

**HERRAMIENTA SOFTWARE PARA AUTOMATIZAR LA INTERPRETACIÓN
DE PRUEBAS EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS DEL
INSTITUTO COLOMBIANO DE PETRÓLEO**

OSCAR JAVIER GÓMEZ GALVIS
LUIS FERNANDO RAMÍREZ SILVA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA**

2011

**HERRAMIENTA SOFTWARE PARA AUTOMATIZAR LA INTERPRETACIÓN
DE PRUEBAS EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS DEL
INSTITUTO COLOMBIANO DE PETRÓLEO**

OSCAR JAVIER GÓMEZ GALVIS
LUIS FERNANDO RAMÍREZ SILVA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO DE
SISTEMAS

Director

Victor Eduardo Martínez Abaunza
Universidad Industrial de Santander (UIS)

Co-Director

Jenny Mabel Carvajal Jiménez
Instituto Colombiano de Petróleo (ICP)

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA**

2011

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto expresan su agradecimiento a:

El grupo de investigación de estabilidad de pozo (GIEP), profesionales y compañeros por su apoyo durante todo el desarrollo del proyecto, darnos la oportunidad de desarrollar nuestra tesis en éste excelente grupo de investigación.

Victor Martínez nuestro director, por su colaboración durante el desarrollo de nuestro proyecto, su apoyo y acompañamiento constante para el correcto cumplimiento del proyecto.

Jenny Mabel Carvajal nuestra codirectora, por guiarnos en el desarrollo de nuestro trabajo, orientarnos en términos de poco conocimiento para nuestra carrera y mantener su confianza en nosotros durante todo el desarrollo del proyecto.

Ana B. Ramírez, nuestra tutora, quién estuvo pendiente en todo el desarrollo de nuestro trabajo, brindándonos su apoyo y acompañándonos en el trabajo de investigación.

Todos los integrantes del laboratorio de mecánica de rocas, quienes nos guiaron durante el desarrollo del proyecto brindándonos su experiencia y conocimiento referente al desarrollo de los ensayos.

Cesar Ochoa y Laura Galvis, por guiar el proyecto y además acompañarnos en el desarrollo del trabajo brindándonos su apoyo constante y compañía.

Nuestros compañeros de carrera y amigos quienes hicieron posible de alguna forma la realización de nuestro proyecto.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi familia. Su profunda unión y amor fraterno me han brindado todo lo necesario para llegar a este punto de mi vida profesional.

Agradezco profundamente a mi madre por ser esa mujer dulce y humana que siempre ha estado allí en los momentos más difíciles, brindándome su paciencia y comprensión. A mi padre por haberme hecho nacer esas ganas de saber y conocer. Por haber sido siempre ese ejemplo a seguir.

Indudablemente a mis amigos y amigas que con fiestas, paseos y salidas alegraron mi paso por la Universidad, convirtiendo estos casi cinco años en la mejor época de mi vida.

Sin su apoyo esto no hubiera sido posible.

OSCAR JAVIER GÓMEZ GÁLVIS

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios por ser mi guía durante toda mi vida y por haberme dado la salud para poder llegar a este punto.

A mi familia por su constante apoyo, comprensión, amor y por ser mi soporte en los momentos más difíciles de mi carrera.

A mi Madre, por ser mi mayor soporte, por todos sus consejos, paciencia y apoyo durante toda mi vida.

A mi padre por enseñarme a ser persistente, perseverante y apoyarme en todos los proyectos que me propuse.

A mis amigos, por todos los excelentes momentos vividos durante mi carrera universitaria.

