijada antes de correr la prueba, esta variable se mide en segundos (sec).

3.4.3 Fuerza Aplicada. Es la carga que se aplica en forma progresiva sobre el indentador y se mide en newton (N).

3.4.4 Tamaño de la muestra. Corresponde al tamaño de los fragmentos o ripios que se utilizan en la prueba de Indentación.

3.4.5 Velocidad de prueba de la carga aplicada. Esta variable determina cuanto debe ir aumentando la carga aplicada tanto en la prueba de indentación a medida que transcurre el tiempo (mm/sec).

3.4.6 Velocidad preprueba. Velocidad del indentador antes de entrar en contacto con la muestra (mm/sec).

3.4.7 Velocidad posprueba. Velocidad con la que el indentador sale de la muestra (mm/sec).

3.4.8 Fuerza crítica de Transición (CTF). Esta variable se mide luego de realizada la prueba y va a depender de los datos de entrada; se define como el punto máximo del comportamiento elástico en una gráfica de fuerza vs desplazamiento (N).

3.4.9 Módulo de Indentación (IM). Esta variable es el valor de la pendiente en la gráfica de fuerza vs desplazamiento y va a depender de los datos de entrada(N/mm).

Tabla 1.

Variables dependientes e independientes.

Tipo de variables	Descripción
Dependiente	Módulo de Indentación
Dependiente	Fuerza crítica de transición
Independiente	Desplazamiento
Independiente	Fuerza aplicada
Independiente	Velocidad preprueba
Independiente	Velocidad post-prueba
Independiente	Velocidad de prueba
Independiente	Tipo de control

3.5 Clasificación de diseños experimentales

Campbell y Stanley (1969) clasifican los diseños de investigación en experimentos verdaderos “puros”, pre-experimentos y cuasi experimentos. A continuación, se da una breve descripción de cada tipo de diseño experimental que permitirá seleccionar el tipo de experimento que se realizará en esta investigación (Montgomery, 2006).

3.5.1 Experimento Puro. En un auténtico experimento o experimento puro, la variable o variables independientes resultan de interés para el investigador por ser las que se hipotetizan, el investigador en este tipo de proyecto puede manipular la variable independiente o variables independientes en su totalidad y observa si las dependientes varían o no. Manipular es hacer variar o dar distintos valores a las variables independientes. Las variables dependientes no se manipulan, sino que se miden para ver el efecto que la manipulación de las variables independientes tienen sobre ellas (Montgomery, 2006).

3.5.2 Pre – Experimento. Los pre-experimentos se llaman así, porque su grado de control es mínimo. Este diseño no cumple con los requisitos de un "verdadero" experimento. No hay manipulación de la variable o variables independientes. El diseño adolece de los requisitos para lograr el control experimental: Tener varios grupos de comparación. No se puede establecer causalidad con certeza. No se controlan las fuentes de invalidación interna. Los diseños pre-experimentales pueden servir como estudios exploratorios, pero sus resultados deben observarse con precaución. De ellos no pueden sacarse conclusiones seguras de investigación. Abren el camino, pero de ellos deben derivarse estudios más profundos (Montgomery, 2006).

3.5.3 Cuasi-experimentos. Los diseños cuasi-experimentales manipulan deliberadamente al menos una variable independiente, en los diseños cuasi-experimentales los sujetos no son asignados al azar a los grupos ni emparejados, sino que dichos grupos ya estaban formados antes del experimento, son grupos intactos. Debido a los problemas potenciales de validez interna, en estos diseños el investigador debe intentar establecer la semejanza entre los grupos, esto requiere considerar las características o variables que puedan estar relacionadas con las variables estudiadas (Montgomery, 2006).

El diseño experimental que corresponde a este proyecto de investigación es un diseño experimental puro, pues el objetivo principal es determinar bajo que parámetros operacionales (variables independientes) se obtienen los resultados de IM y CTF más exactos (variables dependientes).

4. Metodología para la Elaboración del Análisis de Sensibilidad.

Identificadas las variables dependientes e independientes que intervienen en la prueba se hizo una revisión bibliográfica de los diferentes proyectos realizados en el grupo de estabilidad de pozo, extrayendo los parámetros del equipo (Analizador de texturas TA_DH) usados en cada una de las investigaciones.

Tabla 2.

Parámetros utilizados en la literatura.

Parámetros Operacionales							
Autor	% CV	Velocidad de Prueba	Velocidad de Pre Prueba	Velocidad de Post Prueba	Fuerza Aplicada	Desplazamiento Máximo	Duración de la Prueba
(Martínez, 2012)	33,85%	0,01 mm/sec	0,05 mm/sec	0,10 mm/sec	Libre	0,3 mm	30 sec
(Mateus, 2005)	37%	0,01 mm/sec	0,05 mm/sec	0,0017mm/sec	Libre	0,3 mm	30 sec
(Torres, 2006)	25%	0,01 mm/sec	0,05 mm/sec	1 mm/sec	Libre	0,3 mm	30 sec
(García, 2008)	45,08%	0,01 mm/sec	0,05 mm/sec	1 mm/sec	Libre	0,3 mm	30 sec
(Hernández, 2013)	23,04%	0,01 mm/sec	0,05 mm/sec	1 mm/sec	Libre	0,3 mm	30 sec

Posteriormente se hicieron unas pruebas en un medio controlado (vidrio plano), para determinar los valores críticos de las variables; se tomó como referencia una combinatoria de parámetros denominada prueba base (PB) con los siguientes valores:

Tabla 3.

Combinatoria de parámetros, prueba base.

Prueba Base	Velocidad de Prueba	Velocidad de Pre prueba	Velocidad de Post Prueba	Fuerza Aplicada	Desplazamiento Máximo	Duración de la Prueba
PB	0,01 mm/sec	0,05 mm/sec	1 mm/sec	Libre	0,3 mm	30 sec

Dada la combinatoria de parámetros denominada prueba base se realizaron ensayos dando valores máximos a cada variable y se estudiaron los resultados obtenidos.

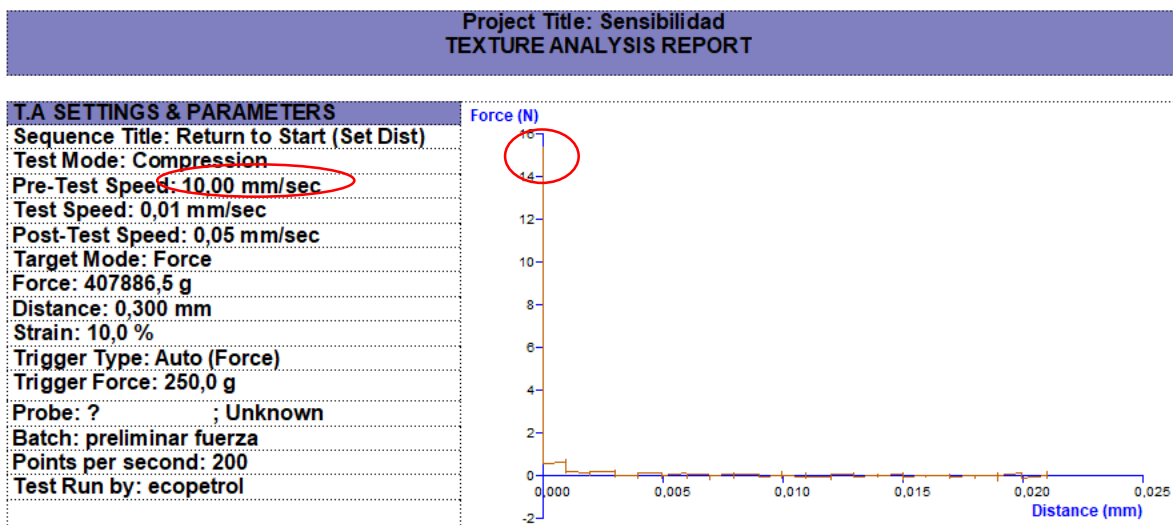


Figura 4. Fuerza Vs Desplazamiento para velocidad de preprueba máxima.

Como se observa en la Figura 4 al utilizar un valor de 10 mm/sec en la variable velocidad de preprueba se obtiene una gráfica con una un pico inicial de 15,38 N. Al tener una velocidad de preprueba tan alta genera un impacto cuando toca la superficie a ensayar imposibilitando registrar

las deformaciones elásticas que ocurren y por consiguiente obtener valores de módulo de indentación (IM).

Se realizaron otras tres pruebas variando el valor de velocidad de preprueba (VPP); 3.75, 2.5, 0.75 [mm/sec]. Se puede observar en la figura 5 una tendencia, a menor valor de velocidad de preprueba, el inicio de la curva se desplaza cada vez más hacia el origen con una pendiente creciente ideal para obtener valores de IM.

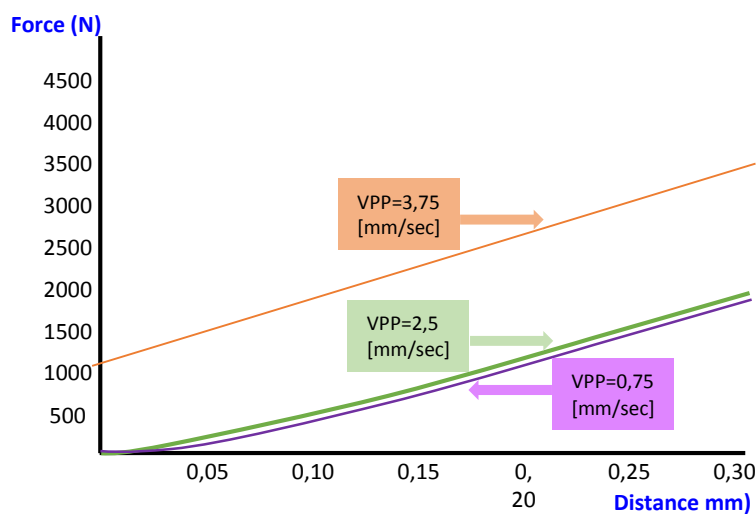


Figura 5. Fuerza Vs Desplazamiento para velocidad de preprueba de 3.75, 2.5, 0.75 [mm/sec].

Se realizó el mismo ejercicio para velocidad de posprueba y no se observaron resultados relevantes, así que se decidió manejar una velocidad de posprueba igual a 1 [mm/sec] para los próximos ensayos a realizar.

Manejar velocidades de prueba altas genera menor exactitud en los datos, debido a que se tiene una velocidad de captación de datos de 200 puntos por segundo, se puede observar de manera gráfica en la figura 6.

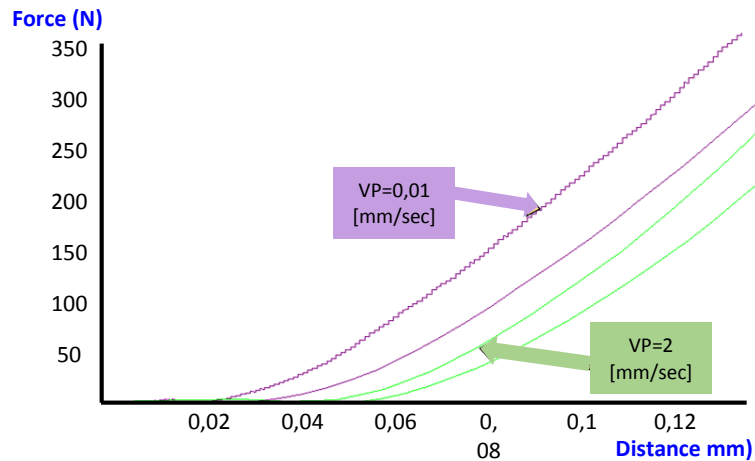


Figura 6. Fuerza Vs Desplazamiento VP = 0.01 y 2 [mm/sec].

Por otra parte, el material indentado genera menos afectaciones locales (grietas y fallas) cuando se realiza el ensayo con velocidades de pruebas altas según se evidencia en la figura 7.



Figura 7. Huella dejada por el indentador a diferentes velocidades de prueba.

El desplazamiento que realiza el indentador a la hora del ensayo es otro parámetro crítico; se busca que sea lo suficientemente profundo para generar un cambio del comportamiento elástico al comportamiento plástico del material, pero debe conservarse la integridad del material a ensayar; para el vidrio se optimizó un desplazamiento máximo de 0,6 mm, aunque se generaban grietas y fracturas la mayoría de ensayos fallaban generando el cambio de zona elástica a zona plástica facilitando la obtención del valor de fuerza crítica de transición (CTF).

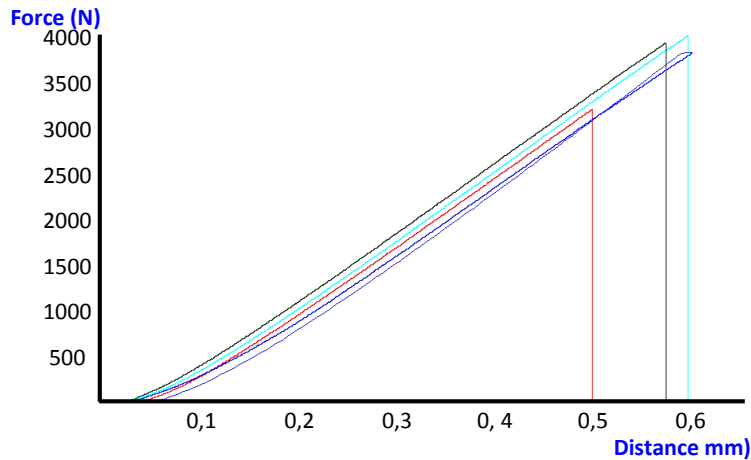


Figura 8. Pruebas preliminares en vidrio para determinar desplazamiento máximo óptimo.

5. Análisis de Sensibilidad

Se planteó una matriz para evaluar el comportamiento de cada una de las variables críticas con los diferentes niveles, se toma prueba base como referencia, cada una de las demás variables (Velocidad de prueba, velocidad de preprueba y desplazamiento máximo) se hace variar en cinco niveles dejando el resto de los parámetros fijos, como se aprecia en la tabla 4.

Se expandió la tabla con cada una de las 17 pruebas que se deben realizar con cada combinatoria de parámetros y posteriormente, se aleatorizó para mitigar el error sistemático que se pueda presentar.

Tabla 4.

Matriz análisis de sensibilidad.

Cod.	Parámetro a Estudiar	Variables Independientes					Variables Dependiente	
		Velocidad de Preprueba [mm/sec]	Velocidad de Prueba [mm/sec]	Velocidad de Post Prueba [mm/sec]	Desplazamiento Máximo [mm]	Duración de la Prueba [sec]	CTF	IM
PB	Prueba Base	0,05	0,01	1	0,6	Libre		
VPP1	Velocidad de preprueba 1	0,1	0,01	1	0,6	Libre		
VPP2	velocidad de preprueba 2	1	0,01	1	0,6	Libre		
VPP3	velocidad de preprueba 3	1,5	0,01	1	0,6	Libre		
VPP4	velocidad de preprueba 4	2	0,01	1	0,6	Libre		
VPP5	velocidad de preprueba 5	2,5	0,01	1	0,6	Libre		
VP1	velocidad de prueba 1	0,05	0,1	1	0,6	Libre		
VP2	velocidad de prueba 2	0,05	0,5	1	0,6	Libre		
VP3	velocidad de prueba 3	0,05	1	1	0,6	Libre		
VP4	velocidad de prueba 4	0,05	1,5	1	0,6	Libre		
VP5	velocidad de prueba 5	0,05	2	1	0,6	Libre		
DM1	desplazamiento máximo 1	0,05	0,01	1	0,5	Libre		
DM2	desplazamiento máximo 2	0,05	0,01	1	0,65	Libre		
DM3	desplazamiento máximo 3	0,05	0,01	1	0,75	Libre		
DM4	desplazamiento máximo 4	0,05	0,01	1	0,85	Libre		
DM5	desplazamiento máximo 5	0,05	0,01	1	0,95	Libre		

5.1 Medio controlado.

Se toma el vidrio plano como medio controlado debido a:

- Está compuesto principalmente por sílice elemento muy común en las rocas.
- Es económico y fácil de conseguir.
- Su estructura no presenta anisotropías.
- Es plano lo que facilita la realización del ensayo.

Se utilizaron dos geometrías de vidrio uno de 60x60x6 [mm] y otro de 100x100x10 [mm] debido a que el espesor del material indentado tiene que ser como mínimo 10 veces el desplazamiento máximo del indentador; se hizo la distribución de los puntos a indentar como se muestra en la figura 9 para evitar efecto de borde.

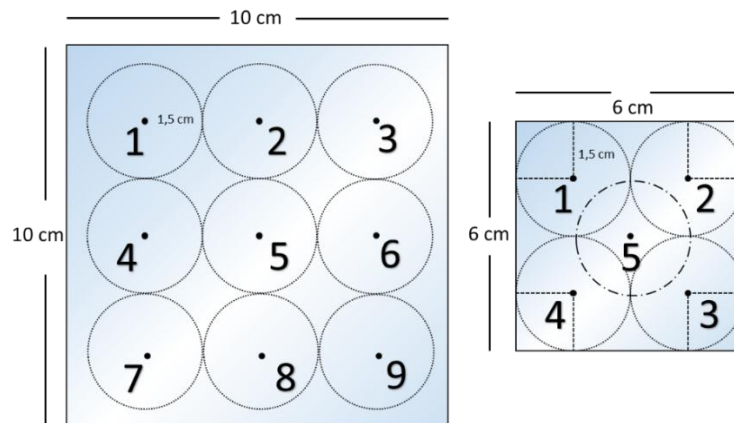


Figura 9. Distribución de los puntos sobre el área del vidrio.

Para evitar una acumulación de esfuerzos, presentada cuando se realizan ciclos de carga y descarga modificando la rigidez aparente del material. Se decide hacer ciclos de cinco muestras aplicando alternadamente indentaciones en puntos extremos.

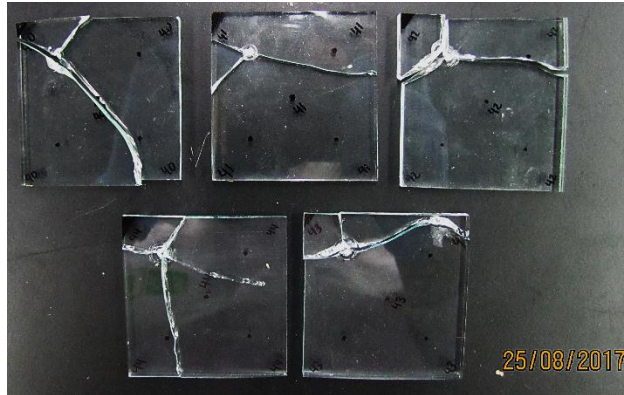


Figura 10. Protocolo de indentación en muestras de vidrio.

Los tornillos de la placa base del analizador de texturas fueron removidos debido a que sobresalían de la placa y no permitía un apoyo firme de las láminas de vidrio, especialmente las de 10x10 cm, los orificios que quedaron fueron rellenados con plastilina pues tiene una deformación plástica por consiguiente no genera cambio en el régimen de esfuerzos del sistema. Se colocaron barreras adicionales para mitigar la emisión de material particulado y esquirlas de vidrio que se liberaban cuando perdían contención.

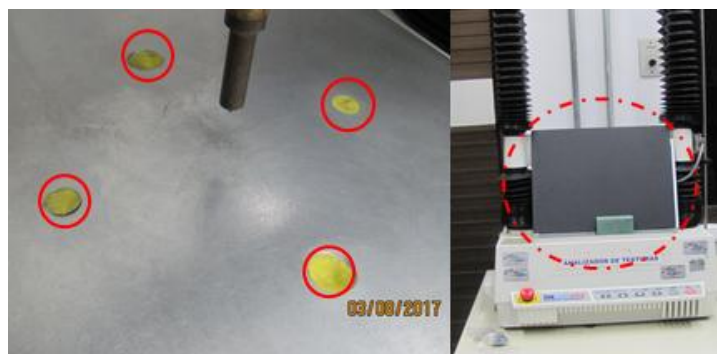


Figura 11. Modificaciones del Analizador de Texturas.

5.2 Resultados análisis de sensibilidad.

Se realizó un tratamiento estadístico con las 17 repeticiones de cada una de las combinatorias planteadas en el diseño experimental, obteniendo parámetros estadísticos como el coeficiente de variación, indica la homogeneidad o heterogeneidad de la variable estudiada. Y el promedio que es el valor definitivo que toma las variables independientes, fuerza crítica de transición (CTF) y módulo de indentación (IM), se observan los resultados en la tabla 5.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100$$

Ecuación 2: Coeficiente de variación.

Donde:

CV= Coeficiente de variación.

σ = Desviación estándar de la población.

μ = Promedio de la población.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{N}}$$

Ecuación 3: Desviación estándar poblacional.

Donde:

x_i = Observaciones individuales de la población.

μ = Promedio de la población.

N = Número de observaciones de la población.

Tabla 5.

Resultados análisis de sensibilidad.