LUIS FERNANDO RAMÍREZ SILVA

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	23
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	25
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	25
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
3. JUSTIFICACIÓN.....	26
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	27
4.1. INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE LABORATORIO... 27	
4.2. SUBJETIVIDAD EN LAS PRUEBAS ACÚSTICAS.....	27
4.3. ADMINISTRACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	28
5. MARCO TEÓRICO.....	29
5.1. TRATAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES.....	29
5.1.1. Señales Eléctricas.....	29
5.1.1.1. Señales Análogas.....	30
5.1.1.2. Señales Digitales.....	30
5.1.2. Ventajas y desventajas de las señales	31
5.2. TRANSFORMADA DE FOURIER.....	33
5.3. TRANSFORMADA DE WAVELET.....	34
5.3.1. Descomposición de la señal.....	34
5.4. MANEJO DE BASE DE DATOS	35
5.5. JASPER REPORTS.....	35
5.6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE LABORATORIOS DE MECÁNICA DE ROCAS.....	36
5.6.1. Normas ASTM.....	36
5.6.2. Ensayo acústico.....	37
5.6.2.1. Teoría del ensayo	37
5.6.2.2. Análisis de la señal.....	38
5.6.3. Ensayo de Envolvente de falla múltiple	39
5.6.3.1. Teoría de ensayo.....	39
5.6.4. Ensayo de Indentación.....	42
5.6.4.1. Teoría del ensayo.....	42
5.6.5. Ensayo de Compresibilidad.....	45
5.6.5.1. Teoría del ensayo.....	45
5.7. ANEXO DE PRUEBAS YA REALIZADAS.....	46
5.7.1. Brazilian test.....	46
5.7.2. Compresión Uniaxial.....	47
5.7.3. Compresión Triaxial.....	48
6. ESTADO DEL ARTE.....	49
6.1. BITACORA DE LA ROCA EN EL LABORATORIO.....	49
6.1.1. Solicitud de Servicio y Recepción en el CRM.....	49

6.1.2.	Ingreso de la muestra en el LMR.....	51
6.1.3.	Procesos para preparar la muestra.....	51
6.1.3.1.	Corte y Pre-pulido.....	51
6.1.3.2.	Perfilado.....	52
6.1.3.3.	Pulido.....	52
6.1.4.	Toma de medidas antes de pulir.....	52
6.1.4.1.	Medición Longitudinal.....	52
6.1.4.2.	Medición Diametral.....	52
6.1.4.3.	Medición de la planitud.....	53
6.1.4.4.	Medición de la Cilindricidad.....	54
6.1.5.	Pulido y medidas finales.....	56
6.1.6.	Saturación.....	56
6.1.7.	Toma de medidas a muestras irregulares.....	58
6.1.7.1.	Medición del volumen.....	58
6.1.7.2.	Longitud eje principal.....	59
6.1.7.3.	Masa.....	59
6.1.7.4.	Volumen de SandWrap paper.....	59
6.1.8.	Realización del ensayo y reporte de resultados.....	59
6.2.	INTERPRETACIÓN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.....	60
6.2.1.	Ensayo Acústico.....	61
6.2.1.1.	Procedimiento del laboratorio.....	61
6.2.1.2.	Tiempo estimado para la interpretación.....	63
6.2.2.	Ensayo de Envolvente de falla múltiple.....	64
6.2.2.1.	Procedimiento del laboratorio.....	65
6.2.2.2.	Tiempo estimado para la interpretación.....	66
6.2.3.	Ensayo de Indentación.....	66
6.2.3.1.	Procedimiento del laboratorio.....	66
6.2.3.2.	Tiempo estimado para la interpretación.....	68
6.2.4.	Ensayo de Compresibilidad.....	69
6.2.4.1.	Procedimiento realizado por el laboratorio.....	69
6.2.4.2.	Tiempo estimado para la interpretación.....	70
7.	HERRAMIENTA SOFTWARE.....	71
7.1.	TAREAS DE LA HERRAMIENTA.....	71
7.1.1.	Administración de cuentas de usuario.....	72
7.1.1.1.	Actualizar Datos.....	73
7.1.1.2.	Consultar.....	74
7.1.1.3.	Eliminar.....	75
7.1.1.4.	Administrar permisos.....	75
7.1.1.5.	Creación de reportes por la herramienta.....	77
7.1.2.	Base de datos.....	79
7.1.2.1.	Tabla Usuario.....	79
7.1.2.2.	Tabla Roca.....	79

7.1.2.3.	Tabla Estado.....	79
7.1.2.4.	Tabla Tiene.....	81
7.1.3.	Bitácora de la roca.....	82
7.1.3.1.	Bitácoras de datos en la herramienta software....	83
7.1.3.2.	Iniciar ciclo de vida de una muestra.....	83
7.1.3.3.	Continuar ciclo de vida de una muestra.....	84
7.1.3.4.	Consultar y Eliminar.....	86
7.1.3.5.	Realizar Consultas.....	86
7.1.3.6.	Eliminar Registros del sistema.....	88
7.1.3.7.	Aprobar Rocas.....	89
7.1.4.	Interprete de pruebas de laboratorio.....	90
7.1.4.1.	Ensayo Acústico.....	91
7.1.4.2.	Ensayo de Envolvente de falla múltiple.....	100
7.1.4.3.	Ensayo de Indentación.....	111
7.1.4.4.	Ensayo de Compresibilidad.....	115
7.1.5.	Enlace de Java a Matlab.....	120
7.1.6.	Robustez del Software.....	121
7.1.6.1.	Módulo en Java.....	121
7.1.6.2.	Módulo en Matlab.....	122
7.1.7.	Seguridad del software.....	123
7.2.	ESTRUCTURA DEL SOFTWARE.....	124
8.	RESULTADOS.....	125
8.1.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	125
8.1.1.	Ensayo acústico	125
8.1.1.1.	Punto inicial de la señal	125
8.1.1.2.	Módulo de Young	126
8.1.1.3.	Relación de Poisson	127
8.1.2.	Ensayo de Envolvente de falla múltiple	128
8.1.2.1.	Módulo de Young y Relación de Poisson	128
8.1.2.2.	Graficador EFM.....	129
8.1.3.	Ensayo de Indentación	131
8.1.4.	Ensayo de Compresibilidad.....	132
9.	CONCLUSIONES	134
10.	RECOMENDACIONES.....	136
11.	BIBLIOGRAFÍA	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Señal Análoga en función del tiempo.....	30
Figura 2. Señal digital binaria.....	31
Figura 3. Muestreo de una señal análoga	33
Figura 4. Descomposición wavelet para tres niveles.....	34
Figura 5. Señal P caracterizada.....	38
Figura 6. Señal S caracterizada.....	39
Figura 7. Envolvente de falla.....	40
Figura 8. Representación del círculo de Mohr.....	41
Figura 9. A.) Función que más se ajusta a los círculos de Mohr. B.) Linealización de la función encontrada en A.....	42
Figura 10. Huella en forma piramidal producida al aplicar una fuerza sobre el material a través de un indentador.....	43
Figura 11. Proceso del indentador por cada una de las perforaciones sobre la muestra.....	44
Figura 12. Hundimiento o apilamiento según el material.....	44
Figura 13. Prueba de compresibilidad de la roca, esfuerzos a través de ella por todo su volumen	46
Figura 14. Brazilian test.....	47
Figura 15. Compresión Uniaxial.....	47
Figura 16. A.) Diagrama esquemático LMR. B.) Bosquejo del principio de la celda Triaxial.....	48
Figura 17. Ingreso a la base de datos SILAB de una muestra.....	50
Figura 18. Preparación de la muestra para medición dimensional.....	53
Figura 19. Medición de la planitud utilizando el indicador de caratulas...	54
Figura 20. Montaje para medición de cilindridad.....	54
Figura 21. Bitácora de dimensión geométrica realizada en Excel.....	55
Figura 22. Ejemplo del principio de Arquímedes.....	58
Figura 23. Datos calculados con Excel.....	62
Figura 24. Señal P picada con el software actual en el laboratorio.....	63
Figura 25. Cálculo de la línea envolvente actualmente en el LMR.....	65