COD	Paramento a Estudiar	CTF					IM				
		CV	Variación	Desv Estd	Mediana	Promedio	CV	Variación	Desv Estd	Mediana	Promedio
PB	PRUEBA BASE	0,172	282350,850	531,367	3082,031	2957,661	0,040	84616,899	290,890	7210,371	7162,891
VPP1	velocidad de preprueba 1	0,110	109173,336	330,414	3009,592	3058,014	0,043	95093,784	308,373	7144,350	7090,519
VPP2	velocidad de preprueba 2	0,146	189262,654	435,043	2986,007	2885,214	0,025	32564,162	180,455	7288,069	7250,609
VPP3	velocidad de preprueba 3	0,162	257791,144	507,731	3134,743	3158,243	0,028	42287,479	205,639	7339,488	7302,559
VPP4	velocidad de preprueba 4	0,099	102498,468	320,154	3240,178	3249,718	0,014	9984,931	99,925	7361,558	7359,992
VPP5	velocidad de preprueba 5	0,152	259127,727	509,046	3342,409	3174,368	0,014	10840,248	104,117	7352,136	7336,041
VP1	velocidad de prueba 1	0,128	153716,950	392,068	3057,723	3215,359	0,065	217861,709	466,757	7153,521	7036,513
VP2	velocidad de prueba 2	0,139	204838,759	452,591	3259,656	3344,184	0,033	55141,243	234,822	7163,115	7116,992
VP3	velocidad de prueba 3	0,146	234498,342	484,250	3319,162	3270,550	0,019	18368,714	135,531	7277,631	7278,613
VP4	velocidad de prueba 4	0,162	271720,534	521,268	3224,379	3105,965	0,063	205448,730	453,265	7247,064	7106,435
VP5	velocidad de prueba 5	0,131	167825,617	409,665	3120,388	3157,647	0,039	78443,146	280,077	7216,226	7134,471
DM1	desplazamiento máximo 1	0,097	87964,136	296,587	3052,464	3031,767	0,034	62436,865	249,874	7295,271	7222,249
DM2	desplazamiento máximo 2	0,087	68537,620	261,797	2993,669	2986,183	0,035	63477,163	251,947	7168,522	7085,698
DM3	desplazamiento máximo 3	0,122	148032,952	384,751	3147,698	3087,592	0,031	50269,966	224,210	7241,992	7200,446
DM4	desplazamiento máximo 4	0,109	107296,396	327,561	3003,487	2953,553	0,064	213468,278	462,026	7164,971	7043,267
DM5	desplazamiento máximo 5	0,175	248569,930	498,568	2857,087	3039,281	0,039	78443,146	280,077	7216,226	7134,471

De manera gráfica se determinó que hay una serie de combinatorias que presentan mejor coeficiente de variación para la fuerza crítica de transición y el módulo de indentación.

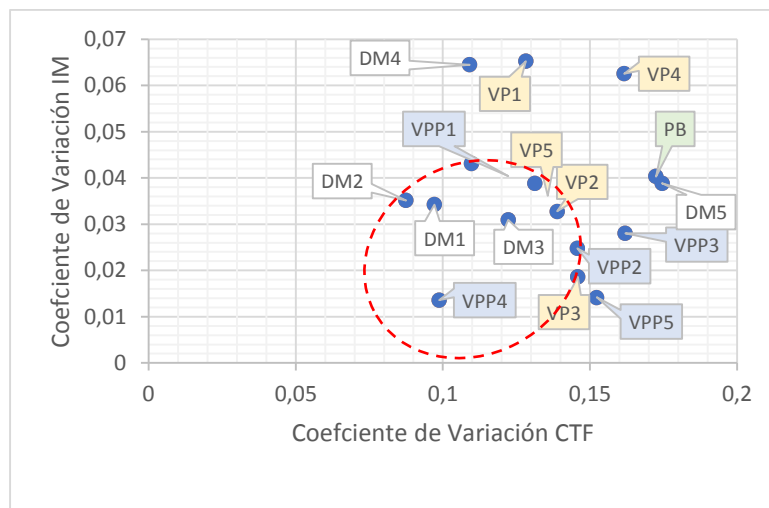


Figura 12. Coeficiente de variación para IM y CTF.

Se decide hacer una serie de combinatorias adicionales donde interactúen los parámetros con mejor coeficiente de variación que son:

Tabla 6.

Parámetros con mejor coeficiente de variación.

Parámetro	Valor	Unidades
VP2	0,5	[mm/sec]
VP3	1	[mm/sec]
VP5	2	[mm/sec]
DM2	0,65	[mm]
VPP1	0,1	[mm/sec]
VPP2	1	[mm/sec]
VPP4	2	[mm/sec]

A continuación, se observa la nueva matriz de combinatorias con los parámetros que presentan menor coeficiente de variación; el valor de desplazamiento máximo se dejó fijo en 0,65 debido a que presenta la mejor correlación de coeficientes de variación para IM y CTF, además el nivel 0,65 de la variable desplazamiento máximo asegura un cambio en el comportamiento del material de elástico a plástico, vital para obtener el valor del CTF.

Tabla 7.

Matriz combinatoria de parámetros con mejor coeficiente de variación.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES						
COD.	Parámetro a Estudiar	VARIABLES INDEPENDIENTES				
		Velocidad de Preprueba [mm/sec]	Velocidad de Prueba [mm/sec]	Velocidad de Post Prueba [mm/sec]	Desplazamiento Máximo [mm]	Duración de la Prueba [sec]
CMB1	Combinatoria 1	0,5	0,1	1	0,65	Libre
CMB2	Combinatoria 2	0,5	1	1	0,65	Libre
CMB3	Combinatoria 3	0,5	2	1	0,65	Libre
CMB4	Combinatoria 4	1	0,1	1	0,65	Libre
CMB5	Combinatoria 5	1	1	1	0,65	Libre
CMB6	Combinatoria 6	1	2	1	0,65	Libre
CMB7	Combinatoria 7	2	0,1	1	0,65	Libre
CMB8	Combinatoria 8	2	1	1	0,65	Libre
CMB9	Combinatoria 9	2	2	1	0,65	Libre
CMB1--	Combinatoria 1--	0,1	0,5	1	0,65	Libre
CMB2--	Combinatoria 2--	1	0,5	1	0,65	Libre
CMB4--	Combinatoria 4 --	0,1	1	1	0,65	Libre
CMB7--	Combinatoria 7 --	0,1	2	1	0,65	Libre

Todas las combinatorias nuevas con desplazamiento máximo de 0,65 [mm] fueron realizadas en vidrio grueso (10 mm) debido a que si se hacían en vidrio delgado (6 mm de grosor) no cumple con el protocolo de indentación establecido en el laboratorio de mecánica de rocas del Instituto Colombiano de Petróleo (ICP); en donde se indica que el espesor de la muestra a indentar tiene que ser como mínimo diez veces el desplazamiento máximo utilizado en el ensayo.

También es importante resaltar que para realizar estos nuevos ensayos se tuvo que trasladar el equipo ANALIZADOR DE TEXTURAS, debido al poco espacio disponible, de una mesa metálica a un mesón de mármol.

A continuación, se observan los resultados obtenidos de las nuevas combinatorias:

Tabla 8.

Resultados IM y CTF para las combinatorias.

	CTF					IM				
	Coef de Var	Variación	Desv Estd	Mediana	Promedio	Coef de Var	Variación	Desv Estd	Mediana	Promedio
CMB1	0,206	501282,859	708,013	3440,352	3454,141	0,037	68040,833	260,846	7106,646	7084,438
CMB2	0,259	493947,359	702,814	2710,495	2795,710	0,097	484216,227	695,856	7195,828	7029,167
CMB3	0,207	329264,196	573,815	2773,793	2951,194	0,124	791191,320	889,489	7179,693	6895,340
CMB4	0,129	230329,438	479,926	3719,644	3725,954	0,032	53462,426	231,219	7290,190	7210,828
CMB5	0,116	101784,451	319,037	2761,379	2799,326	0,025	33935,608	184,216	7277,393	7215,839
CMB6	0,227	449439,383	670,402	2954,612	3170,710	0,049	124888,300	353,395	7192,702	7066,549
CMB7	0,167	397210,367	630,246	3768,158	3682,333	0,056	162697,440	403,358	7245,176	7077,259
CMB8	0,187	303136,269	550,578	2942,955	3062,788	0,089	420113,810	648,162	7272,715	7064,651
CMB9	0,195	283258,775	532,221	2723,213	2869,606	0,048	113180,062	336,422	7063,591	7015,004
CMB1--	0,108	87440,902	295,704	2741,901	2795,053	0,043	92594,321	304,293	7051,948	6973,205
CMB2--	0,139	143228,118	378,455	2717,706	2779,143	0,087	371754,358	609,717	7048,326	6861,126
CMB4--	0,128	127240,573	356,708	2789,840	2761,973	0,108	566839,374	752,887	6959,095	6743,144
CMB7--	0,111	72008,715	268,344	2412,786	2519,691	0,051	130348,957	361,039	7042,079	6906,579

Importante: Al realizar las nuevas combinatorias se cometió un error y se invirtieron los valores de velocidad de prueba y velocidad de preprueba se tuvo que realizar unos nuevos ensayos con la corrección de los parámetros invertidos; los datos que se adquirieron y no estaban contemplados dentro del diseño experimental fueron tratados y evaluados sin discriminación.

Analizando los valores de los promedios para CTF e IM de manera gráfica, valores tomados de la tabla anterior y de la tabla 5: Resultado Análisis de sensibilidad se evidencia que, pese a que las pruebas se elaboraron en el mismo material, vidrio plano, en CTF la combinatoria CMB1, CMB5 y CMB7 salen de la tendencia típica de los datos y para IM las combinatorias también presentan gran heterogeneidad en el valor absoluto.

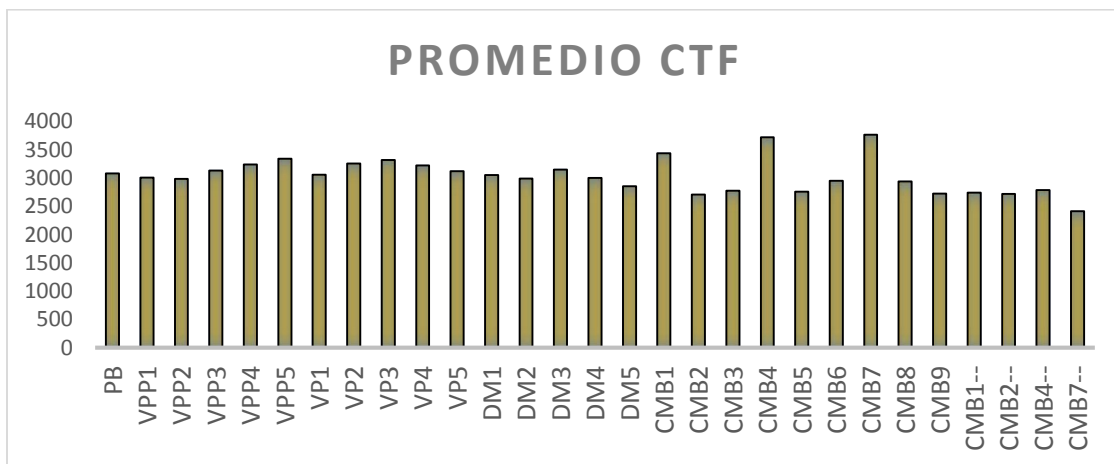


Figura 13. Promedio CTF combinatorias análisis de sensibilidad.

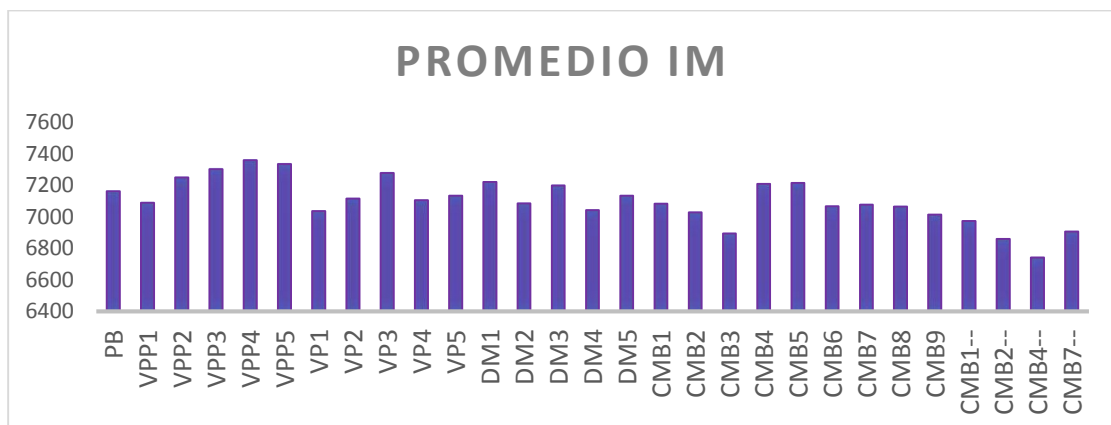


Figura 14. Promedio IM combinatorias análisis de sensibilidad.

Se opta por hacer un análisis estadístico de los datos para verificar si realmente alguna combinatoria está fuera de la tendencia; se hace inicialmente un diagrama de cajas y bigotes para identificar y eliminar los puntos atípicos de la muestra poblacional.

6. Tratamiento Estadístico

6.1 Cajas y bigotes.

Los diagramas de Caja-Bigotes (boxplots o box and whiskers) son una presentación visual que describe varias características importantes, al mismo tiempo, tales como la dispersión y simetría. Para su realización se representan los tres cuartiles y los valores mínimo y máximo de los datos, sobre un rectángulo, alineado horizontal o verticalmente. (Liceo Marta Donoso Espejo, 2016)

Una gráfica de este tipo consiste en una caja rectangular, donde los lados más largos muestran el recorrido intercuartílico. Este rectángulo está dividido por un segmento vertical que indica donde se posiciona la mediana y por lo tanto su relación con los cuartiles primero y tercero (se recuerda que el segundo cuartil coincide con la mediana). (Liceo Marta Donoso Espejo, 2016)

Esta caja se ubica a escala sobre un segmento que tiene como extremos los valores mínimo y máximo de la variable. Las líneas que sobresalen de la caja se llaman bigotes. Estos bigotes tienen un límite de prolongación, de modo que cualquier dato o caso que no se encuentre dentro de este rango es marcado e identificado individualmente. (Liceo Marta Donoso Espejo, 2016)

Tabla 9.

Datos construcción gráfico cajas y bigotes.

	CTF	IM			
Media	3066,80711	7103,65122	Base Gráfico	2702,438	7032,85764
Q1(Cuartil 1)	2702,438	7032,85764	Cajón 1	296,478798	176,652965
Q3(Cuartil 3)	3386,81555	7335,956	Cajón 2	387,898756	126,445403
Rango Interc.	684,377554	303,098368	Bigote Inf	1026,56633	454,647552
Mediana	2998,9168	7209,5106	Bigote Sup	1026,56633	268,665588
Valor Mínimo	1287,955	3958,84044			
Valor Máximo	4533,144	7604,62159			
L Inferior	1675,87167	6578,21008			
L Superior	4413,38189	7604,62159			

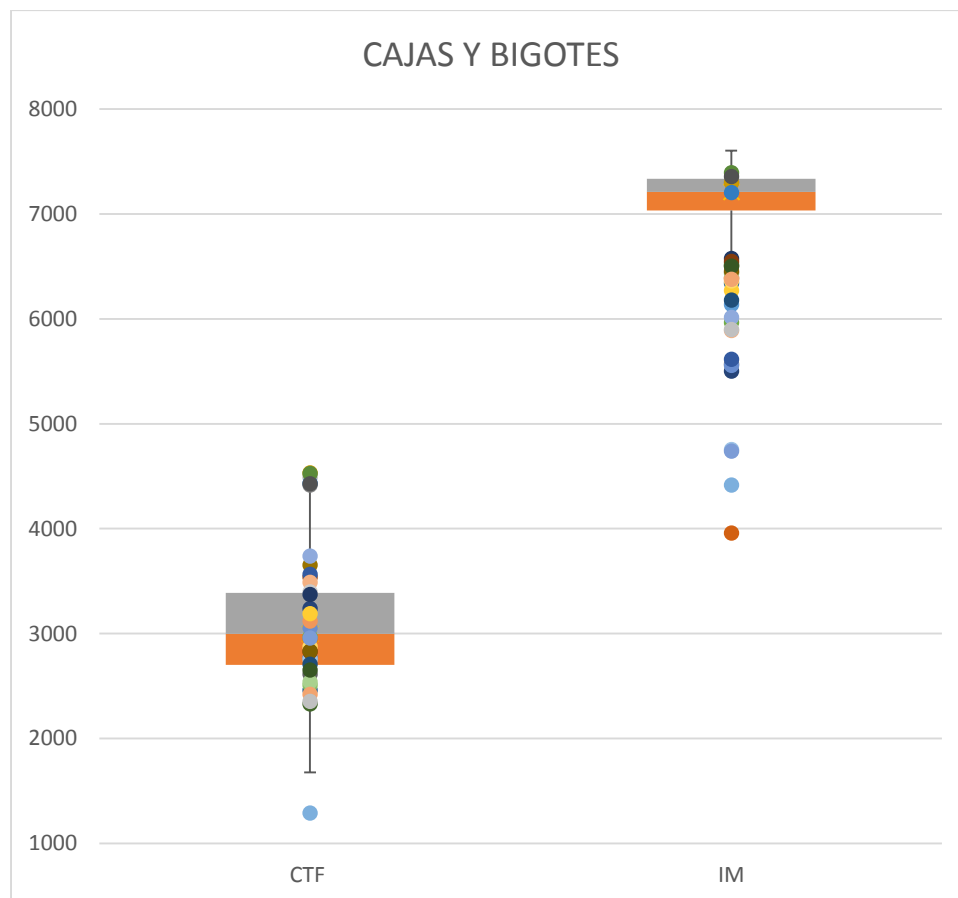


Figura 15. Diagrama cajas y bigotes.

En total se determinaron 41 pares de valores atípicos (8,32%) de 493 pares de valores se habla de pares, debido a que el ensayo de indentación estima dos variables fuerza crítica de transición (CTF) y módulo de indentación (IM), si se presentaba un valor atípico en CTF se excluía también el valor de IM es por eso que dentro de la figura 15: diagrama de cajas y bigotes, se observan puntos de valores atípicos dentro de los cajones y los bigotes, también se evidencia una buena dispersión y simetría de los datos sobre y bajo la mediana.

Las principales causas de estos valores atípicos son pequeñas imperfecciones en la lámina del vidrio tales como poros, bordes pulidos o irregulares y rayaduras; sin embargo, también se debe a errores humanos.

A continuación, se discriminan los puntos atípicos y se recuerda que cada combinatoria de parámetros esta denotada con una abreviatura (PB, VP1, VPP4, DM2) y ésta a su vez se divide en los 17 ensayos realizados para obtener un valor de CTF y/o IM. Los valores señalados con el color **AZUL** son aquellos que están bajo el límite inferior del diagrama; los valores de color **ROJO** son los que se encuentran sobre el límite superior del diagrama y los valores en **NARANJA** son valores dentro del rango típico pero su contraparte (CTF ó IM) presenta valores atípicos. Los valores límite inferior y límite superior se encuentran en la tabla 9: datos de construcción cajas y bigotes.

Tabla 10.

Discretización de los valores atípicos.

	COD	CTF	IM	#	COD	CTF	IM
1	PB-17	2772,21275	6136,08185	22	CMB7-03	3488,301	5889,79001
2	VPP1-12	2969,37271	5965,43042	23	CMB7-13	3395,787	6441,16118
3	VP1-7	3240,11076	5500,76189	24	CMB8-09	2875,053	6361,76751
4	VP1-15	3537,36853	6389,34396	25	CMB8-15	2753,818	4753,43169
5	VP4-9	2612,39481	5569,65794	26	CMB9-01	2539,9	6434,86755
6	VP5-16	3654,30353	6501,42135	27	CMB9-05	3372,427	6576,75056
7	DM1-12	2460,22809	6341,15847	28	CMB9-09	2828,243	6547,85507
8	DM4-10	2329,706	6512,70944	29	CMB9-13	4428,07	7356,73654
9	DM4-17	3054,6759	5555,59515	30	CMB1--06	2832,001	6455,31111
10	DM5-3	3120,38837	6390,70381	31	CMB1--17	2706,828	6180,60723
11	CMB1-07	4490,318	7291,31227	32	CMB2--01	2652,084	6503,07011
12	CMB1-16	3190,683	6272,40051	33	CMB2--06	2956,835	4739,81907
13	CMB2-15	1287,955	4416,70409	34	CMB2--17	2419,659	6378,12146
14	CMB3-05	2508,697	6526,41621	35	CMB4--05	2355,368	5898,75889
15	CMB3-06	3564,283	5613,75874	36	CMB4--06	2394,391	6499,15396
16	CMB3-12	2942,887	3958,84044	37	CMB4--07	2894,407	6556,93101
17	CMB4-02	4416,627	7296,21383	38	CMB4--14	2553,34	4170,63344
18	CMB4-06	4533,144	7297,73384	39	CMB7--03	2501,531	6222,06283
19	CMB6-08	4433,329	7204,09322	40	CMB7--04	2319,617	6250,86703
20	CMB6-12	4524,568	7393,94129	41	CMB7--05	2711,883	6113,8693
21	CMB6-14	3739,404	6013,80413				

Luego de haber identificado y extraído los valores atípicos, se realiza un análisis de ANOVA simple para identificar si las medias de los valores CTF e IM son iguales para los ensayos realizados con diferentes parámetros operacionales.

6.2 ANOVA simple.

El Análisis de Varianza (o ANOVA, del inglés analysis of variance) es una prueba utilizada para contrastar la hipótesis de que varias medias son iguales. El ANOVA utiliza una estrategia bastante razonable: si los resultados de cada uno de los grupos (CTF e IM para cada una de las combinatorias) no contienen errores sistemáticos, los valores medios respectivos no diferirán mucho los unos de los otros y su dispersión, debido a los errores aleatorios, es comparable a la dispersión presente individualmente en cada grupo. Así, la prueba se basa en la estimación del estadístico F, que muestra el grado de parecido existente entre las medias que se comparan (Murillo & Martínez, 2014).

Si las medias de las poblaciones son iguales, las medias de las muestras de los grupos son parecidas, por lo que las únicas diferencias serán las atribuidas al azar, y el valor del estimador F será de 1. Si las medias poblacionales son diferentes, entonces el valor será mayor que 1, y más alto conforme mayor sea la diferencia (Murillo & Martínez, 2014).

El estadístico F está asociado a un nivel crítico (la probabilidad de obtener valores como el obtenido o mayores). Si éste es mayor a nuestro nivel de error asumido (que habitualmente será del 95%, de decir de un 0,05) se rechaza la hipótesis nula, que indica la igualdad de medias, y se acepta la alternativa.