Figura 26. Muestra rocosa preparada para ensayo de Indentación.....	67
Figura 27. Cada color indica la carga y descarga del indentador.....	67
Figura 28. Resultados: A.) Gradiente. B.) Fuerza.....	68
Figura 29. Grafica de las deformaciones con respecto al esfuerzo calculado.....	70
Figura 30. Sección de la base de datos que indica la relación de la tabla usuario con la tabla tiene.....	73
Figura 31. Tabla que muestra los resultados de las consultas.....	75
Figura 32. Panel administrar permisos.....	77
Figura 33. Ejemplo del llenado del formulario para creación de un reporte.....	79
Figura 34. Valores que contiene la tabla “estado”	81
Figura 35. Diagrama Entidad – Relación de la base de datos.....	82
Figura 36. Menú de opciones para el ciclo de vida de la roca.....	83
Figura 37. Panel de registro de una roca.....	84
Figura 38. Panel de Medidas después de pulir.....	85
Figura 39. Panel para realizar consultas y eliminación de rocas.....	87
Figura 40. Sub-panel Eliminar.....	90
Figura 41. Panel de rocas pendientes por aprobación de pulido.....	90
Figura 42. Señal madre seleccionada, db8.....	92
Figura 43. Grafica de tratamiento wavelet para señal P.....	93
Figura 44. Punto inicial ajustado para Señal P.....	93
Figura 45. Señal del laboratorio y descomposición wavelet.....	94
Figura 46. Grafica del valor absoluto de los detalles para la descomposición Wavelet.....	95
Figura 47. Valle encontrado, zona donde se encuentra to.....	95
Figura 48. Convolución resultante.....	96
Figura 49. Panel del menú de pruebas.....	97
Figura 50. Diseño del Graficador SNL para interpretar pruebas acústicas.....	98
Figura 51. Especimen entre encups.....	99
Figura 52. Ajuste polinomial para los círculos de Mohr, Función de orden par.....	102

Figura 53. Ajuste polinomial para los círculos de Mohr, Función de orden cuadrada.....	103
Figura 54. Circulo de superficie y círculo de corte.....	103
Figura 55. Panel de error para cuatro cortes.....	106
Figura 56a. Panel de error para cinco cortes, seleccionando el círculo dos y círculo tres.....	107
Figura 56b. Panel de error para cinco cortes, seleccionando el círculo uno y círculo dos.....	107
Figura 57. Panel de error para seis cortes.....	108
Figura 58. Porcentaje de error, Función Linealizada.....	110
Figura 59. Procentaje de error, método círculo envolvente y círculo de corte.....	110
Figura 60. Diseño Graficador IDN.....	112
Figura 61. Grafico generado.....	113
Figura 62. Resultados de fuerza y de gradiente contra número de Indentaciones.....	115
Figura 63. Selección de gráficas para interpretación del ensayo de Indentación.....	115
Figura 64. Diseño del intérprete de pruebas de Compresibilidad	117
Figura 65. Panel de Interpretación.....	118
Figura 66. Resultados de la prueba. A.) Ascenso; B.) Descenso.....	119
Figura 67. Resultados finales del ensayo	119
Figura 68. Estructura del software	124

LISTA DE TABLAS

Tabla1. Resultados Punto inicial Señal S y P, ensayo 1.....	125
Tabla2. Resultados Punto inicial Señal S y P, ensayo 2.....	125
Tabla3. Resultados Módulo de Young, Señal S1, ensayo 1.....	125
Tabla4. Resultados Módulo de Young, Señal S2, ensayo 1.....	125
Tabla5. Resultados Módulo de Young, Señal S1, ensayo 2.....	126
Tabla6. Resultados Módulo de Young, Señal S2, ensayo 2.....	126
Tabla7. Resultados Relación de Poisson, Señal S1, ensayo 1.....	126
Tabla8. Resultados Relación de Poisson, Señal S2, ensayo 1.....	126
Tabla9. Resultados Relación de Poisson, Señal S1, ensayo 2.....	127
Tabla10. Resultados Relación de Poisson, Señal S2, ensayo 2....	127
Tabla11. Resultados Módulo de Young, EFM Prueba 1.....	127
Tabla12. Resultados Módulo de Young, EFM Prueba 2.....	128
Tabla13. Resultados Relación de Poisson, EFM Prueba 1.....	128
Tabla14. Resultados Relación de Poisson, EFM Prueba 2.....	128
Tabla15. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 1	128
Tabla16. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 1.....	129
Tabla17. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 2.....	129
Tabla18. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 2.....	129
Tabla19. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 3.....	129
Tabla20. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 3.....	129
Tabla21. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 3.....	130
Tabla22. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 4.....	130
Tabla23. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 4.....	130
Tabla24. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 5.....	130
Tabla25. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 5.....	130
Tabla26. Resultados gradiente, prueba de Indentación.....	131
Tabla27. Resultados gradiente, prueba de Indentación.....	131
Tabla28. Resultados Compresibilidad, Ciclo 1.....	132
Tabla29. Resultados Compresibilidad, Ciclo 2.....	133
Tabla30. Resultados Compresibilidad, Ciclo 3.....	133

GLOSARIO

AFI (Ángulo de fricción interna): Resultado entre la fricción mecánica directa entre granos y de la trabazón entre ellos. En el laboratorio, se obtiene a partir de la regresión lineal de la envolvente de falla obtenida con los círculos de Mohr correspondiente al ángulo de la línea de envolvente de falla.