La hipótesis nula es:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6 \dots = \mu_{29}$$

El promedio de CTF e IM en las 29 combinaciones es igual, con 95% de confiabilidad.

La hipótesis alternativa es: Al menos una combinatoria arroja valores diferentes.

6.2.1 Resumen ANOVA IM:

Tabla 11.

Resumen ANOVA IM.

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
PB	17	122860,14	7227,06692	14602,28714
VPP1	17	121734,22	7160,83672	11035,18226
VPP2	17	123260,35	7250,60872	32564,16159
VPP3	17	124143,51	7302,55932	42287,47861
VPP4	17	125119,87	7359,99248	9984,931499
VPP5	17	124712,7	7336,04139	10840,24754
VP1	17	122094,7	7182,0414	24421,89748
VP2	17	120988,87	7116,99213	55141,24296
VP3	17	123736,43	7278,61332	18368,71416
VP4	17	122442,22	7202,48376	48618,1311
VP5	17	121976,48	7175,0873	36174,90324
DM1	17	123714,39	7277,31706	10884,3408
DM2	17	120456,87	7085,69844	63477,16274
DM3	17	122407,57	7200,44554	50269,96608
DM4	17	122022,87	7177,81575	40580,19201
DM5	17	122076,25	7180,95608	41707,93129
CMB1	17	121121,3	7124,78247	22627,271
CMB2	17	122271,58	7192,44613	30996,00028
CMB3	17	122790,71	7222,98279	47161,18647
CMB4	17	122388,81	7199,34164	52411,02523
CMB5	17	122669,26	7215,83861	33935,60797
CMB6	17	120845,1	7108,53502	46197,33379
CMB7	17	122380,11	7198,82976	35422,7656
CMB8	17	123515,04	7265,59086	17524,28869
CMB9	17	120750,81	7102,98893	52913,11546
CMB1--	17	120029,72	7060,57161	29411,87438
CMB2--	17	120236,31	7072,7242	28737,25484
CMB4--	17	119664,28	7039,07512	31621,79965
CMB7--	17	120001,84	7058,93177	14607,18376

6.2.2 Análisis de varianza IM:

Tabla 12.

Análisis de varianza IM.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	3352660,4	28	119737,87	3,637827	3,71875E-09	1,50068676
Dentro de los grupos	15272408	464	32914,672			
Total	18625068	492				

6.2.3 Resumen ANOVA CTF:

Tabla 13.

Resumen ANOVA CTF.

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
PB	17	50477,27	2969,2514	280067,0722
VPP1	17	52080,41	3063,55366	108651,568
VPP2	17	49048,64	2885,21394	189262,6538
VPP3	17	53690,13	3158,24285	257791,1444
VPP4	17	55245,2	3249,7176	102498,4676
VPP5	17	53964,26	3174,36843	259127,7266
VP1	17	54268,12	3192,24212	146697,0348
VP2	17	56851,12	3344,18354	204838,7592
VP3	17	55599,34	3270,54968	234498,3421
VP4	17	53325,82	3136,81296	255543,2173
VP5	17	51246,46	3014,49783	300750,3933
DM1	17	52147,31	3067,48859	66272,05824
DM2	17	50765,12	2986,18335	68537,61979
DM3	17	52489,07	3087,59222	148032,9523
DM4	17	50802,82	2988,40146	81194,69957
DM5	17	51581,6	3034,21199	248133,0845
CMB1	17	57844,64	3402,62593	427352,8636
CMB2	17	49129,06	2889,94469	342984,361
CMB3	17	49973,24	2939,60214	293412,2006
CMB4	17	61643,64	3626,0964	150444,5636
CMB5	17	47588,54	2799,32594	101784,451
CMB6	17	50034,36	2943,19793	169738,4154
CMB7	17	63144,31	3714,37127	388763,2555
CMB8	17	52630,32	3095,90147	293939,1177
CMB9	17	46573,02	2739,58954	95020,55083
CMB1--	17	47574,01	2798,4714	86858,14611
CMB2--	17	47620,47	2801,20393	131743,0697
CMB4--	17	48065,58	2827,38685	101169,4932
CMB7--	17	42866,36	2521,55071	67174,61698

5.2.4 Análisis de varianza CTF:

Tabla 14.

Análisis de varianza CTF.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	31187307,1	28	1113832,395	5,7657112	2,94929E-17	1,500686758
Dentro de los grupos	89636510,4	464	193182,1344			
Total	120823817	492				

¿Existe diferencia estadísticamente significativa en el promedio de CTF e IM entre la combinatoria de parámetros utilizados? Debido a que el valor F es superior a 1, el nivel de significancia es de 0,05 y el valor de P es aproximadamente 0 se rechaza la hipótesis nula y se opta por aceptar la hipótesis alterna que dice que en al menos una combinatoria de parámetros la media es diferente; así pues, se debe identificar que combinatoria está presentando diferencia estadísticamente significativa para se utilizara el análisis de Tukey.

5.3 Prueba de TUKEY.

Cuando se realiza un análisis de varianza, un valor de F significativo indica que no todas las condiciones producen el mismo efecto sobre la variable independiente. Con el fin de tener mayores elementos para la toma de decisiones es importante saber dónde se encuentran dichas diferencias significativas y si éstas siguen unas tendencias que permitan una mejor toma de decisiones (Llopis, 2013).

Una prueba que permite evaluar dicha diferenciación es la prueba de Tukey, que mide la diferencia de los valores de la media de dos o más grupos en términos de la varianza intragrupal (Llopis, 2013).

Para realizar la prueba de Tukey se necesitan los siguientes datos (Llopis, 2013):

- Diferencia honestamente significativa (HSD).
- Multiplicador.
- Cuadrado del error medio (Mse).
- Tamaño de los grupos.

El valor del multiplicador es tomado de la tabla valores críticos para la prueba de Tukey q_α (Llopis, 2013); se busca el valor correspondiente a la intersección entre los grados de libertad dentro de los grupos **464** (filas) y el número de grupos que se está analizando **29** (Columnas). Así se obtiene un valor de **5,59** para el desarrollo de la prueba.

El valor del cuadrado del error medio se halla así:

$$Mse = \frac{\textit{suma de cuadrados dentro de los grupos}}{\textit{grados de libertad dentro de los grupos}}$$

Ecuación 4: Cuadrado del error medio.

Identificados los valores atípicos de la totalidad de los ensayos, mostrados en la tabla 10: Discretización de los valores atípicos. Se retiraron y fueron reemplazados por el promedio de los datos.

Tabla 15a.

Reemplazo de valores atípicos para CTF.

	PB	VPP1	VPP2	VPP3	VPP4	VPP5	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	DM1	DM2	DM3	DM4
	3187,906	3212,756	2065,502	4094,565	3029,623	4067,639	2831,414	3416,472	3642,827	3943,763	2576,655	2997,754	2998,714	2666,473	2704,65
	1986,981	3004,097	3095,347	3118,098	2790,799	2226,02	3563,719	3128,435	3712,421	3655,68	3202,994	2765,318	3274,112	3059,303	3128,017
	2975,072	3073,048	2938,249	3604,164	3257,185	3113,617	3745,475	3816,706	3922,277	3417,624	3386,816	3428,875	2933,475	2441,992	2945,956
	2352,141	2615,374	3047,341	3160,664	3950,478	3901,208	3026,881	4163,11	2431,135	2845,565	3782,083	2994,211	2927,472	3412,816	2350,651
	2373,548	3167,221	2308,377	3191,292	2956,372	3375,61	3057,723	3940,581	2474,278	3224,379	3826,998	3361,831	2688,93	3330,289	3111,304
	2540,103	2962,376	2337,199	2872,525	3200,309	3387,369	3719,271	3117,093	3098,902	2528,164	2599,631	3331,688	3351,257	3278,356	3003,487
	3592,01	3842,774	3493,143	2560,913	3533,013	2277,806	3192,242	2943,745	3826,998	3327,524	3826,005	2946,633	3028,1	3306,083	3691,567
	3382,934	2864,321	3670,362	2151,618	3209,923	2486,138	2958,663	3160,1	3757,46	3280,703	2829,665	3220,52	2684,574	3014,987	2953,72
	3432,486	3009,592	3142,112	3703,393	3639,272	3353,446	4062,346	3259,656	3714,091	3136,813	2541,83	3123,751	2828,976	3147,698	3085,506
	3706,429	3355,646	2915,058	3184,239	3304,808	2998,917	3437,553	3145,971	2800,38	3829,853	3998,033	2921,57	2850,35	3645,163	2988,401
	2729,296	2627,731	2732,557	2946,667	3240,178	3342,409	2888,471	2880,402	3515,825	2520,366	2812,478	2640,088	3307,922	2996,919	3178,213
	2133,787	3063,554	3073,228	3628,382	2926,591	3598,228	2776,05	3689,073	3444,064	2789,084	2514,881	3067,489	2993,669	2782,335	2939,727
	3224,899	3370,418	3074,56	2889,757	3413,663	3356,741	2944,309	3779,228	3319,162	1991,213	2497,141	3052,464	2499,15	3229,164	3050,365
	3082,031	2433,325	2219,711	3912,03	3460,913	3087,572	3193,752	3054,27	3254,431	3395,482	2425,583	3200,692	3180,21	2987,891	2884,081
	3305,394	3000,203	3104,127	2976,437	3187,557	2759,167	3192,242	3322,017	2634,412	2882,151	2856,365	3352,001	3205,263	3493,493	2582,208
	3503,006	3305,011	2986,007	2560,642	3473,417	3437,124	2812,974	3673,646	3171,859	3050,963	3014,498	2517,195	2672,894	2217,928	3216,57
	2969,251	3172,965	2845,757	3134,743	2671,099	3195,253	2865,032	2360,616	2878,822	3506,493	2554,808	3225,226	3340,051	3478,179	2988,401
PROM	2969,251	3063,554	2885,214	3158,243	3249,718	3174,368	3192,242	3344,184	3270,55	3136,813	3014,498	3067,489	2986,183	3087,592	2988,401

Tabla 15b.

Reemplazo de valores atípicos para CTF.

	DM5	CMB1	CMB2	CMB3	CMB4	CMB5	CMB6	CMB7	CMB8	CMB9	CMB1--	CMB2--	CMB4--	CMB7--
	2607,858	3967,563	4261,842	2557,087	4091,134	2632,223	2961,767	4388,403	2951,463	2739,59	3042,646	2801,204	2529,394	2401,23
	2776,264	2072,623	2718,101	4056,557	3626,096	2833,93	2557,019	3873,605	3545,934	2266,059	2541,83	2245,565	2391,096	2820,174
	3034,212	3440,352	2745,749	2870,584	3092,582	2442,183	3646,46	3714,371	2879,24	2520,05	2738,651	2885,175	2842,326	2521,551
	2554,13	3279,247	2465,126	2435,469	3719,644	2843,331	2818,605	4337,068	3679,751	2953,201	2447,815	2614,697	3172,198	2521,551
	3396,87	4360,191	2090,95	2939,602	3245,99	2662,162	3089,4	4403,401	3494,486	2739,59	2741,901	2546,186	2827,387	2521,551
	3611,342	3578,356	2158,93	2939,602	3626,096	3123,424	2639,242	3743,827	3373,623	2851,478	2798,471	2801,204	2827,387	2864,343
	2803,687	3402,626	2710,495	2744,519	3684,48	3333,957	2437,568	3922,243	3527,934	2723,213	3255,718	2860,416	2827,387	2412,786
	2958,833	3758,295	2630,293	3672,45	3591,367	3087,526	2943,198	3771,103	4368,067	3751,907	3287,925	3278,525	2787,346	2238,061
	2725,358	3588,794	3203,073	2610,048	2950,752	3005,372	2681,041	2616,13	3095,901	2739,59	2923,037	2989,009	2867,921	2278,28
	3517,676	3322,83	3610,123	4068,541	3720,366	3021,408	2601,166	2391,988	2186,037	2678,762	2391,119	2807,174	3763,881	2099,955
	3903,194	3415,299	3913,452	2610,781	3290,171	2435,548	2625,057	2723,45	3145,057	2457,689	3310,303	2834,833	2588,832	2637,967
	2783,419	3037,094	2371,302	2939,602	4115,092	2761,379	2943,198	4239,949	2578,732	2599,462	2732,219	2702,438	2330,18	2755,003
	3965,656	1932,61	3169,264	3237,572	3054,992	2293,301	3980,259	3714,371	2723,405	2739,59	2478,284	3867,251	2909,686	2816,168
	2709,378	3907,245	2659,521	2773,793	4272,134	2697,529	2943,198	4412,271	2266,296	2607,373	2432,478	2461,842	2827,387	2263,734
	2857,087	3017,244	2889,945	2550,79	3712,489	2677,52	2954,612	3763,655	3095,901	2565,032	2827,667	2406,038	2792,65	2379,947
	2151,2	3402,626	2705,947	2101,535	3953,435	2388,918	2738,143	3360,318	2942,955	2798,552	2825,478	2717,706	2990,679	2320,035
	3225,44	4361,646	2824,947	2864,704	3896,818	3348,83	3474,432	3768,158	2775,542	2841,886	2798,471	2801,204	2789,84	3014,027
PROM	3034,212	3402,626	2889,945	2939,602	3626,096	2799,326	2943,198	3714,371	3095,901	2739,59	2798,471	2801,204	2827,387	2521,551

A continuación, se halla el valor del cuadrado del error medio para CTF:

$$Mse = \frac{89636510,4}{464} = 193182,13$$

Con el cuadrado del error medio (193182,13), el tamaño de la muestra (17) y el multiplicador (5,59) se define la diferencia honestamente significativa (HSD).

$$HSD = \text{multiplicador} * \sqrt{\frac{Mse}{n}}$$

Ecuación 5: Diferencia honestamente significativa.

$$HSD = 5,59 * \sqrt{\frac{193182,13}{17}} = 595,89$$

Tabla 16.

Resumen datos análisis de Tukey para CTF.

Diferencia honestamente significativa	595,89
Multiplicador	5,59
Cuadrado del error medio	193182,13
Tamaño de la muestra	17

A continuación, se construye una matriz de la siguiente forma.

Tabla 17.

Matriz ejemplo análisis de Tukey.

	\bar{Y}_1	\bar{Y}_2	\bar{Y}_3	\bar{Y}_4
\bar{Y}_1	0	$ \bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 $	$ \bar{Y}_1 - \bar{Y}_3 $	$ \bar{Y}_1 - \bar{Y}_4 $
\bar{Y}_2		0	$ \bar{Y}_2 - \bar{Y}_3 $	$ \bar{Y}_2 - \bar{Y}_4 $
\bar{Y}_3			0	$ \bar{Y}_3 - \bar{Y}_4 $
\bar{Y}_4				0

En donde \bar{Y}_i es el promedio de los 17 valores de CTF y/o IM de cada una de las combinatorias y $|\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2|$ es el valor absoluto de la diferencia de cada una de las parejas que se forman.

Tabla 18.

Matriz resultados cuantitativos análisis de Tukey para CTF.

	PB	VPP1	VPP2	VPP3	VPP4	VPP5	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	CMB1	CMB2	CMB3	CMB4	CMB5	CMB6	CMB7	CMB8	CMB9	CMB1-	CMB2-	CMB4-	CMB7-
PB	0,0	94,3	84,0	189,0	280,5	205,1	223,0	374,9	301,3	167,6	45,2	98,2	16,9	118,3	19,2	65,0	433,4	79,3	29,6	656,8	169,9	26,1	745,1	126,7	229,7	170,8	168,0	141,9	447,7
VPP1		0,0	178,3	94,7	186,2	110,8	128,7	280,6	207,0	73,3	49,1	3,9	77,4	24,0	75,2	29,3	339,1	173,6	124,0	562,5	264,2	120,4	650,8	32,3	324,0	265,1	262,3	236,2	542,0
VPP2			0,0	273,0	364,5	289,2	307,0	459,0	385,3	251,6	129,3	182,3	101,0	202,4	103,2	149,0	517,4	4,7	54,4	740,9	85,9	58,0	829,2	210,7	145,6	86,7	84,0	57,8	363,7
VPP3				0,0	91,5	16,1	34,0	185,9	112,3	21,4	143,7	90,8	172,1	70,7	169,8	124,0	244,4	268,3	218,6	467,9	358,9	215,0	556,1	62,3	418,7	359,8	357,0	330,9	636,7
VPP4					0,0	75,3	57,5	94,5	20,8	112,9	235,2	182,2	263,5	162,1	261,3	215,5	152,9	359,8	310,1	376,4	450,4	306,5	464,7	153,8	510,1	451,2	448,5	422,3	728,2
VPP5						0,0	17,9	169,8	96,2	37,6	159,9	106,9	188,2	86,8	186,0	140,2	228,3	284,4	234,8	451,7	375,0	231,2	540,0	78,5	434,8	375,9	373,2	347,0	652,8
VP1							0,0	151,9	78,3	55,4	177,7	124,8	206,1	104,6	203,8	158,0	210,4	302,3	252,6	433,9	392,9	249,0	522,1	96,3	452,7	393,8	391,0	364,9	670,7
VP2								0,0	73,6	207,4	329,7	276,7	358,0	256,6	355,8	310,0	58,4	454,2	404,6	281,9	544,9	401,0	370,2	248,3	604,6	545,7	543,0	516,8	822,6
VP3									0,0	133,7	256,1	203,1	284,4	183,0	282,1	236,3	132,1	380,6	330,9	355,5	471,2	327,4	443,8	174,6	531,0	472,1	469,3	443,2	749,0
VP4										0,0	122,3	69,3	150,6	49,2	148,4	102,6	265,8	246,9	197,2	489,3	337,5	193,6	577,6	40,9	397,2	338,3	335,6	309,4	615,3
VP5											0,0	53,0	28,3	73,1	26,1	19,7	388,1	124,6	74,9	611,6	215,2	71,3	699,9	81,4	274,9	216,0	213,3	187,1	492,9
DM1												0,0	81,3	20,1	79,1	33,3	335,1	177,5	127,9	558,6	268,2	124,3	646,9	28,4	327,9	269,0	266,3	240,1	545,9
DM2													0,0	101,4	2,2	48,0	416,4	96,2	46,6	639,9	186,9	43,0	728,2	109,7	246,6	187,7	185,0	158,8	464,6
DM3														0,0	99,2	53,4	315,0	197,6	148,0	538,5	288,3	144,4	626,8	8,3	348,0	289,1	286,4	260,2	566,0
DM4															0,0	45,8	414,2	98,5	48,8	637,7	189,1	45,2	726,0	107,5	248,8	189,9	187,2	161,0	466,9
DM5																0,0	368,4	144,3	94,6	591,9	234,9	91,0	680,2	61,7	294,6	235,7	233,0	206,8	512,7
CMB1																	0,0	512,7	463,0	223,5	603,3	459,4	311,7	306,7	663,0	604,2	601,4	575,2	881,1
CMB2																		0,0	49,7	736,2	90,6	53,3	824,4	206,0	150,4	91,5	88,7	62,6	368,4
CMB3																			0,0	686,5	140,3	3,6	774,8	156,3	200,0	141,1	138,4	112,2	418,1
CMB4																				0,0	826,8	682,9	88,3	530,2	886,5	827,6	824,9	798,7	1104,5
CMB5																					0,0	143,9	915,0	296,6	59,7	0,9	1,9	28,1	277,8
CMB6																						0,0	771,2	152,7	203,6	144,7	142,0	115,8	421,6
CMB7																							0,0	618,5	974,8	915,9	913,2	887,0	1192,8
CMB8																								0,0	356,3	297,4	294,7	268,5	574,4
CMB9																								0,0	58,9	61,6	87,8	218,0	
CMB1-																									0,0	2,7	28,9	276,9	
-																													
CMB2-																											0,0	26,2	279,7
-																													
CMB4-																												0,0	305,8
-																													
CMB7-																													0,0
-																													

Teniendo los resultados del valor absoluto de cada una de las celdas de la matriz resultados cuantitativos análisis de Tukey para CTF se compara con la diferencia honestamente significativa (HSD), calculada anteriormente si es mayor que 595,89 existe diferencia estadísticamente significativa en esa pareja de combinatorias.

Tabla 19.

Matriz resultados cualitativa análisis de Tukey para CTF

	PB	VPP1	VPP2	VPP3	VPP4	VPP5	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	CMB1	CMB2	CMB3	CMB4	CMB5	CMB6	CMB7	CMB8	CMB9	CMB1--	CMB2--	CMB4--	CMB7--
PB	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
VPP1		NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
VPP2			NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
VPP3				NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
VPP4					NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
VPP5						NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
VP1							NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
VP2								NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI
VP3									NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
VP4										NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
VP5											NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
DM1												NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
DM2													NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
DM3														NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
DM4															NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
DM5																NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
CMB1																	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	NO	SI	
CMB2																		NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
CMB3																			NO	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
CMB4																			NO	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
CMB5																				NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
CMB6																					NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
CMB7																							NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
CMB8																								NO	NO	NO	NO	NO	NO
CMB9																									NO	NO	NO	NO	NO
CMB1--																										NO	NO	NO	NO
CMB2--																											NO	NO	NO
CMB4--																												NO	NO
CMB7--																													NO

Se puede observar que las combinatorias CMB4, CMB7, CMB7--; presentan una tendencia fuera de la media grupal. A continuación, se procede a realizar el mismo análisis de Tukey para los valores de Módulo de Indentación (IM).

De nuevo se cambian los datos atípicos por el valor promedio correspondiente como se observa en la tabla 20a y 20b.

Tabla 20a.
Reemplazo de valores atípicos para IM.

	PB	VPP1	VPP2	VPP3	VPP4	VPP5	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	DM1	DM2	DM3	DM4
	7439,735	7185,309	6843,239	7334,311	7182,506	7379,456	7133,249	6972,317	7459,729	7281,309	7216,941	7107,59	7203,224	7012,058	7170,73
	7310,69	7232,619	7343,911	7339,488	7279,186	7255,206	6748,313	7113,624	7352,155	7409,31	7197,76	7033,988	6774,77	7069,072	7274,876
	7109,902	7358,339	7261,449	7326,745	7322,344	7366,003	7271,223	7251,784	7338,898	7237,013	7138,455	7347,291	7313,95	7264,538	7146,771
	7246,832	7059,882	7062,075	6929,248	7582,03	7390,535	7146,757	7315,001	7344,781	7290,365	6998,979	7334,604	6817,286	7392,653	6868,777
	7352,851	7229,278	7003,493	7166,2	7460,457	7192,214	7253,486	7159,449	7423,043	6937,078	7410,585	7288,772	7304,101	7069,188	7164,971
	7194,308	7377,584	7429,682	7429,205	7206,838	7366,561	7210,392	7407,026	7385,688	7035,9	7171,497	7332,4	7361,079	7032,324	6713,231
	7179,676	7144,886	7126,36	7411,869	7318,221	7301,491	7182,041	7212,991	7147,598	7172,593	7235,115	7373,772	6817,893	7424,148	7379,764
	7301,772	7108,121	7516,503	6697,01	7411,885	7404,805	7153,521	7309,99	7173,483	7247,064	7308,996	7123,202	7127,012	7392,25	7067,994
	7205,173	7142,323	7381,837	7442,191	7429,59	7228,585	7385,377	7415,512	7161,087	7202,484	7163,668	7295,271	7024,908	7193,536	7238,619
	7275,176	7101,752	7324,959	7450,47	7413,064	7216,7	6922,986	6743,512	7239,074	7358,197	7291,994	7305,573	7250,205	7298,313	7177,816
	7316,155	7144,35	7129,789	7281,264	7449,106	7246,864	7149,518	7121,9	7191,762	7416,758	7272,675	7237,618	7316,858	7217,684	7056,899
	7330,182	7160,837	7347,362	7411,47	7247,742	7324,934	7280,854	6727,516	7277,631	7188,23	7380,849	7277,317	7268,729	7452,598	7485,785
	6977,138	7209,511	7388,854	7301,721	7361,558	7484,494	7344,932	7278,887	7286,063	6603,5	6729,054	7385,984	7026,715	7395,754	7510,937
	6987,289	7110,066	7272,557	7422,171	7414,348	7459,558	7125,749	6869,812	6928,992	6904,831	7154,514	7416,104	6603,378	7241,992	7267,661
	7210,371	6946,709	7092,659	7362,538	7369,603	7198,849	7182,041	7241,162	7483,088	7397,791	6766,851	7353,058	7168,522	6627,463	7015,779
	7195,821	7170,954	7288,069	7313,002	7352,888	7544,313	7359,174	7163,115	7268,737	7373,884	7175,087	7271,384	7370,059	6903,588	7304,444
	7227,067	7051,706	7447,548	7524,609	7318,506	7352,136	7245,091	6685,268	7274,617	7385,917	7363,464	7230,46	6708,185	7420,412	7177,816
PROM	7227,067	7160,837	7250,609	7302,559	7359,992	7336,041	7182,041	7116,992	7278,613	7202,484	7175,087	7277,317	7085,698	7200,446	7177,816

Tabla 20b.
Reemplazo de valores atípicos para IM.

	DM5	CMB1	CMB2	CMB3	CMB4	CMB5	CMB6	CMB7	CMB8	CMB9	CMB1--	CMB2--	CMB4--	CMB7--
	7216,226	7328,965	7363,586	7441,138	6962,185	7604,622	7402,685	7432,462	7179,047	7102,989	7045,86	7072,724	6634,364	6973,635
	7392,623	7028,336	7229,139	6604,022	7199,342	6977,063	7192,702	7433,767	7387,06	6902,796	6933,404	7283,151	7257,305	7086,473
	7180,956	6951,422	7341,469	7393,785	7338,729	7091,341	6626,306	7198,83	7365,929	6850,139	7201,443	7271,349	6822,868	7058,932
	6686,824	7303,865	6833,176	7098,181	7435,147	7091,898	6832,588	7245,943	7277,238	7345,581	7111,518	7048,326	7303,812	7058,932
	7359,867	7241,446	7407,019	7222,983	7495,631	7381,965	7287,519	7335,956	7405,092	7102,989	7095,347	7287,685	7039,075	7058,932
	7113,947	6958,146	7058,029	7222,983	7199,342	7105,541	6889,077	7297,136	7159,056	7462,634	7060,572	7072,724	7039,075	6858,622
	6764,027	7124,782	7396,647	7363	7042,612	7050,995	6903,949	7106,38	7430,892	6718,847	7304,857	7076,003	7039,075	7197,484
	7362,628	7299,905	6882,092	7321,654	7097,474	7342,197	7108,535	6690,788	7413,091	7230,798	7161,917	6950,275	6959,095	7064,724
	7211,203	6874,728	7355,348	7275,702	6729,765	7281,88	7144,839	7328,329	7265,591	7102,989	7006,872	6993,725	7346,366	7095,706
	7245,59	6975,601	7037,082	7111,741	6999,571	7290,715	7123,768	7284,625	7153,935	7375,763	6667,147	7091,861	7049,613	6941,631
	7206,73	7156,091	7292,078	7412,461	7290,19	7299,561	6919,372	7180,641	7320,519	6707,349	7051,948	6971,206	7129,392	7140,234
	7319,442	7332,351	7158,195	7222,983	7555,901	6917,532	7108,535	7245,176	7032,858	6888,492	6838,612	6693,78	7078,557	6974,002
	7073,664	6972,3	7195,828	7179,693	7339,575	7365,87	7382,928	7198,83	6963,814	7102,989	7265,671	6781,517	6836,642	7288,644
	7343,299	7271,418	7357,843	6890,772	6925,779	7277,393	7108,535	7340,308	7271,935	7221,983	6807,336	7272,627	7039,075	7143,012
	6991,765	7070,518	7192,446	7452,405	7189,217	7063,216	7193,57	7101,695	7265,591	7160,405	7251,598	7054,631	7158,487	7042,079
	7253,541	7124,782	7084,566	7400,953	7489,343	7089,241	7227,334	7040,767	7272,715	7410,478	7165,044	7242,002	6942,759	7199,615
	7353,919	7106,646	7087,043	7176,251	7099,003	7438,226	7392,852	6918,474	7350,681	7063,591	7060,572	7072,724	6988,717	6819,184
ROM	7180,956	7124,782	7192,446	7222,983	7199,342	7215,839	7108,535	7198,83	7265,591	7102,989	7060,572	7072,724	7039,075	7058,932

El valor del multiplicador es el mismo que se usó para CTF (5,59) ya que son los mismos grados de libertad y el mismo número de repeticiones por combinatoria.

A continuación, se halla el valor del cuadrado del error medio para IM se aplica la ecuación 4: cuadrado del error medio; y los datos de suma de cuadrados y grados de libertad se obtienen del análisis ANOVA respectivo.

$$Mse = \frac{15272407,64}{464} = 32914,67$$

Con el cuadrado del error medio (32914,67), el tamaño de la muestra (17) y el multiplicador (5,59) se define la diferencia honestamente significativa (HSD).

$$HSD = 5,59 * \sqrt{\frac{32914,67}{17}} = 245,96$$

Tabla 21.

Resumen datos análisis de Tukey para IM.

Diferencia honestamente significativa	245,96
Multiplicador	5,59
Cuadrado del error medio	15272407,64
Tamaño de la muestra	17

Se elabora de nuevo la matriz diferencia en donde se relacionan todas las parejas posibles y se evalúa cuantitativamente y cualitativamente para encontrar que combinatoria presenta diferencia estadísticamente significativa de las medias.

7. Error Sistemático.

Debido a que se encontraron discrepancias en el valor promedio de CTF e IM entre los diferentes grupos (combinatorias) y no hay un valor teórico en literatura donde se pueda comparar y determinar cuál de las combinatorias arroja resultados más próximos a un valor nominal. Se hizo necesario recurrir al módulo de Young (E) y a la dureza superficial (H) del vidrio.

7.1 Módulo de Young (E).

El módulo de Young conocido también como Módulo Elástico (Y), es la constante de proporcionalidad o gradiente de la curva en una gráfica de esfuerzo vs deformación axial (en la misma dirección en la que se aplica la fuerza) y corresponde a una propiedad constante para un material elástico-lineal. La figura 16 representa la deformación elástica para una muestra cilíndrica, así como la relación constitutiva y el resultado de un ensayo de compresión, para la constante elástica Módulo de Young.

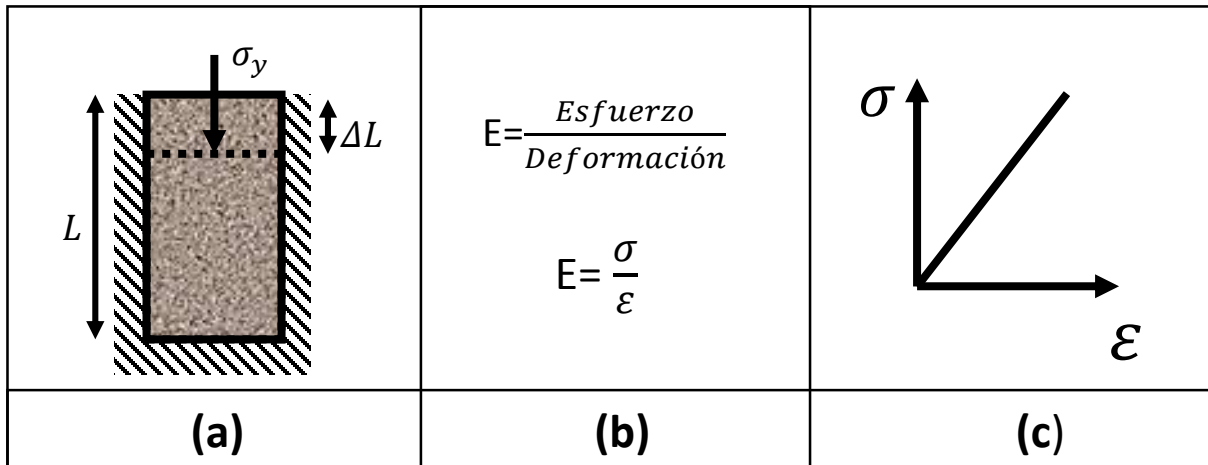


Figura 16. Representación del Módulo de Young (a) Prueba del laboratorio, (b) relación constitutiva, y (c) resultado de una prueba de compresión. Adaptado de: Introducción a la mecánica de rocas y sus aplicaciones en la industria del petróleo. (Calderón, 2011, p. 155).

Para esta investigación el módulo de Young se determina de la gráfica de esfuerzo vs deformación proporcionada por el software Exponent (Figura 17). De manera análoga al módulo de indentación, se determina el gradiente de la gráfica en la zona elástica mediante la siguiente ecuación.

$$E = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\sigma_2 - \sigma_1} [Pa]$$

Ecuación 6: Módulo de Young.

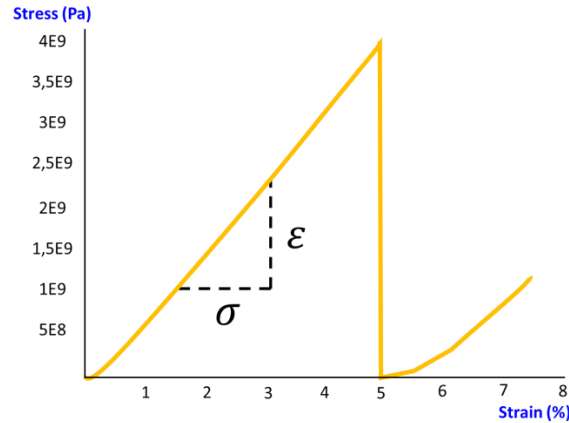


Figura 17. Módulo de Young en gráfica esfuerzo Vs Deformación.

7.2 Dureza superficial (H).

La dureza es una propiedad que se define como la resistencia de un material a ser rayado. No debe confundirse con la tenacidad. Hay diversas formas de medir la dureza, actualmente se mide a partir de ensayos de indentación, que consiste en aplicar un penetrador sobre la superficie del material en condiciones controladas de carga y velocidad de aplicación de la carga. La dureza se determina a partir de la profundidad o tamaño de la huella resultante; las durezas así medidas tienen sólo carácter relativo y no absoluto, es decir arrojan un valor índice de la dureza. Debido a la limitante en equipos para determinar las dimensiones de la huella, para esta investigación se dispone hallar la dureza superficial como el punto máximo en la curva de esfuerzo vs deformación. (Universidad Nacional de la Pampa, 2011)

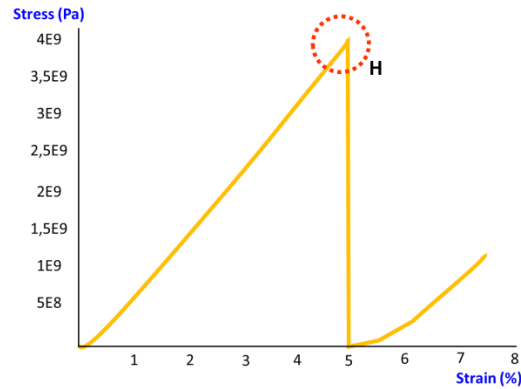


Figura 18. Dureza superficial (H) en gráfica esfuerzo Vs deformación.

En la tabla 24 se observa el valor obtenido para dureza superficial (H) y Módulo de Young (E) de las diferentes combinatorias, luego de la interpretación de las 493 gráficas de esfuerzos vs deformación.

Tabla 24.

Resultados módulo de Young y dureza superficial.

	H (Pa)	E (Pa)
PB	3,214E+09	4,661E+10
VPP1	3,532E+09	5,203E+10
VPP2	3,335E+09	5,001E+10
VPP3	3,615E+09	5,007E+10
VPP4	3,615E+09	4,926E+10
VPP5	3,636E+09	4,986E+10
VP1	3,713E+09	5,07E+10
VP2	3,883E+09	5,233E+10
VP3	3,774E+09	5,25E+10
VP4	3,667E+09	5,14E+10
VP5	3,481E+09	5,048E+10
DM1	3,473E+09	5,097E+10
DM2	3,524E+09	8,112E+10
DM3	3,682E+09	8,29E+10

	H (Pa)	E (Pa)
DM4	3,436E+09	8,151E+10
DM5	3,605E+09	8,149E+10
CMB1	4,292E+09	8,478E+10
CMB2	4,093E+09	8,093E+10
CMB3	4,03E+09	8,005E+10
CMB4	4,36E+09	8,478E+10
CMB5	3,945E+09	8,067E+10
CMB6	4,329E+09	8,342E+10
CMB7	4,424E+09	8,301E+10
CMB8	4,027E+09	8,234E+10
CMB9	4,122E+09	7,966E+10
CMB1--	4,093E+09	8,104E+10
CMB2--	4,051E+09	7,971E+10
CMB4--	3,932E+09	7,996E+10
CMB7--	4,011E+09	8,096E+10

En la figura 19 y 20, se presentan los valores de la tabla 24 de manera gráfica, además se representa una línea del valor teórico tomado. (Meza, 2004, pág. 75)

Tabla 25.

Módulo de Young y Dureza superficial Teóricos.

Material	Relación de Poisson	Módulo de Young	Dureza Superficial
Vidrio Sílice	0,19	70 [GPa]	5,57 [GPa]

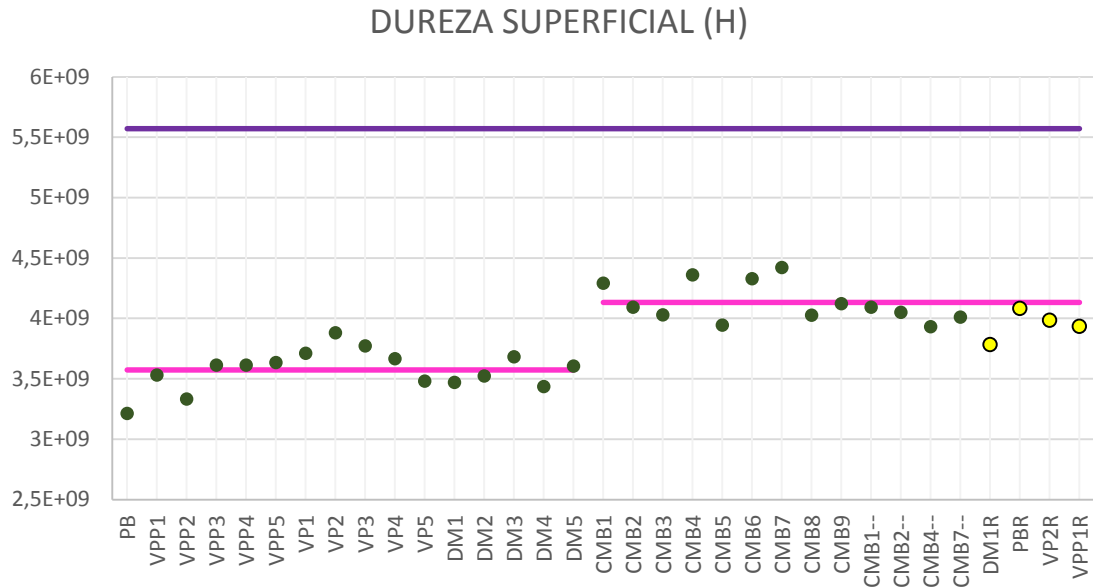


Figura 19. Resultados dureza superficial (H).

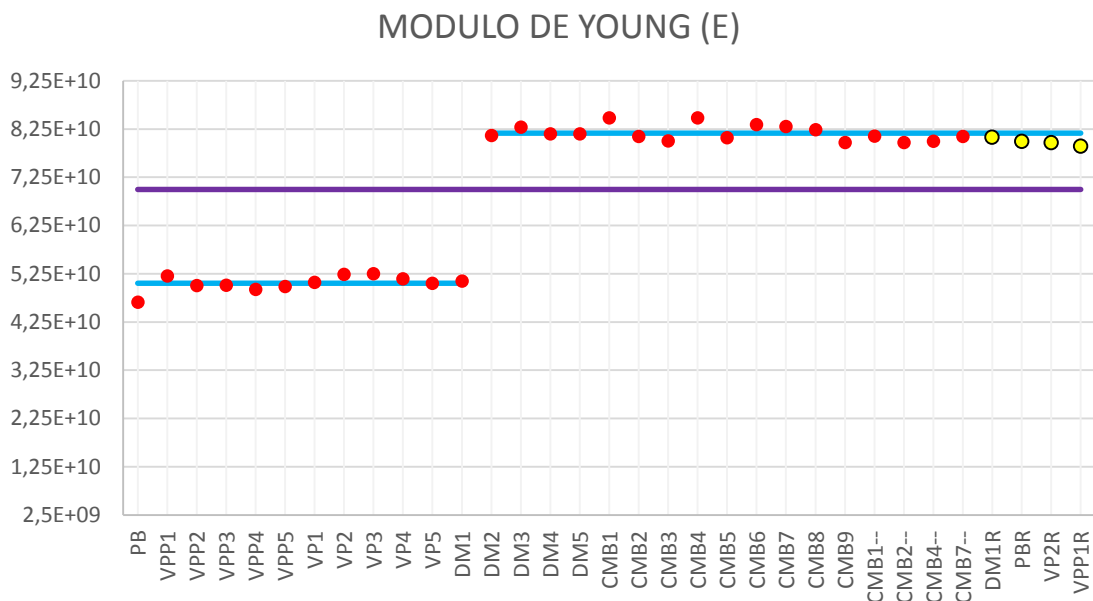


Figura 20. Resultados módulo de Young (E).

En cada una de las gráficas se puede identificar dos tendencias marcadas originadas probablemente a un error sistemático. Se plantearon posibles causas:

Para la Dureza superficial (H) el cambio de la superficie donde reposaba el equipo es la causante del error sistemático dado que las combinatorias nombradas CMB# fueron realizadas en un mesón de mármol, lo que probablemente hizo que las vibraciones se redujeran alterando los resultados finales.

Para el módulo de Young se observa que la segunda línea de tendencia se registra a partir de la combinatoria DM2; todas las combinatorias realizadas a partir de esta fueron realizadas en vidrio grueso (100 mm de espesor); pese a que se cumplió con el protocolo del laboratorio, el cual dice que el espesor de la muestra debe ser como mínimo diez veces la profundidad de indentación, se observa que la variación en el espesor presenta cambios significativos en los resultados finales.

Para validar las hipótesis de las posibles causas de los errores sistemáticos anteriormente presentadas se tomaron arbitrariamente tres combinaciones de parámetros, DM1, VPP1 y VP2 adicionalmente también se seleccionó PB ya que es la combinatoria obtenida de la literatura.

Los cuatro parámetros seleccionados se realizaron en vidrio delgado (6 mm de espesor) y en mesa metálica; Los ensayos se repitieron con los mismos parámetros correspondientes a cada combinatoria DM1R, VPP1R, VP2R y PBR (puntos amarillos en las figuras 19 y 20) pero ahora se realizaron en vidrio grueso (10 mm de espesor) y en mesón de mármol. Los resultados obtenidos ratifican las hipótesis de las causas de los errores sistemáticos presentados.

Comparando los resultados respecto al valor teórico de módulo de Young (E) y dureza superficial (H) obtenidos de literatura (Línea Morada), se descarta el grupo o tendencia que

se encuentra más alejada de este valor nominal. Para módulo de Young son todas las combinatorias realizadas en vidrio grueso y para dureza superficial son todas las combinatorias realizadas en mesa metálica debido a que los resultados no son representativos para esta investigación. En consecuencia, las combinatorias de interés son: CMB1, CMB2, CMB3, CMB4, CMB5, CMB6, CMB7, CMB8, CMB9, CMB1--, CMB2--, CMB4--, CMB7--, DM1R, PBR, VP2R Y VPP1R.