ASTM: American Society for testing and materials (Sociedad Americana para pruebas y materiales), sociedad que establece las normas utilizadas en el laboratorio de mecánica de rocas para el desarrollo de las pruebas, cálculos de medidas, conversiones, entre otras.

Bases de datos: es un conjunto de datos pertenecientes a un mismo contexto y almacenados sistemáticamente para su posterior uso. Permiten establecer interconexiones (relaciones) entre los datos (que están guardados en tablas), y trabajar con ellos conjuntamente. Este modelo se plantea con el fin de eliminar la redundancia en los datos y ofrecer una mayor consistencia en los mismos.

Ciclo de vida de la roca: el ciclo de vida de la roca, es el procedimiento por el que pasa un material rocoso, desde que ingresa al laboratorio hasta que se ensaya.

Cohesión: Calidad del terreno por la cual las partículas se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas, que dependen, entre otras cosas del número de puntos de contacto que cada partícula tiene con su particular más cercana, por tanto la cohesión es mayor mientras más finas sean las partículas del terreno. En el laboratorio, la cohesión es el punto de corte de la línea recta que representa la envolvente de falla de la roca.

Cristales Piezoeléctricos: cristales que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica en su masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie.

Criterio de falla de Mohr Coulomb: también llamado criterio de fricción interna, aplicado a materiales frágiles, según el cual, el material resistirá en el punto que su círculo de Mohr sea interno a la envolvente definida por los círculos de Mohr correspondientes a la rotura del ensayo realizado en el laboratorio.

Deformación: Variación en una dimensión de la roca con respecto a su valor inicial; efecto que ocurre durante un ensayo de aplicación de carga.

Deformación Axial: Deformación de la roca presentado en su eje longitudinal.

Deformación diametral: Deformación de la roca presentada en su eje transversal.

Deformación Volumétrica: Deformación de la roca presentada en su volumen total.

Evento: acontecimientos que suceden en el ambiente de negocio de una organización a los cuales el sistema debe responder.

Extensómetro: Dispositivos utilizados para medir las deformaciones en las rocas (muestras); estos dispositivos se ajustan alrededor de la muestra y van registrando en tiempo real la deformación de ésta.

Interpretación de prueba: Interpretar una prueba o ensayo de laboratorio, consiste en leer, analizar y procesar los datos tomados durante el ensayo; este proceso abarca desde que se ha ensayado la roca hasta que se han obtenido los resultados con base al tipo de ensayo utilizado.

Laboratorio de Mecánica de Rocas (LMR): Laboratorio de mecánica de rocas del Instituto Colombiano de petróleo, en el cual se hace la caracterización de las rocas.

Material Elástico: son aquellos que tienen la capacidad de recobrar su forma y dimensiones primitivas cuando cesa el esfuerzo que había determinado su deformación.

Material Elástico – plástico: Aquellos materiales que poseen propiedades elásticas y plásticas. Pueden recobrar su forma y dimensiones primitivas cuando cesa el esfuerzo aplicado, hasta cierto límite. Cuando la roca falla, el material ha llegado a su límite elástico y ya no podrá volver a recuperar su forma inicial.

Material Plástico: son aquellos que no pueden recobrar su forma y dimensiones primitivas una vez cesa el esfuerzo aplicado, esto implica que el material queda deformado hacia el lugar donde se ha aplicado la fuerza o carga.

Modulo de Young: Relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en la roca en la misma dirección que se aplica dicho esfuerzo.

MTS: Empresa dedicada al desarrollo de herramientas de Hardware y software para la evaluación geomecánica de rocas, entre sus diseños están la MTS815 que es la herramienta utilizada en el laboratorio. Esta combinación entre hardware y software va registrando, guardando y visualizando los datos que se obtienen de una prueba que se esté realizando en ese momento con respecto al tiempo; la información final que muestra esta herramienta contiene datos de la muestra, de la prueba y la información necesaria para hacer la interpretación de la prueba correspondiente.