8. Selección de la Mejor Combinatoria.

Para seleccionar la combinatoria de parámetros que se van a utilizar en las diferentes litologías se opta por un error estadístico definido como:

$$Error = \frac{|valor\ nominal - X_i|}{\sigma}$$

Ecuación 7: Error estadístico.

Donde:

Valor nominal es el valor de referencia sobre el cual se compara los resultados.

X_i es cada uno de los datos que conforman la lista.

Y σ es la desviación estándar de la lista de datos.

Debido a que siempre se maneja una dupla de datos (CTF e IM; H y E) se toma una decisión en conjunto, para esto se da un porcentaje de peso mayor a cada una de las variables (0,34 y 0,66) luego se saca el promedio del resultado esto garantiza homogeneidad en los resultados.

El primer valor referencia tomado para obtener una combinatoria de parámetros óptimo fue el valor teórico tomado de literatura; se comparó con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio.

Tabla 26.

Selección combinatoria según valor teórico de E y H.

#	COD	H Promedio	E Promedio	H error	E error	% Peso (0,34H y 0,66E)	% Peso (0,34E y 0,66H)	Promedio
1	CMB1	4291590432	8,4783E+10	5,93	8,16	7,40	6,69	7,04
2	CMB2	4092992560	8,0926E+10	6,85	6,03	6,31	6,57	6,44
3	CMB3	4030031758	8,0048E+10	7,14	5,55	6,09	6,60	6,34
4	CMB4	4360322403	8,4783E+10	5,61	8,16	7,29	6,48	6,89
5	CMB5	3944760569	8,0669E+10	7,54	5,89	6,45	6,98	6,71
6	CMB6	4328876117	8,3419E+10	5,76	7,41	6,85	6,32	6,58
7	CMB7	4423638920	8,3014E+10	5,32	7,18	6,55	5,95	6,25
8	CMB8	4026634833	8,2341E+10	7,16	6,81	6,93	7,04	6,99
9	CMB9	4122381984	7,9664E+10	6,72	5,33	5,80	6,25	6,02
10	CMB1--	4092577814	8,1045E+10	6,85	6,10	6,35	6,60	6,47
11	CMB2--	4050850290	7,9711E+10	7,05	5,36	5,93	6,47	6,20
12	CMB4--	3932251511	7,9958E+10	7,60	5,50	6,21	6,88	6,55
13	CMB7--	4011300753	8,0963E+10	7,23	6,05	6,45	6,83	6,64
14	DM1R	3481838799	8,0807E+10	9,69	5,96	7,23	8,42	7,83
15	PBR	4081492383	7,992E+10	6,91	5,48	5,96	6,42	6,19
16	VP2R	3984479530	7,9638E+10	7,36	5,32	6,01	6,66	6,34
17	VPP1R	3932663190	7,8916E+10	7,60	4,92	5,83	6,69	6,26
	Teórico	5,57E+09	7,00E+10					
	Desv Est	215557363	1811896141					

Posteriormente se toma como valor referencia el promedio de la lista de datos y el coeficiente de variación tanto para CTF e IM como para H y E, para obtener otras posibles combinatorias para utilizar en rocas.

Tabla 27.

Selección combinatoria según promedio de E y H.

#	COD	H Promedio	E Promedio	H error	E error	% Peso (0,34H y 0,66E)	% Peso (0,34E y 0,66H)	Promedio
1	CMB1	4291590432	84782560954	1,03	1,97	1,65	1,35	1,50
2	CMB2	4092992560	80925778536	0,11	0,16	0,14	0,12	0,13
3	CMB3	4030031758	80047731375	0,19	0,64	0,49	0,34	0,41
4	CMB4	4360322403	84783280028	1,35	1,97	1,76	1,56	1,66
5	CMB5	3944760569	80669133621	0,58	0,30	0,40	0,49	0,44
6	CMB6	4328876117	83419434988	1,20	1,22	1,21	1,21	1,21
7	CMB7	4423638920	83014205315	1,64	0,99	1,21	1,42	1,32
8	CMB8	4026634833	82341497170	0,20	0,62	0,48	0,34	0,41
9	CMB9	4122381984	79664143763	0,24	0,85	0,65	0,45	0,55
10	CMB1--	4092577814	81044768854	0,11	0,09	0,10	0,10	0,10
11	CMB2--	4050850290	79710711706	0,09	0,83	0,58	0,34	0,46
12	CMB4--	3932251511	79957731348	0,64	0,69	0,67	0,66	0,67
13	CMB7--	4011300753	80962680942	0,27	0,14	0,18	0,23	0,20
14	DM1R	3481838799	80806970933	2,73	0,22	1,08	1,88	1,48
15	PBR	4081492383	79920376001	0,05	0,71	0,49	0,28	0,38
16	VP2R	3984479530	79638144526	0,40	0,87	0,71	0,56	0,63
17	VPP1R	3932663190	78915588315	0,64	1,27	1,05	0,85	0,95
	Promedio	4,07E+09	8,12E+10					
	Desv Est	215557363,1	1811896141					

Tabla 28.

Selección combinatoria según coeficiente de variación de E y H.

#	COD	H Promedio	E Promedio	H error	E error	% Peso (0,34H y 0,66E)	% Peso (0,34E y 0,66H)	Promedio
1	CMB1	0,10484048	0,02820261	0,56	1,25	1,01	0,79	0,90
2	CMB2	0,09537006	0,10129049	0,02	1,45	0,97	0,51	0,74
3	CMB3	0,14281939	0,12284228	2,89	2,25	2,47	2,67	2,57
4	CMB4	0,11366147	0,02511565	1,10	1,36	1,27	1,19	1,23
5	CMB5	0,0760187	0,04743675	1,20	0,54	0,76	0,98	0,87
6	CMB6	0,10850564	0,03846465	0,79	0,87	0,84	0,81	0,83
7	CMB7	0,10922916	0,04729999	0,83	0,54	0,64	0,73	0,69
8	CMB8	0,09027775	0,08544514	0,33	0,87	0,69	0,51	0,60
9	CMB9	0,09087817	0,05588439	0,29	0,22	0,25	0,27	0,26
10	CMB1--	0,08368314	0,04136428	0,74	0,76	0,75	0,74	0,75
11	CMB2--	0,08551153	0,08449221	0,62	0,83	0,76	0,69	0,73
12	CMB4--	0,09203104	0,09292237	0,22	1,14	0,83	0,54	0,68
13	CMB7--	0,08411169	0,04524693	0,71	0,62	0,65	0,68	0,66
14	DM1R	0,09572523	0,05506646	0,00	0,25	0,17	0,09	0,13
15	PBR	0,08536716	0,05207928	0,63	0,37	0,46	0,54	0,50
16	VP2R	0,07764985	0,05998416	1,10	0,07	0,42	0,75	0,59
17	VPP1R	0,09097053	0,07021895	0,29	0,31	0,30	0,29	0,30
	coef var	0,09568535	0,06196215					
	Desv Est	0,01632566	0,02704636					

Tabla 29.

Selección combinatoria según promedio de CTF & IM.

#	COD	CTF	IM	CTF error	IM error	% Peso	% Peso	Promedio
		Promedio	Promedio			(0,34CTF y 0,66IM)	(0,34IM y 0,66CTF)	
1	CMB1	3454,14059	7084,43823	1,39	0,66	0,91	1,14	1,03
2	CMB2	2795,71	7029,16718	0,53	0,19	0,31	0,42	0,36
3	CMB3	2951,19394	6895,33967	0,08	0,93	0,64	0,36	0,50
4	CMB4	3725,95394	7210,82778	2,19	1,72	1,88	2,03	1,95
5	CMB5	2799,32594	7215,83861	0,52	1,76	1,34	0,94	1,14
6	CMB6	3170,71012	7066,54876	0,57	0,51	0,53	0,55	0,54
7	CMB7	3682,33276	7077,25869	2,06	0,60	1,09	1,56	1,33
8	CMB8	3062,78782	7064,65072	0,25	0,49	0,41	0,33	0,37
9	CMB9	2869,60612	7015,00387	0,31	0,08	0,16	0,23	0,19
10	CMB1--	2795,05294	6973,20544	0,53	0,27	0,36	0,44	0,40
11	CMB2--	2779,14312	6861,12644	0,58	1,21	1,00	0,79	0,90
12	CMB4--	2761,97265	6743,14435	0,63	2,20	1,67	1,16	1,41
13	CMB7--	2519,69065	6906,57906	1,33	0,83	1,00	1,16	1,08
14	DM1R	2823,12724	6997,07561	0,45	0,07	0,20	0,32	0,26
15	PBR	2875,73259	7038,75637	0,30	0,28	0,28	0,29	0,29
16	VP2R	2663,379	6914,00456	0,92	0,77	0,82	0,87	0,84
17	VPP1R	2877,21347	7007,72659	0,29	0,02	0,11	0,20	0,15
	PROMEDIO	2,98E+03	7,01E+03					
	Desv Est	342,55237	119,333223					

Tabla 30.

Selección combinatoria según coeficiente de variación de CTF & IM.

#	COD	CTF Promedio	IM Promedio	CTF error	IM error	% Peso (0,34CTF y 0,66IM)	% Peso (0,34IM y 0,66CTF)	Promedio
1	CMB1	0,20497525	0,03681963	0,95	0,85	0,88	0,92	0,90
2	CMB2	0,25139012	0,09899558	1,99	1,21	1,48	1,73	1,60
3	CMB3	0,19443503	0,12899863	0,71	2,21	1,70	1,22	1,46
4	CMB4	0,12880634	0,03206559	0,76	1,01	0,92	0,84	0,88
5	CMB5	0,11396913	0,02552942	1,09	1,22	1,18	1,14	1,16
6	CMB6	0,21143604	0,05000962	1,09	0,41	0,64	0,86	0,75
7	CMB7	0,17115408	0,05699349	0,19	0,18	0,18	0,19	0,19
8	CMB8	0,17976372	0,09174719	0,38	0,97	0,77	0,58	0,68
9	CMB9	0,18546817	0,04795756	0,51	0,48	0,49	0,50	0,50
10	CMB1--	0,10579552	0,04363749	1,27	0,62	0,84	1,05	0,95
11	CMB2--	0,13617683	0,08886538	0,59	0,88	0,78	0,69	0,74
12	CMB4--	0,12914971	0,11165227	0,75	1,63	1,33	1,05	1,19
13	CMB7--	0,10649895	0,05227461	1,26	0,34	0,65	0,94	0,80
14	DM1R	0,14821293	0,05506646	0,32	0,24	0,27	0,30	0,28
15	PBR	0,21754642	0,03942505	1,23	0,76	0,92	1,07	1,00
16	VP2R	0,1090575	0,05881248	1,20	0,12	0,49	0,83	0,66
17	VPP1R	0,17058884	0,04197539	0,18	0,68	0,51	0,35	0,43
	Coef Var	1,63E-01	6,24E-02					
	Desv Est	0,04459776	0,03015958					

Así pues, se obtiene un total de 5 combinatorias para realizar en las diferentes litologías seleccionadas.

Tabla 31.

Combinatorias seleccionadas para hacer los ensayos en rocas.

CRITERIO	COMBINATORIA SELECCIONADA
VALOR TEORICO E&H	CMB9
VALOR PROMEDIO E&H	CMB1--
VALOR COEFICIENTE DE VARIACION E&H	DM1R
VALOR PROMEDIO CTF & IM	VPP1R
VALOR COEFICIENTE DE VARIACION CTF&IM	CMB7

9. Selección de Litologías

Las litologías propuestas para la estandarización de parámetros son litologías tipo reservorio, es decir, areniscas, shale y calizas; se establece la disponibilidad de estas muestras en el inventario del laboratorio de mecánicas de rocas del ICP, encontrándose las siguientes muestras:

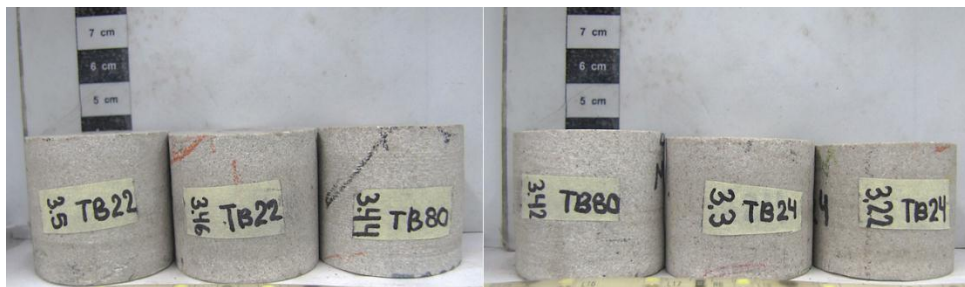


Figura 21. Areniscas de Tambor (mesa de los santos).

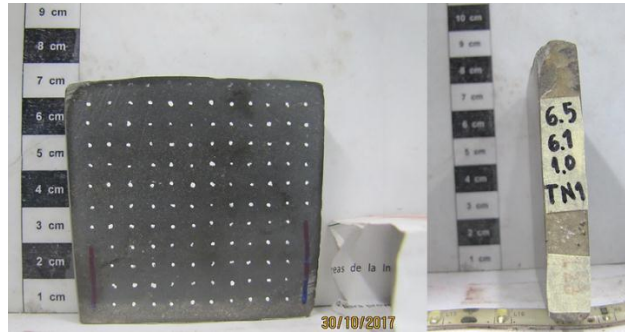


Figura 22. Calizas de Tetuán.

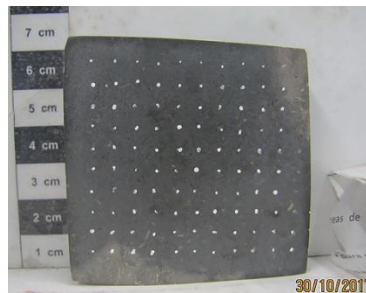


Figura 23. Shale de la Luna.

9.1 Preparación de muestras.

Las muestras de la Luna y Tetuán estaban en un estado óptimo para la elaboración de los ensayos de indentación, es decir el espesor era superior a diez veces la profundidad de la indentación y el ángulo entre el penetrador y la superficie de la muestra era inferior a 2° respecto a la perpendicular. Mayores cantidades de inclinación pueden producir una indentación no uniforme y resultados de prueba incorrectos; Como lo dice la norma ASTM (2012), E384-11^{E1}.

Las muestras de areniscas fueron divididas en dos plugs para maximizar el área disponible a ser indentada.

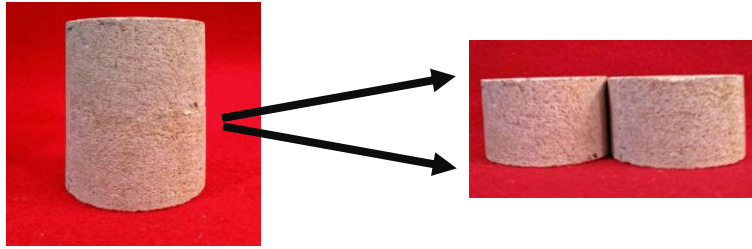


Figura 24. División de las muestras de Areniscas.

Luego de dividir las se pasaron por la pulidora de caras para homogenizar la superficie y lograr el paralelismo de las caras para evitar inclinaciones.



Figura 25. Pulidora de caras.

10. Pruebas Preliminares en Rocas.

Con las muestras en un estado apropiado para la indentación se procede a realizar unas pruebas preliminares variando el desplazamiento máximo del indentador para:

Verificar que la muestra mantenga su integridad, dado que la indentación es un ensayo de carácter no destructivo.

Analizar las curvas de la gráfica fuerza Vs desplazamiento e identificar si hay una transición de la zona elástica a la zona plástica, esto para determinar de forma precisa la fuerza crítica de transición (CTF) y la dureza superficial (H).

Dar prioridad a muestras con pequeños espesores (rippios).



Figura 26. Pruebas preliminares en rocas.

Se hizo un set de pruebas inicial en arenisca con desplazamientos máximos de 0.3-0.4 - 0.5 - 0.6 y 0.65 [mm]. Al evaluar la integridad de la muestra se observa que en los puntos 0.65 y 0.6 presenta una grieta así que estos valores se descartan para futuras pruebas en rocas. Los valores que presentan menor daño estructural en la muestra de arenisca son 0.3 y 0.4 [mm].

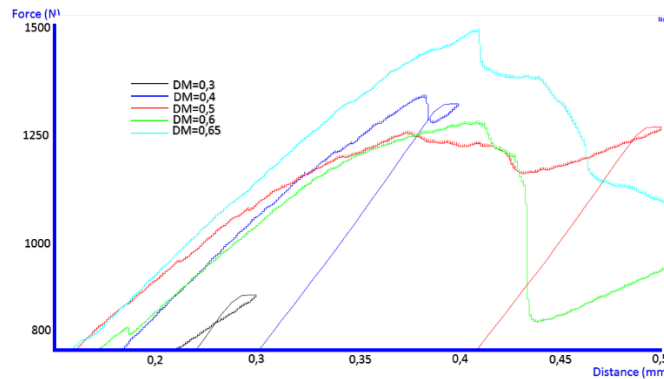


Figura 27. Carga Vs Desplazamiento para diferentes DM en arenisca.

De la figura 27 se puede evidenciar que en el intervalo de 0.3-0.4 [mm] hay una tendencia de cambio de pendiente, es decir, hay una transición de la zona elástica a la zona plástica.

Se opta por trabajar con 0.35 [mm] de desplazamiento máximo en areniscas ya que la afectación superficial de la muestra es mínima, permite leer sin problema el valor de fuerza crítica de transición y permite trabajar el tamaño de ripios (muestras con un espesor mínimo de 3.5 mm).

Para calizas se hicieron pruebas con desplazamientos máximo de 0.35 [mm] evidenciando daños superficiales aceptables, como se observa en la figura 26, además cambios de zona elástica a zona plástica en un rango de 0.28 a 0.33 [mm].



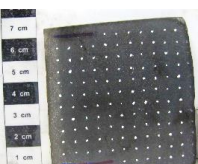
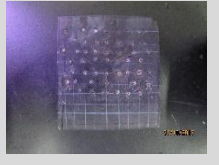
En Shale se hicieron pruebas con desplazamiento máximo de 0.35 [mm] pero se generó daño por foliación considerable en la superficie de la muestra, así que se decide disminuir el desplazamiento máximo a 0.25 [mm].

10.1 Diseño experimental.

Teniendo las combinatorias con mejores correlaciones respecto a la media y el valor teórico encontrado en literatura, ver tabla 31, se arma una matriz de cada litología con sus cinco combinatorias respectivas. Según los resultados obtenidos en las pruebas preliminares se le asigna su correspondiente desplazamiento máximo a cada una de las litologías y se procede a realizar los ensayos de indentación.

Tabla 32.

Matriz combinatorias rocas.

Muestra	Cod	Nombre	Litología	Nombre Muestra	Dimensiones Muestra [Cm]	Velocidad De Pre Prueba [Mm/S]	Velocidad De Prueba [Mm/S]	Velocidad De Post Prueba [Mm/S]	Desplazamiento Máximo [Mm]	Duración De La Prueba [S]
	ARN-CMB1--	Combinatoria 1 -- Arenisca	arenisca	Tambor 22	D= 3,8 H=3,5	0,1	0,5	1	0,35	Libre
	ARN-CMB9	Combinatoria 9 Arenisca	arenisca	Tambor 22	D= 3,8 H=3,46	2	2	1	0,35	Libre
	ARN-PB	Prueba Base Arenisca	arenisca	Tambor 80	D= 3,8 H=3,44	0,05	0,01	1	0,35	Libre
	ARN-VPP1R	Velocidad de Preprueba 1 Arenisca	arenisca	Tambor 80	D= 3,8 H=3,42	0,1	0,01	1	0,35	Libre
	ARN-CMB7	Combinatoria 7 Arenisca	arenisca	Tambor 24	D= 3,8 H=3,3	2	0,1	1	0,35	Libre
	CL-CMB1--	Combinatoria 1 -- Caliza	caliza	Tetuan-01	6,5*6,1*1,0	0,1	0,5	1	0,35	Libre
	CL-CMB9	Combinatoria 9 Caliza	caliza	Tetuan-01	6,5*6,1*1,0	2	2	1	0,35	Libre
	CL-PB	Prueba Base Caliza	caliza	Tetuan-01	6,5*6,1*1,0	0,05	0,01	1	0,35	Libre
	CL-VPP1R	Velocidad de Preprueba 1 Caliza	caliza	Tetuan-01	6,5*6,1*1,0	0,1	0,01	1	0,35	Libre
	CL-CMB7	Combinatoria 7 Caliza	caliza	Tetuan-01	6,5*6,1*1,0	2	0,1	1	0,35	Libre
	LN25-CMB1--	Combinatoria 1 -- Shale	shale	La luna - 04	6,5*5,4*0,6	0,1	0,5	1	0,25	Libre
	LN25-CMB9	Combinatoria 9 Shale	shale	La luna - 04	6,4*5,5*0,7	2	2	1	0,25	Libre
	LN25-PB	Prueba Base Shale	shale	La luna - 04	6,4*5,5*0,7	0,05	0,01	1	0,25	Libre
	LN25-CMB7	Velocidad de Preprueba 1 Shale	shale	La luna - 04	6,4*5,5*0,7	0,1	0,01	1	0,25	Libre
	LN25-VPP1R	Combinatoria 7 Shale	shale	La luna - 04	6,4*5,5*0,7	2	0,1	1	0,25	Libre

11. Análisis de Resultados.

En las tablas 33a y 33b se observan los resultados (Módulo de Young, módulo de indentación, dureza superficial y fuerza crítica de transición) obtenidos luego de realizar las cinco combinatorias (CMB1--, CMB7, CMB9, PB, VPP1R) en cada una de las litologías seleccionadas.

Tabla 33a.

Resultados fuerza crítica de transición y módulo de indentación para las tres litologías.

COD		Coef de Var	Variación	CTF			Coef de Var	Variación	IM		
				Desv Estd	Mediana	Promedio			Desv Estd	Mediana	Promedio
ARN	CMB1--	0,0605566	8397,845484	91,63976	1482,372933	1513,291798	0,047836	57128,3047	239,015	4985,59451	4996,591434
ARN	CMB7	0,0694853	12630,84019	112,387	1621,008962	1617,421665	0,04073	46070,79046	214,641	5334,9158	5269,897071
ARN	CMB9	0,1562579	81497,26849	285,4773	1796,230909	1826,962576	0,049447	61043,22195	247,069	4900,73317	4996,615152
ARN	PB	0,1029848	22650,4264	150,5006	1462,669351	1461,386182	0,073494	136538,1515	369,511	5139,14416	5027,794432
ARN	VPP1R	0,0295071	2403,746052	49,02801	1660,901381	1661,565203	0,025708	20225,56634	142,217	5546,76891	5531,908172
CL	CMB1--	0,0813421	4911,538426	70,08237	879,1453964	861,5760039	0,031072	14714,56269	121,304	3932,84117	3903,936018
CL	CMB7	0,0715971	3359,195603	57,95857	802,0576705	809,5104067	0,019584	5272,622021	72,6128	3700,77428	3707,698749
CL	CMB9	0,075363	5132,020876	71,63812	956,1766975	950,5740348	0,08549	112128,0012	334,855	3907,28063	3916,888988
CL	PB	0,08712	4906,07233	70,04336	794,8917056	803,9867389	0,029941	12921,61505	113,673	3793,05133	3796,59023
CL	VPP1R	0,1052315	6240,437629	78,99644	749,4470749	750,6917423	0,026802	9755,910483	98,772	3697,68016	3685,26132
LN25	CMB1--	0,1612674	12148,59389	110,2207	644,8127029	683,4651009	0,2254	682113,7331	825,902	4112,14632	3664,161195
LN25	CMB7	0,1859289	21872,64097	147,894	789,2943535	795,4333848	0,082991	94664,70659	307,676	3658,36075	3707,325163
LN25	CMB9	0,145667	14336,18138	119,7338	803,9535478	821,9690291	0,117255	219774,2187	468,801	4140,85252	3998,141457
LN25	PB	0,1633266	13698,87895	117,0422	698,5517969	716,6144096	0,060665	60776,69375	246,529	4103,84777	4063,788891
LN25	VPP1R	0,0886633	4135,588474	64,30854	709,5095164	725,3118132	0,022379	7226,744477	85,0103	3795,99296	3798,59842

Tabla 33b.

Resultados dureza superficial y módulo de Young para las tres litologías.

COD		E					H				
		Coef de Var	Variación	Desv Estd	Mediana	Promedio	Coef de Var	Variación	Desv Estd	Mediana	Promedio
ARN	CMB1--	0,0598097	1,81913E+16	1,35E+08	2240460414	2255071322	0,060557	1,12004E+16	1,1E+08	1711944720	1747651921
ARN	CMB7	0,0348766	6,0329E+15	77671763	2242510313	2227046021	0,069485	1,6846E+16	1,3E+08	1872051001	1867908147
ARN	CMB9	0,1328286	1,09348E+17	3,31E+08	2558634093	2489511009	0,156258	1,08695E+17	3,3E+08	2074409180	2109900192
ARN	PB	0,0749595	3,02501E+16	1,74E+08	2328053715	2320260657	0,102985	3,02093E+16	1,7E+08	1689189688	1687707798
ARN	VPP1R	0,0177161	1,96191E+15	44293482	2495138028	2500177185	0,029507	3,20592E+15	5,7E+07	1918121470	1918888097
CL	CMB1--	0,1013595	3,46024E+15	58823821	587803059,5	580348395,1	0,081342	6,55061E+15	8,1E+07	1015296681	995006356,5
CL	CMB7	0,09095	2,78024E+15	52728010	572981803,1	579747247	0,071597	4,48022E+15	6,7E+07	926270551	934877476,3
CL	CMB9	0,0684181	1,92812E+15	43910362	649885944,8	641794832,3	0,075363	6,84468E+15	8,3E+07	1104257648	1097787314
CL	PB	0,0799241	2,65629E+15	51539217	652903308,4	644852188,5	0,08712	6,54332E+15	8,1E+07	917994810	928498370,4
CL	VPP1R	0,0569734	1,30207E+15	36084162	642004559,8	633351162,6	0,105232	8,32299E+15	9,1E+07	865512270	866949696,6
LN25	CMB1--	0,1530273	3,34203E+15	57810323	360667775,2	377777771	0,161267	1,62028E+16	1,3E+08	744673407	789311815,3
LN25	CMB7	0,1868629	4,27374E+15	65373874	350967645,3	349849355,8	0,185929	2,9172E+16	1,7E+08	911530608	918620377,4
LN25	CMB9	0,1380441	2,8008E+15	52922586	392477683,6	383374548,7	0,145667	1,91204E+16	1,4E+08	928460039	949265537,7
LN25	PB	0,1600198	4,12965E+15	64262344	409835588,3	401589874,7	0,163327	1,82705E+16	1,4E+08	806734954	827594883,4
LN25	VPP1R	0,0777614	8,50398E+15	29161585	379661399,5	375013492,3	0,088663	5,51572E+15	7,4E+07	819389671	837639234,5

Con los resultados de las tablas 33a y 33b se procede a realizar el mismo tratamiento estadístico mostrado en el capítulo 8.

Para seleccionar cuál de los cinco parámetros es el óptimo, se recurre de nuevo al error estadístico; teniendo como valor nominal el valor promedio de los cinco ensayos de indentación realizados en cada litología.

$$Error = \frac{|valor\ nominal - X_i|}{\sigma}$$

Ecuación 7: Error estadístico.

Donde,

Valor nominal es el valor de referencia sobre el cual se compara los resultados.

X_i es cada uno de los datos que conforman la lista.

σ es la desviación estándar de la lista de datos.

Debido a que siempre se maneja una dupla de datos (CTF e IM; H y E) se debe tomar una decisión en conjunto, para esto se da un porcentaje de peso mayor a cada una de las variables (0,34 y 0,66) luego se saca el promedio del resultado esto garantiza homogeneidad en los resultados.

Tabla 34.

Selección combinatoria areniscas según E & H.

COD	E Promedio	H Promedio	E error	H error	% Peso (0,34E y 0,66H)	% Peso (0,34H y 0,66E)	Promedio
ARN CMB1-	2255071322	1747651921	0,80042606	0,72247317	0,77392208	0,75642945	0,76517577
ARN CMB7	2227046021	1867908147	1,01749366	0,0091065	0,67464202	0,44835995	0,56150099
ARN CMB9	2489511009	2109900192	1,01540667	1,48126696	1,17379917	1,27833822	1,22606869
ARN PB	2320260657	1687707798	0,29550759	1,0871437	0,56466387	0,74230701	0,65348544
ARN VPP1R	2500177185	1918888097	1,09802064	0,31924342	0,83323638	0,65847878	0,74585758

Para la muestra de arenisca de la formación Tambor, la combinatoria ARN-CMB7 es la que presenta menor dispersión de datos respecto la media muestral, tanto para la dupla Dureza superficial y módulo de Young, como para Fuerza Crítica de Transición y Módulo de Indentación.

Tabla 35.

Selección combinatoria areniscas según CTF & IM.

COD	CTF Promedio	IM Promedio	CTF error	IM error	% Peso (0,34CTF y 0,66IM)	% Peso (0,34IM y 0,66CTF)	Promedio
CMB1-							
ARN -	1513,2918	4996,59143	0,72247317	0,71433795	0,7197072	0,71788165	0,71879443
ARN CMB7	1617,42166	5269,89707	0,0091065	0,4479696	0,15831996	0,25680084	0,2075604
ARN CMB9	1826,96258	4996,61515	1,48126696	0,71423709	1,2204768	1,0483553	1,13441605
ARN PB	1461,38618	5027,79443	1,0871437	0,5816386	0,91527197	0,80183663	0,8585543
ARN VPP1R	1661,5652	5531,90817	0,31924342	1,56224404	0,74186363	1,02079297	0,8813283

Para las muestras de caliza de la formación Tetuán, como se evidencia en tabla 36 y 37, la combinatoria CL-PB presento la mejor correlación de datos respecto a la media muestral tanto para E & H como para IM & CTF.

Tabla 36.

Selección combinatoria caliza según E & H.

COD	E Promedio	H Promedio	E error	H error	% Peso (0,34E y 0,66H)	% Peso (0,34H y 0,66E)	Promedio
CL CMB1--	580348395	995006356	1,07744053	0,34859309	0,8296324	0,66607904	0,74785572
CL CMB7	579747247	934877476	1,0955985	0,34129427	0,83913506	0,66986919	0,75450212
CL CMB9	641794832	1097787314	0,7785784	1,5278481	1,0333301	1,20146622	1,11739816
CL PB	644852188	928498370	0,8709273	0,4144848	0,71573685	0,61331115	0,664524
CL VPP1R	633351163	866949697	0,52353333	1,12066213	0,72655712	0,86055282	0,79355497

Tabla 37.

Selección combinatoria caliza según CTF & IM.

COD	CTF Promedio	IM Promedio	CTF error	IM error	% Peso (0,34CTF y 0,66IM)	% Peso (0,34IM y 0,66CTF)	Promedio
CMB1-							
CL -	861,576004	3903,93602	0,34859309	0,94841295	0,55253184	0,68713142	0,61983163
CL CMB7	809,510407	3707,69875	0,34129427	0,87872448	0,52402054	0,64461988	0,58432021
CL CMB9	950,574035	3916,88899	1,5278481	1,06901622	1,37184526	1,26888339	1,32036433
CL PB	803,986739	3796,59023	0,4144848	0,05106849	0,29092325	0,20937263	0,25014794
CL VPP1R	750,691742	3685,26132	1,12066213	1,0876362	1,10943331	1,10202229	1,1057278

Para Shale de la formación la Luna la combinatoria que presento mejor correlación de datos respecto a la media muestral tanto para E & H como para IM & CTF fue VPP1R.

Tabla 38.

Selección combinatoria Shale según E & H.

COD	E Promedio	H Promedio	E error	H error	% Peso (0,34E y 0,66H)	% Peso (0,34H y 0,66E)	Promedio
CMB1-							
LN -	377777771	789311815	0,01379542	1,12530447	0,3917085	0,64113113	0,51641981
LN CMB7	349849356	918620377	1,48675226	0,81034389	1,25677341	1,10498737	1,18088039
LN CMB9	383374549	949265538	0,31450106	1,26907805	0,63905723	0,85326431	0,74616077
LN PB	401589875	827594883	1,29318048	0,55223679	1,04125962	0,87499186	0,95812574
LN VPP1R	377521009	864486370	0,13472471	0,40188068	0,22555774	0,28550754	0,25553264

Tabla 39.

Selección combinatoria Shale según CTF & IM.

COD	CTF	IM	CTF error	IM error	% Peso (0,34CTF y 0,66IM)	% Peso (0,34IM y 0,66CTF)	Promedio
	Promedio	Promedio					
CMB1-							
LN -	683,465101	3664,16119	1,12530447	1,03041612	1,09304243	1,07174948	1,08239596
LN CMB7	795,433385	3707,32516	0,81034389	0,78636211	0,80219009	0,79680858	0,79949933
LN CMB9	821,969029	3998,14146	1,26907805	0,85794642	1,12929329	1,03703536	1,08316432
LN PB	716,61441	4063,78889	0,55223679	1,22912451	0,78237861	0,93427222	0,85832541
LN VPP1R	725,311813	3798,59842	0,40188068	0,2702927	0,35714077	0,32761242	0,34237659

11.1 Resultados finales.

Según los resultados analizados en el capítulo anterior se obtiene un compilado de los parámetros óptimos para arenisca, shale, caliza y vidrio.

En el vidrio se observó que fue la combinatoria CMB9 la que arrojó resultados más cercanos al valor teórico encontrado en literatura.

En arenisca, shale y caliza las combinatorias seleccionadas, además de presentar la mejor correlación de datos respecto a la media muestral también presentan coeficientes de varianza inferiores al 9%.

Tabla 40.

Parámetros óptimos para arenisca, shale y vidrio.

PARAMETROS ÓPTIMOS							
Tipo de Muestra	COD	Parámetro a Estudiar	Variables Independientes				
			Velocidad de Preprueba [mm/s]	Velocidad de Prueba [mm/s]	Velocidad de Pos prueba [mm/s]	Desplazamiento Máximo [mm]	Duración de la Prueba [s]
ARENISCA	CMB7 ARN	COMBINATORIA 7	2	0,1	1	0,35	LIBRE
CALIZA	PB CL	PRUEBA BASE	0,5	0,01	1	0,35	LIBRE
SHALE	VPP1R SH	VELOCIDAD DE PREPRUEBA REPETIDA	0,1	0,01	1	0,25	LIBRE
VIDRIO	CMB9 VD	COMBINATORIA 9	2	2	1	0,65	LIBRE

Tabla 41.

Coefficientes de variación de los parámetros óptimos.

Tipo de muestra	Cod	Parámetro a estudiar	Coeficiente de variación (%)			
			Fuerza crítica de transición	Módulo de indentación	Módulo de Young	Dureza superficial
Arenisca	CMB7 ARN	Combinatoria 7	6,95%	4,07%	3,49%	6,95%
Caliza	PB CL	Prueba base	8,71%	2,99%	7,99%	8,71%
Shale	VPP1R SH	Velocidad de preprueba repetida	8,87%	2,24%	7,78%	8,87%
Vidrio	CMB9 VD	Combinatoria 9	19,55%	4,80%	5,59%	9,09%

12. Conclusiones

El 53% de los vidrios que se ensayaron utilizando una velocidad de prueba de 2 [mm/sec] en el análisis de sensibilidad, sufrieron daños superficiales mínimos; es decir, no presentaron pérdida de contingencia, lo que indica a mayor velocidad de prueba, menor va a ser la afectación superficial de la muestra.

Las variables críticas del ensayo, según el análisis de sensibilidad son: Velocidad de preprueba, velocidad de prueba y desplazamiento máximo del indentador. La velocidad de preprueba es la velocidad que lleva el indentador cuando toca la muestra, si es mayor a 2 [mm/sec] el impacto originado genera micro fracturas debilitando la integridad de la muestra; la velocidad de prueba es la velocidad con la que el indentador penetra la muestra, a mayor velocidad menor exactitud de datos debido a que hay una captación máxima de 200 puntos por segundo, por último, el desplazamiento máximo va ligado al parámetro fuerza crítica de transición (CTF), pues en la gráfica fuerza vs desplazamiento se debe garantizar un desplazamiento máximo, tal que haya un cambio de la zona elástica a la zona plástica y el espesor de la muestra ensayada debe ser mínimo diez veces el desplazamiento máximo; si este es superior al requerido genera daños superficiales innecesarios.

El espesor de la muestra y la superficie sobre la cual reposa el analizador de texturas son variables dependientes que afectan el valor de las variables respuesta; una superficie que contribuya a maximizar las vibraciones producidas por el equipo, como una mesa metálica, producen un sesgo en el resultado, originando un error sistemático. El módulo de Young y la dureza superficial son sensibles al espesor del material, en muestras delgadas los resultados están más separados del valor nominal que los resultados obtenidos en muestras de vidrio grueso.

El desplazamiento máximo es un parámetro crítico en shale; al ser una litología de carácter laminar; muestra exfoliación superficial cuando el desplazamiento es mayor a 0,25 [mm].

En arenisca se obtuvo una mejora respecto a la dispersión y exactitud de los resultados obtenidos, utilizando la combinatoria de parámetros nombrada en esta investigación como CMB7, respecto a la combinatoria de parámetros utilizada tradicionalmente, prueba base (PB), pasando de un coeficiente de variación para módulo de Young de 7,5% a un coeficiente de variación de 3,5%; también presenta mejor correlación de datos respecto a la media muestral.

En shale se obtuvo una mejora respecto a la dispersión y exactitud de los resultados obtenidos, utilizando la combinatoria de parámetros nombrada en esta investigación como VPP1R, respecto a la combinatoria de parámetros utilizada tradicionalmente, prueba base (PB), pasando de un coeficiente de variación para módulo de Young de 16% a un coeficiente de variación de 7,7%; también presenta mejor correlación de datos respecto a la media muestral.

En caliza el parámetro que presenta mejor coeficiente de variación y exactitud respecto a la media muestral, es la combinatoria utilizada tradicionalmente, prueba base (PB), presentando un coeficiente de variación del 5,7%. Además, prueba base, presenta la mejor correlación de datos respecto a la media muestral.

13. Recomendaciones

La preparación de las muestras a indentar debe ser rigurosa, el ángulo de la superficie respecto a la perpendicular no puede exceder los 2° de inclinación, la muestra debe estar perfectamente pulida y no es recomendable realizar indentaciones en zonas heterogéneas de la muestra; lo anterior para garantizar homogeneidad y exactitud en los resultados.

Debe darse un tratamiento individual a la selección de los intervalos en las gráficas Fuerza Vs Desplazamiento y Stress Vs Strain, para determinar módulo de indentación y módulo de Young respectivamente, esto con el fin de minimizar los errores originados por el operador.

Dada la estandarización de los parámetros operacionales del equipo, analizador de texturas y obteniendo un coeficiente de variación máxima de 8,87%, se recomienda desarrollar un trabajo de investigación donde se determine un factor de corrección, entre los valores de Módulo Young y dureza superficial obtenidos por pruebas índice (indentación) y los obtenidos por ensayos convencionales (pruebas triaxiales).

Se recomienda utilizar el software Exponent en equipos cuyo sistema operativo sea Windows 7, puesto que presenta incompatibilidad con otros sistemas operativos; cuando se estén realizando las indentaciones es recomendable guardar los archivos cada 10 pruebas, para evitar llenar la memoria virtual del equipo y generar un reinicio forzado.

Referencias Bibliográficas

- ASTM International. (2012). *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*. United States: ASTM International, A Summary of Changes Section appears at the end of this standard.
- Calderón, & Zuly. (2011). *Introducción a la Mecánica de Rocas*. Bucaramanga, Colombia: División de Publicaciones UIS.
- Corzo, R., & Rincón, C. (2004). *Medición y evaluaciones de la Magnitud y dirección de los esfuerzos IN-SITU en campo*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Tesis de Grado: optar al título de Ingeniero de Petróleos y Geólogo.
- Ecopetrol S.A. y Carvajal, J. (2017). *Instructivo para Ensayo de Identación en Rocas*. Bucaramanga: Centro de Innovación y Tecnología, Instituto Colombiano del Petróleo.
- Ferré, J., & Rius, X. (2002). *Introducción al Diseño Estadístico de Experimentos*. Obtenido de Universitat Rovira i Virgili: Departamento de Química Analítica y Química Orgánica: <http://www.quimica.urv.es/quimio/general/dis.pdf>
- García, R. (2008). *Desarrollo de Correlaciones Experimentales a partir de parámetros de indentación para la obtención de la resistencia compresiva uniaxial (UCS) en muestras de Shale*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Tesis de grado: optar el título de Ingeniero de Petróleo.
- Hernández, D. (2013). *Metodología para correlacionar propiedades elásticas de rocas Shale, medidas en diferentes escalas de observación*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Tesis de Grado: Optar al título de Ingeniero de Petróleos.

- Liceo Marta Donoso Espejo. (2016). *Diagrama de Caja y Bigotes*. Talca, Chile: Instituto de Matemática y Física.
- Llopis, J. (28 de Enero de 2013). *Test HSD de Tukey*. Obtenido de La Estadística: una orquesta hecha instrumento: <https://estadisticaorquestainstrumento.wordpress.com/2013/01/28/test-hsd-de-tukey/>
- Martínez, D. (2012). *Desarrollo de Correlaciones entre el módulo de indentación y ángulo de fricción interno en material rocoso*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Tesis de Grado: optar al título de Ingeniera Civil.
- Mateus, J. (2005). *Obtención de la Resistencia comprensiva uniaxial (UCS) de las rocas a partir de mediciones sobre ripios de perforación*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Tesis de Grado: optar al título de Ingeniero Civil.
- Meza, J. (2004). *Técnicas de Indentación Aplicadas al Estudio de Propiedades Mecánicas de Recubrimientos Cerámicos de Nitruro de Titanio*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Tesis de Grado: Título de Magíster en Ingeniería de Materiales (Ms.C).
- Montgomery, D. (2006). *Diseño y Análisis de Experimentos*. Limusa, 2 Ed.
- Muñoz, C. (2016). *Estimación experimental de la resistencia en la fractura en rocas por un método indirecto*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Tesis de Grado: Título a obtener Ingeniero de Petróleos.
- Murillo, F., & Martínez, C. (2014). *Análisis de Varianza* (Vols. 12, No. 1). Revista Iberoamericana sobre Calidad, Eficacia y Cambio en Educación.
- Pearson, C. (2009). *Manual del Vidrio Plano*. Argentina: CAVIPLAN, Cámara del Vidrio Plano y sus Manufacturas de la República Argentina.
- Pérez, G., Puentes, J., & Sierra, C. (Agosto de 2015). *Estratigrafía y Petrofacies de la Formación La Luna en el Sinclinal de Nuevo Mundo, Valle Medio del Magdalena*.

Recuperado el 2017, de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/288668481_Estratigrafia_y_Petrofacies_de_la_Formacion_La_Luna_en_el_Sinclinal_de_Nuevo_Mundo_Valle_Medio_del_Magdalena?enrichId=rgreq-7535c25abce9782466a3ffd2db781fc7-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4ODY2ODQ4MTtBUz

Pérez, M., Calderón, & Zuly. (2011). *Orientaciones prácticas para la elaboración exitosa de trabajos de grado en ingeniería*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Revistas UIS, Boletín de Geología. (1963). *Boletín de Geología Número 12*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Runger, G., & Montgomery, D. (2012). *Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería*. México D.F.: Mc Graw Hill. 2da Edición.

Sanabria, N., & Trespacios, J. (2010). *Evaluación de la Calidad de Reservorio de las Calizas de Tetuán, Grupo Villeta en los Campos Dina y Tenay de la Subcuenca de Neiva, VSM*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Trabajo de Grado: Título de Geólogo.

Torres, M. (2006). *Análisis del Efecto de Interacción entre el Lodo de Perforación y los Shales, en las medidas de Módulo de identificación IM y Fuerza Crítica de transición CTF, obtenidas de la Prueba de Identación*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Tesis de Grado: Ingeniera Civil.

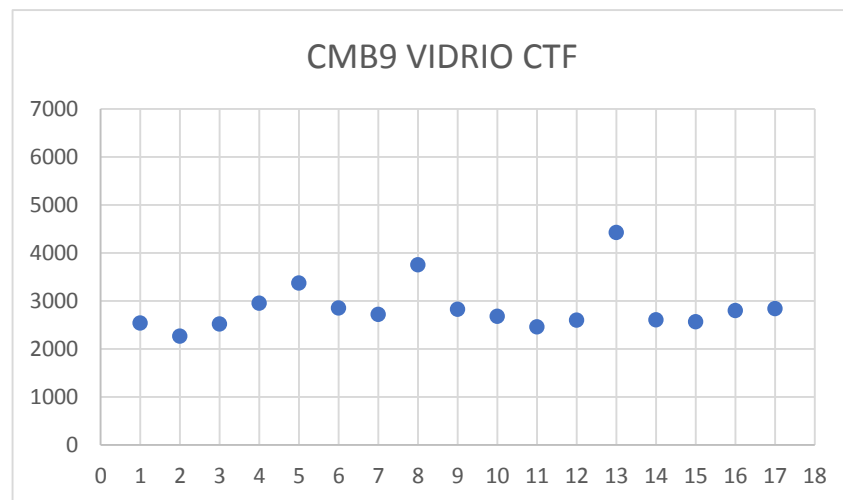
Universidad Nacional de la Pampa. (2011). *Conocimiento de los Materiales: Apuntes de Dureza*. Obtenido de Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de la Pampa: <http://190.105.160.51/~material/materiales/presentaciones/ApuntesDureza.pdf>

Apéndices

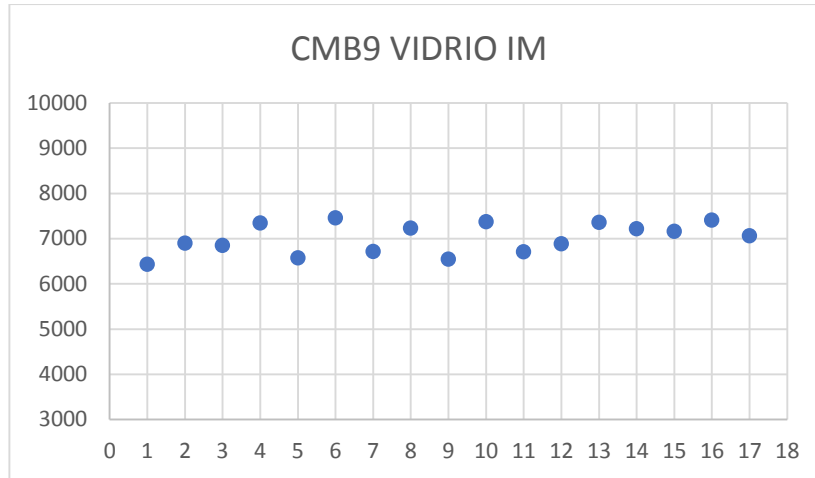
Apéndice A. Familia de Gráficas CMB9 en Vidrio.

Data CTF, IM, H y E en vidrio CMB9.

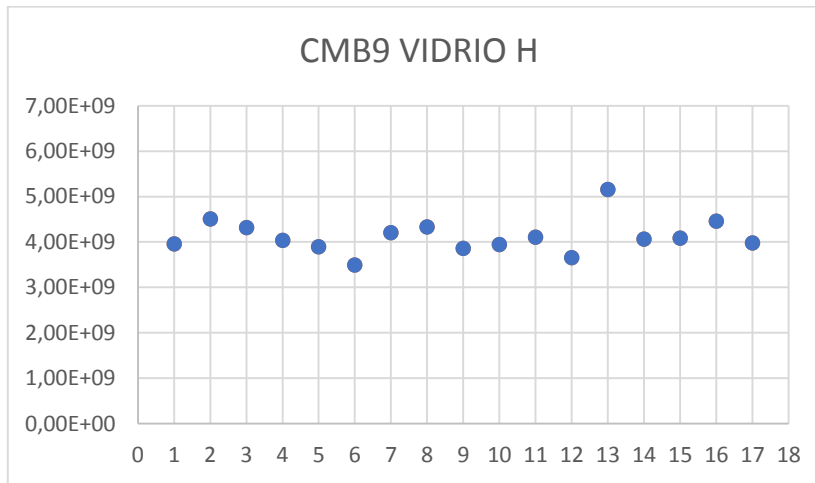
CMB9 VIDRIO			
CTF	IM	H	E
2539,9	6434,86755	3,96E+09	7,8327E+10
2266,059	6902,79619	4,51E+09	7,7924E+10
2520,05	6850,1393	4,32E+09	7,8033E+10
2953,201	7345,58122	4,04E+09	8,367E+10
3372,427	6576,75056	3,89E+09	7,2332E+10
2851,478	7462,63371	3,50E+09	8,5362E+10
2723,213	6718,84654	4,21E+09	7,4334E+10
3751,907	7230,79836	4,33E+09	8,2415E+10
2828,243	6547,85507	3,86E+09	7,3266E+10
2678,762	7375,76255	3,94E+09	8,4006E+10
2457,689	6707,34871	4,11E+09	7,4021E+10
2599,462	6888,49182	3,66E+09	7,8728E+10
4428,07	7356,73654	5,16E+09	8,3836E+10
2607,373	7221,98332	4,06E+09	8,141E+10
2565,032	7160,40514	4,09E+09	8,0326E+10
2798,552	7410,47818	4,46E+09	8,7255E+10
2841,886	7063,59105	3,98E+09	7,9044E+10



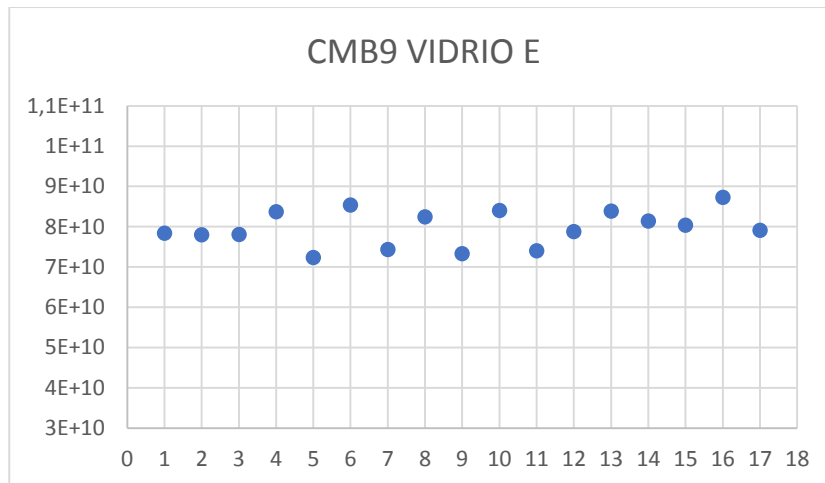
Dispersión para CTF en vidrio CMB9.



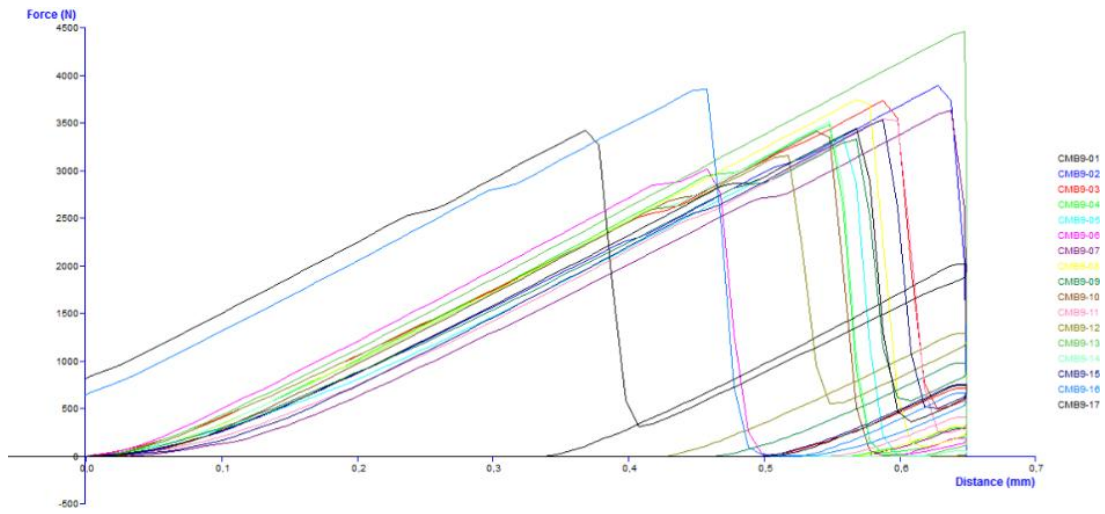
Dispersión para IM en vidrio CMB9.



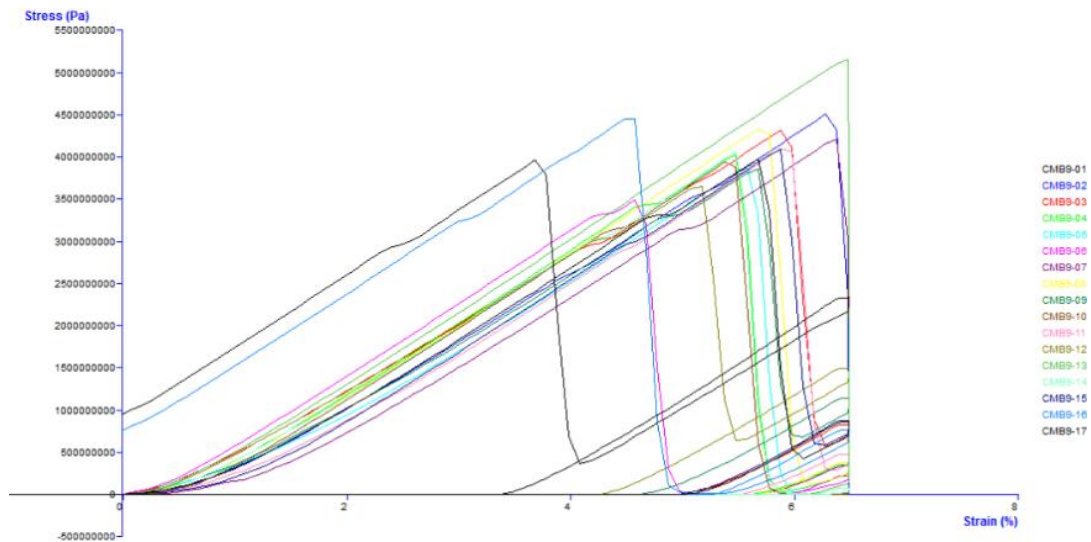
Dispersión para H en vidrio CMB9.



Dispersión para E en vidrio CMB9.



Fuerza vs Desplazamiento de CMB9 para vidrio.

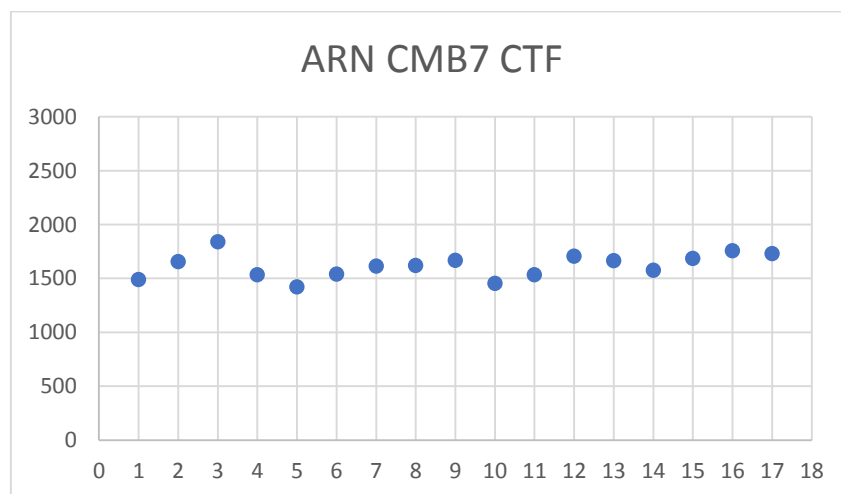


Stress vs Strain de CMB9 para vidrio.

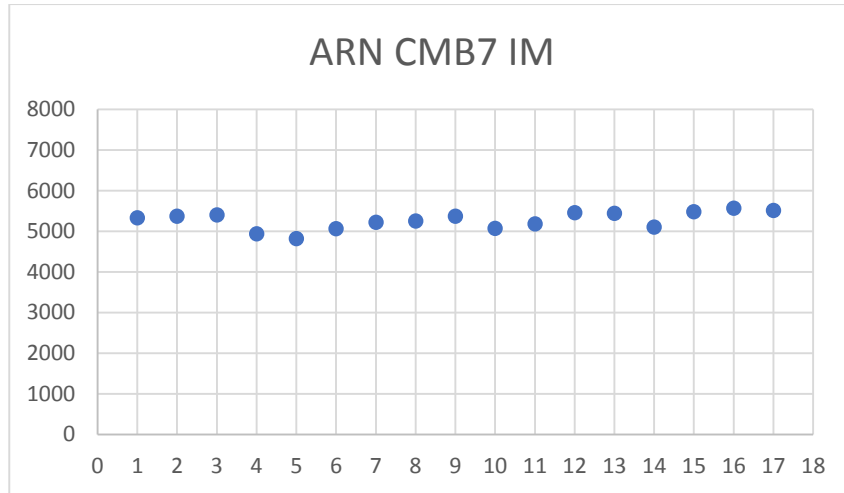
Apéndice B. Familia de Gráficas CMB7 en Arenisca.

Data CTF, IM, H y E en arenisca CMB7.

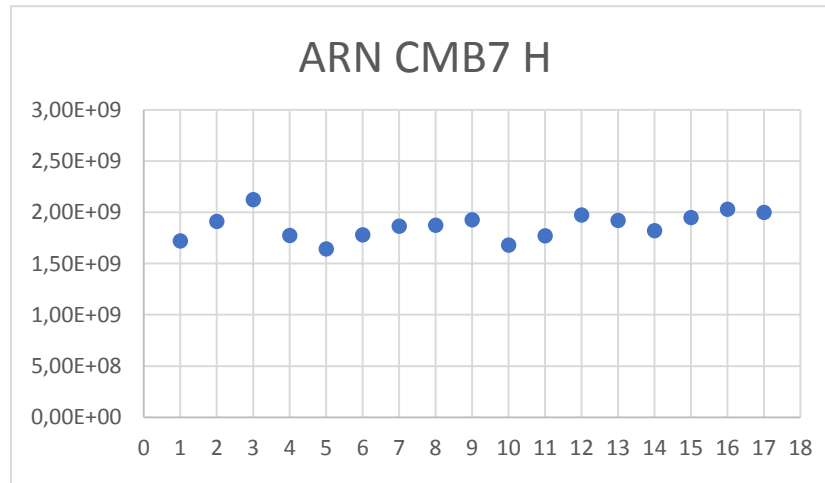
ARN CMB7			
CTF	IM	E	H
1490,15957	5334,9158	2,24E+09	1,72E+09
1655,12347	5371,29223	2,26E+09	1,91E+09
1839,49754	5405,83125	2,29E+09	2,12E+09
1535,43493	4936,21035	2,13E+09	1,77E+09
1422,24654	4817,21233	2,05E+09	1,64E+09
1541,30312	5066,29486	2,13E+09	1,78E+09
1614,14769	5223,2316	2,20E+09	1,86E+09
1621,00896	5250,22676	2,22E+09	1,87E+09
1667,28868	5368,28215	2,26E+09	1,93E+09
1455,06327	5069,26853	2,18E+09	1,68E+09
1533,93403	5182,39251	2,19E+09	1,77E+09
1707,29395	5456,34585	2,28E+09	1,97E+09
1663,76777	5443,11948	2,27E+09	1,92E+09
1576,81697	5101,35896	2,20E+09	1,82E+09
1686,75528	5478,91411	2,28E+09	1,95E+09
1757,41056	5570,64374	2,35E+09	2,03E+09
1728,91598	5512,70971	2,34E+09	2,00E+09



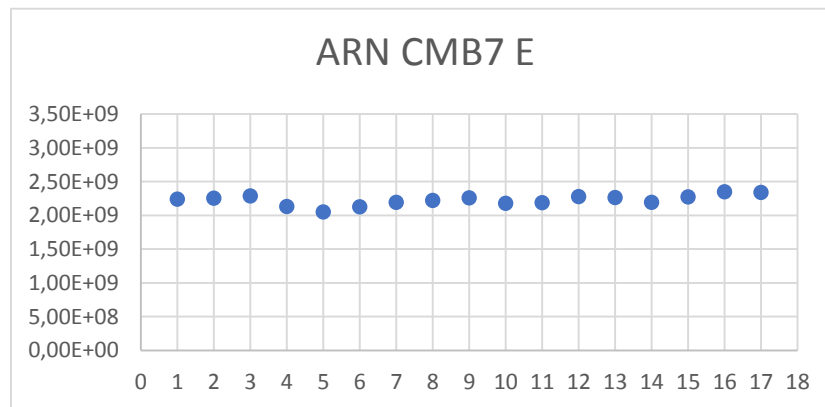
Dispersión para CTF en arenisca CMB7.



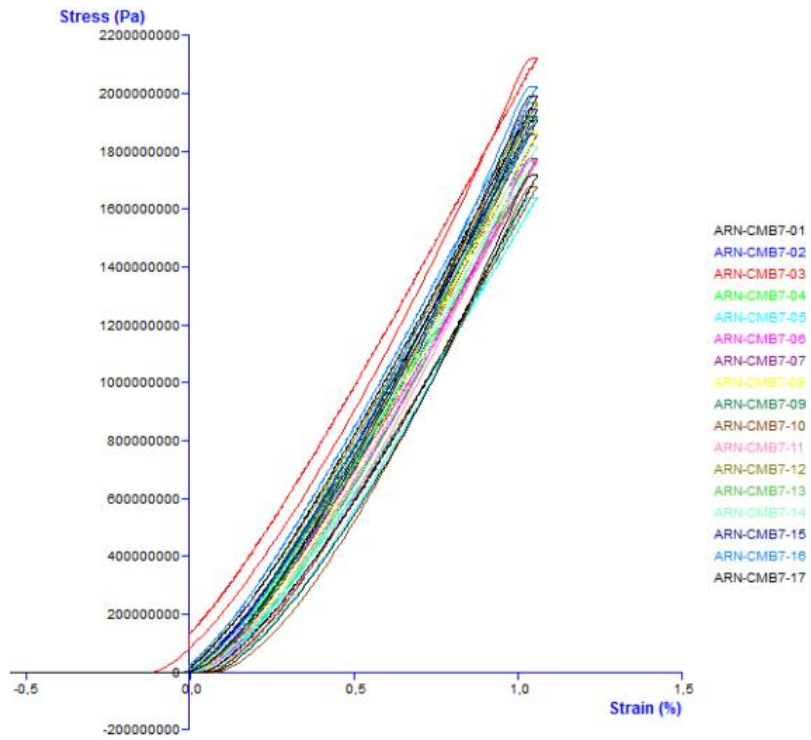
Dispersión para IM en arenisca CMB7.



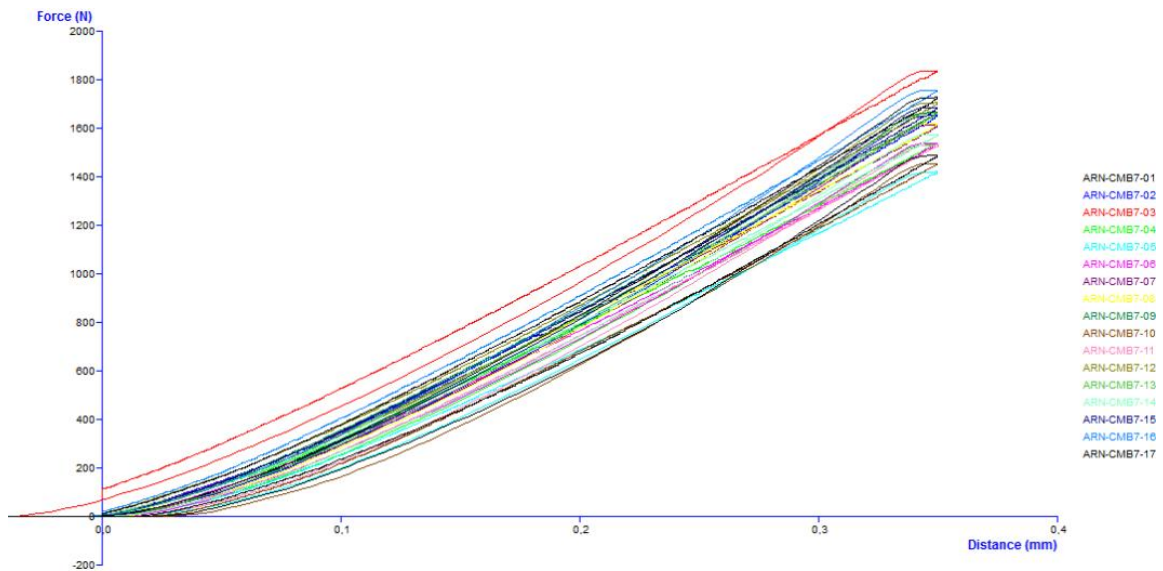
Dispersión para H en arenisca CMB7.



Dispersión para E en arenisca CMB7.



Stress vs Strain para arenisca CMB7.

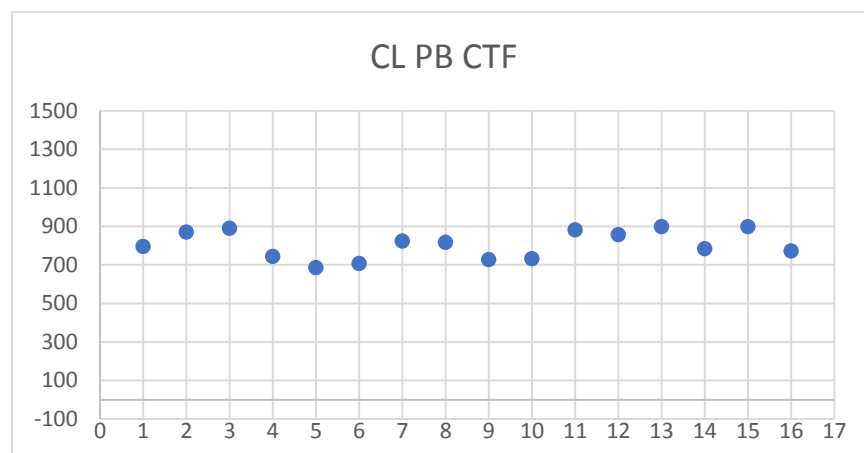


Fuerza vs Desplazamiento para arenisca CMB7.

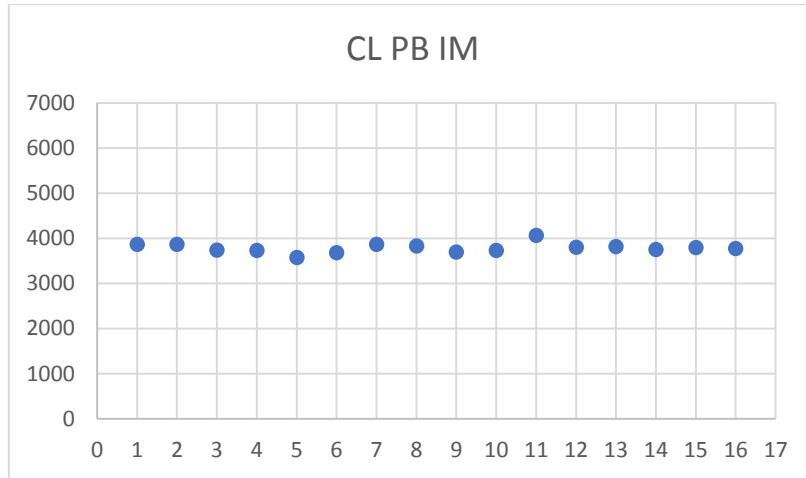
Apéndice C. Familia de Gráficas PB en Caliza.

Data CTF, IM, H y E en caliza PB.

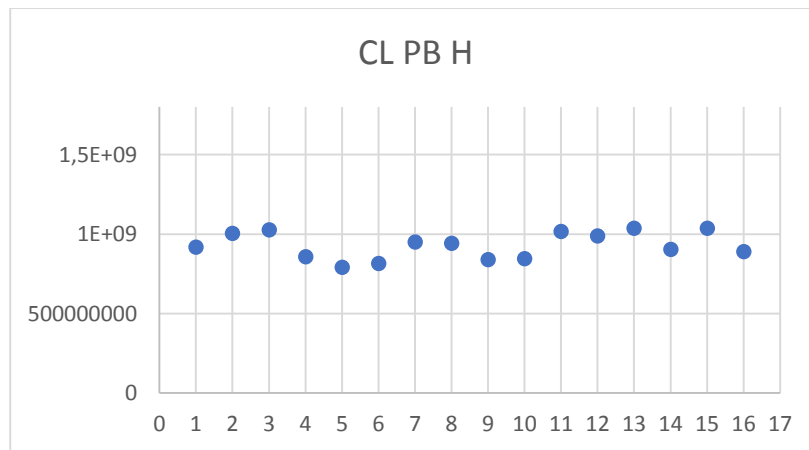
CL PB			
CTF	IM	E	H
794,891706	3862,03188	6,0838E+08	9,1799E+08
869,824	3866,12058	6,7456E+08	1,0045E+09
889,764566	3736,26334	5,1046E+08	1,0276E+09
743,127484	3733,0329	6,8986E+08	8,5821E+08
686,149599	3575,66344	6,9536E+08	7,9241E+08
706,631846	3677,842	5,5773E+08	8,1607E+08
822,934891	3863,11988	6,4124E+08	9,5038E+08
817,472959	3831,05297	6,8501E+08	9,4407E+08
727,317221	3693,53304	6,9083E+08	8,3996E+08
732,169764	3731,78531	6,4684E+08	8,4556E+08
880,894569	4064,15227	6,5290E+08	1,0173E+09
855,977324	3800,9953	6,2463E+08	9,8854E+08
898,10417	3815,68001	6,0326E+08	1,0372E+09
784,091976	3752,22592	6,6635E+08	9,0552E+08
898,465289	3793,05133	6,4167E+08	1,0376E+09
772,005758	3770,14157	6,7838E+08	8,9156E+08
787,95144	3975,34215	6,9502E+08	9,0998E+08



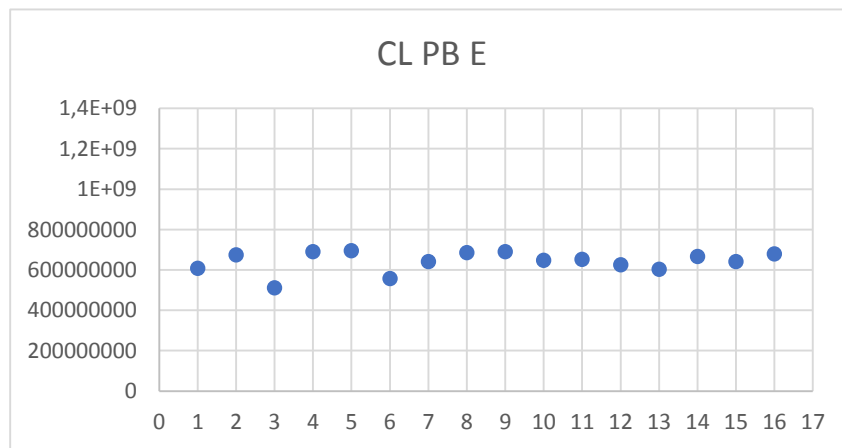
Dispersión para CTF en caliza PB.



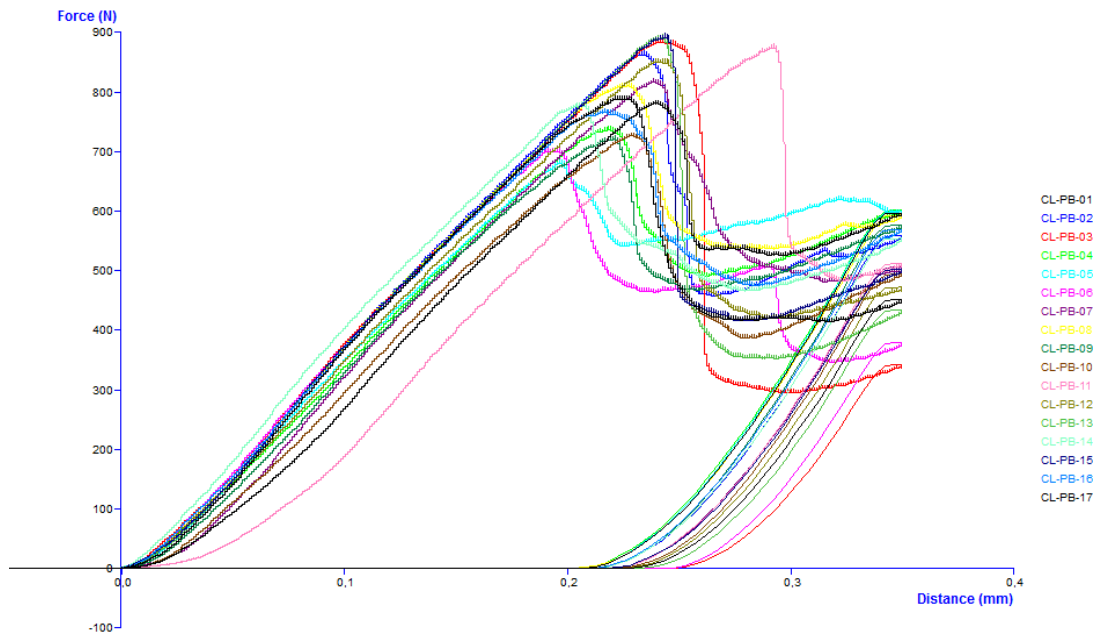
Dispersión para IM en caliza PB.



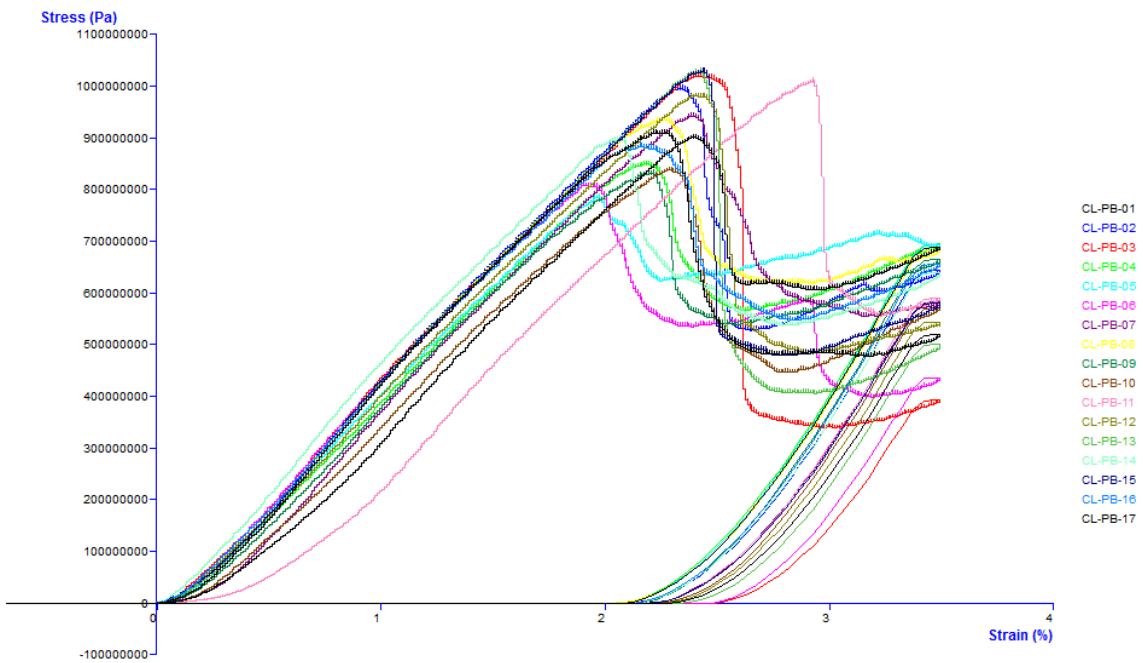
Dispersión para H en caliza PB.



Dispersión para E en caliza PB.



Fuerza vs Desplazamiento para caliza PB.

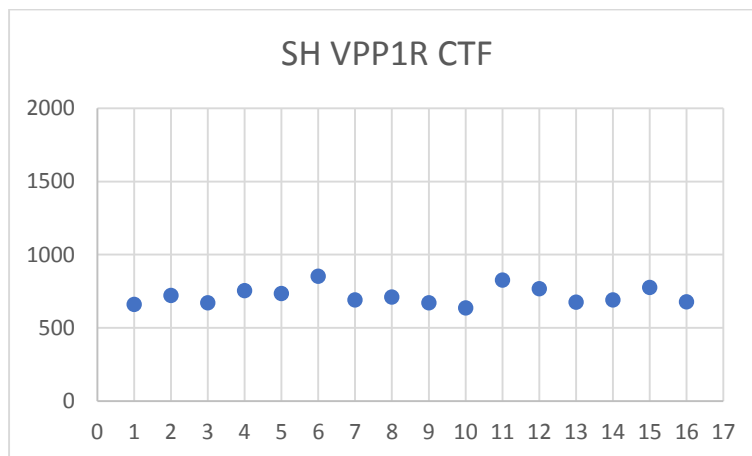


Stress vs Strain para caliza PB.

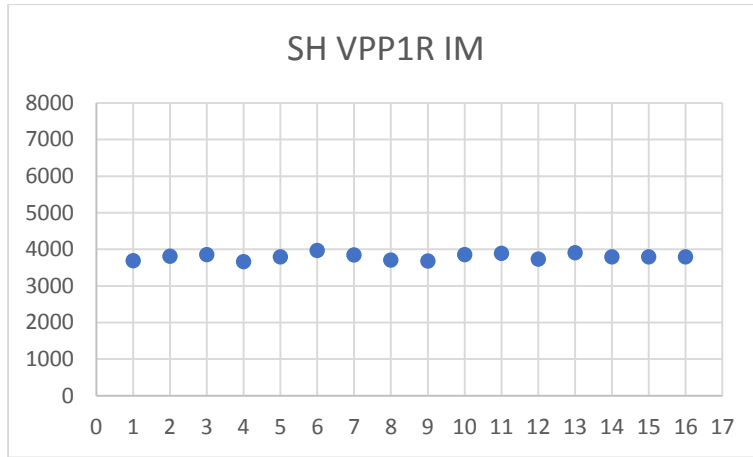
Apéndice D. Familia de Gráficas VPP1R en Shale.

Data CTF, IM, H y E en Shale VPP1R.

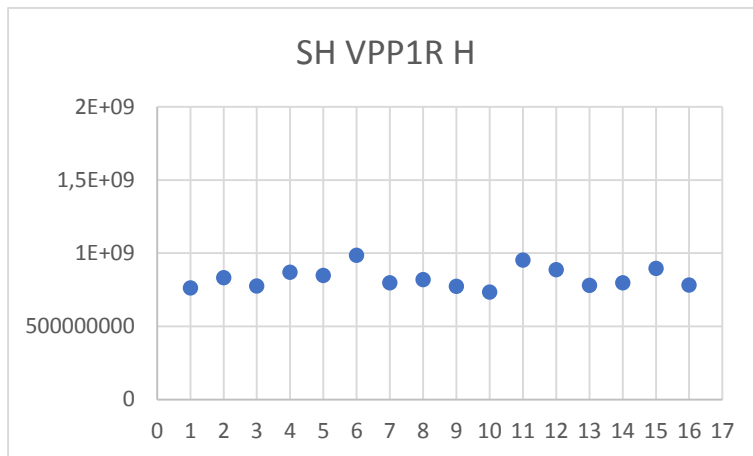
SH VPP1R			
CTF	IM	E	H
660,070001	3683,48719	3,8564E+08	7,6229E+08
720,97506	3813,63292	3,7947E+08	8,3263E+08
671,061576	3857,92807	3,3638E+08	7,7499E+08
753,408104	3658,72852	3,6039E+08	8,7009E+08
733,715807	3795,99296	3,5626E+08	8,4734E+08
852,569259	3966,64826	3,3694E+08	9,8460E+08
690,167054	3848,04063	3,8243E+08	7,9705E+08
709,509516	3706,2909	3,7985E+08	8,1939E+08
670,350622	3681,71912	3,3700E+08	7,7417E+08
636,010415	3851,13416	3,7687E+08	7,3451E+08
824,447079	3884,97741	3,8453E+08	9,5213E+08
767,29992	3733,08592	3,3961E+08	8,8613E+08
675,16931	3905,02238	4,2570E+08	7,7973E+08
690,663593	3794,41101	4,1411E+08	7,9763E+08
775,526673	3791,59058	3,8471E+08	8,9563E+08
677,561727	3790,1553	4,2032E+08	7,8249E+08
821,795108	3813,3278	3,7501E+08	9,4906E+08



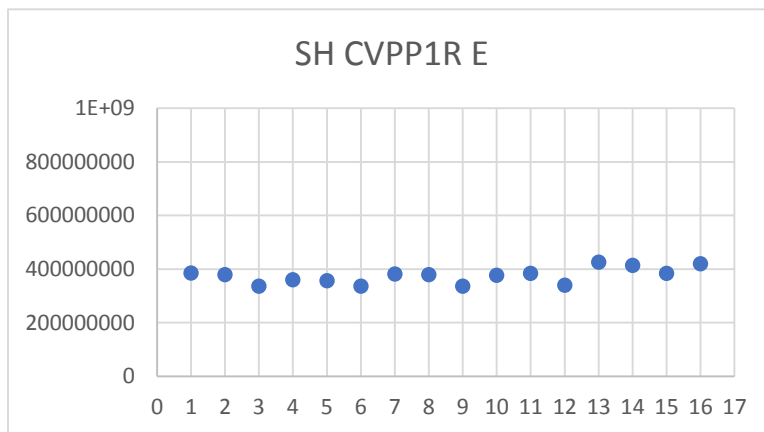
Dispersión para CTF en Shale VPP1R.



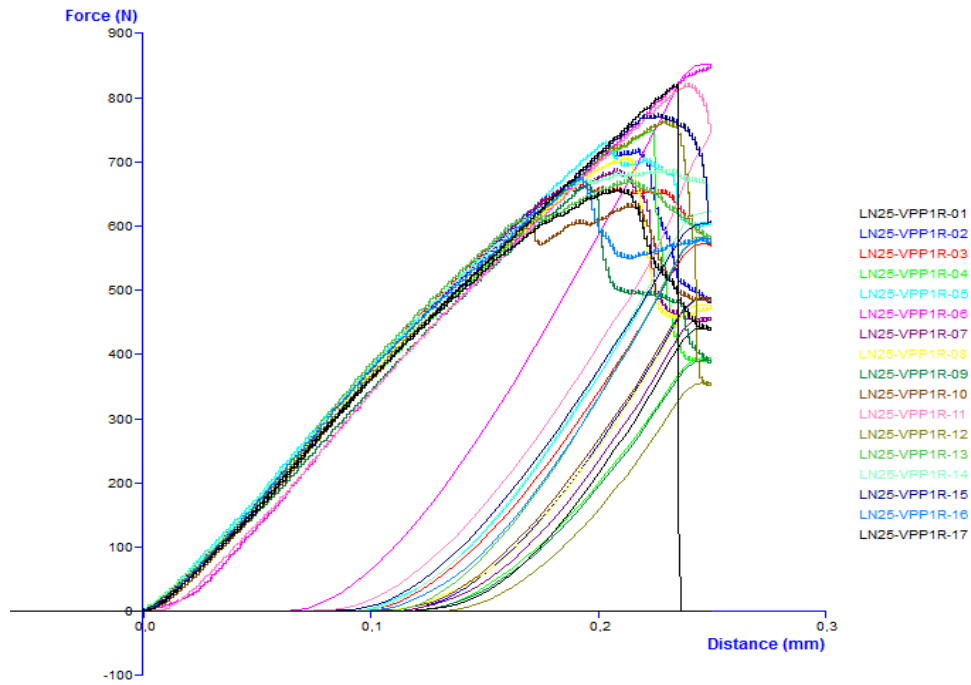
Dispersión para IM en Shale VPP1R.



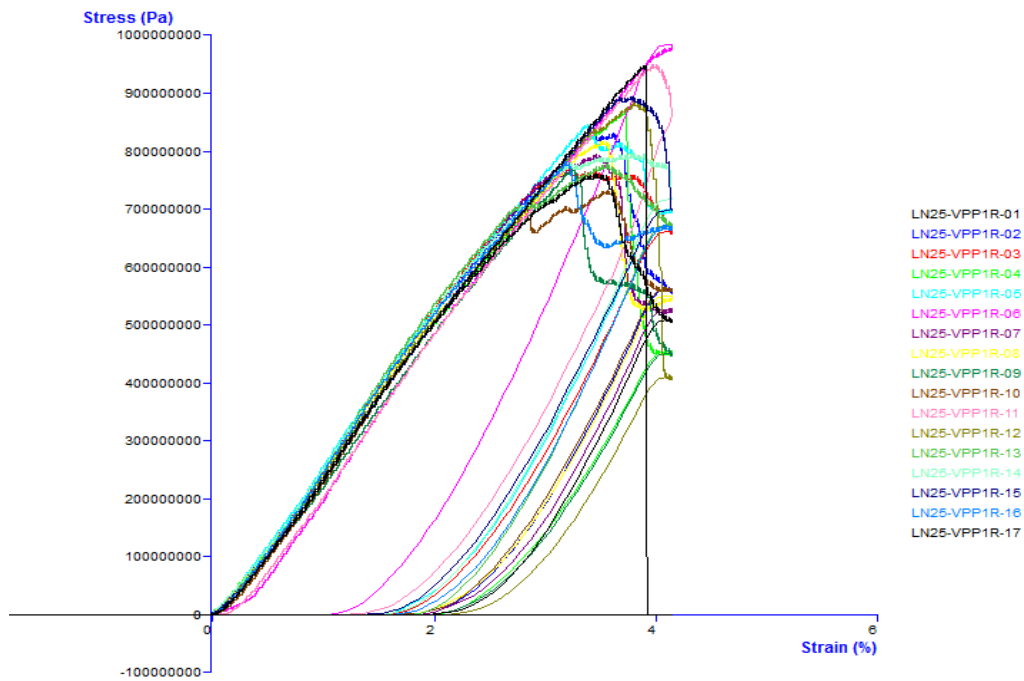
Dispersión para H en Shale VPP1R.



Dispersión para E en Shale VPP1R.



Fuerza vs Desplazamiento para Shale VPP1R.



Stress vs Strain para Shale VPP1R.