Presión de confinamiento: Presión externa que ejerce un fluido sobre la superficie de una muestra de roca.

Presión de poro: presión que ejercen los fluidos en el espacio poroso de las rocas.

Probeta de ensayo: Nombre que recibe la muestra para ensayo después que ha sido preparada.

Prueba triaxial: Teóricamente, consiste en variar las presiones actuantes en tres direcciones ortogonales sobre el espécimen. Generalmente, los esfuerzos en dos de las direcciones son iguales por la forma cilíndrica del material que se somete a la prueba, pero para máquinas poli axiales, el material tiene forma cúbica y es sometido a las 3 fuerzas; entre sus ventajas están, se poseen medios para controlar la presión de confinamiento, control de la presión de los poros y adicionalmente se pueden simular las condiciones iniciales isotrópicas y anisótropas.

Prueba Acústica: la prueba acústica es una herramienta para evaluar y caracterizar las propiedades mecánicas de las rocas utilizando ondas ultrasónicas, de este modo el procesamiento digital de las señales acústicas procedentes de la muestra de roca, proporciona un análisis de las ondas transmitidas a través de la muestra de roca. Las pruebas dinámicas acústicas tienen una ventaja sobre las pruebas estáticas ya que son pruebas no destructivas.

Relación de Poisson: Relación entre la tensión normal al esfuerzo y la tensión paralela a dicho esfuerzo, está representada por la relación entre la deformación transversal y longitudinal.

Recolección de requerimientos: Así es denominada la principal fase en el ciclo de vida del software, donde se identifica el problema, se estiman tiempos y costos y se define el alcance del sistema.

Usuario: Se denomina de esta manera a toda persona que utilice cierto tipo de software o hardware.

RESUMEN

Título:

HERRAMIENTA SOFTWARE PARA AUTOMATIZAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS DEL INSTITUTO COLOMBIANO DE PETRÓLEO*

Autores:

GÓMEZ GALVIS, Oscar Javier**
RAMÍREZ SILVA, Luis Fernando**

Palabras Clave:

LMR, ICP, Tratamiento de señales, Transformada de wavelet, Métodos numéricos, Ensayos dinámicos, Ensayos estáticos, Ensayos de laboratorios de mecánica de rocas, Ciclo de la roca, Base de datos relacional.

Descripción:

Este trabajo incluye todo el desarrollo de una herramienta software para automatizar la interpretación de pruebas en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP. Se muestra algunos de los procesos que se realizan en el laboratorio, los problemas que se presentan actualmente para desarrollarlos y la razón por la cual una herramienta software, puede mejorar el manejo de la información en el laboratorio.

Se especifica el desarrollo del tema de investigación referente a la interpretación de ensayos para el laboratorio, se indican los pasos a seguir para entender cada ensayo y luego se detallan los métodos que se utilizaron en el software, el cual fue desarrollado a la medida, utilizando programación orientada a objetos, para analizar e interpretar estas pruebas de manera eficaz, rápida, organizada y segura.

Se detalla un módulo Administrativo, el cual consiste en un sistema de información, con manejo de base de datos, para administrar la información del laboratorio, tanto para el control de usuarios de la herramienta, como el manejo del ciclo de vida de la roca dentro del laboratorio.

Finalmente se presentan los porcentajes de error luego de comparar los resultados obtenidos con la herramienta software frente a los que desarrollan de la forma tradicional en el laboratorio.

* Proyecto de grado en la modalidad de investigación

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Ingeniería de sistemas e Informática. MARTINEZ ABAUNZA, Víctor Eduardo

SUMMARY

TITLE

Software Tool to automate the test interpretation in the laboratory of mechanics of rocks in the ICP*

AUTHOR

GÓMEZ GALVIS, Oscar Javier **
RAMÍREZ SILVA, Luis Fernando **

KEYWORDS

LMR, ICP, Signal treatment, Wavelet transform, Numerical Methods, Dynamic test, Static test, Laboratory test of rock mechanic, life cycle of the rock, relational Database.

DESCRIPTION

This work presents the development of a tool to automate the test interpretation in the laboratory of mechanics of rocks in the ICP. This work includes some of the tests are made in the laboratory, some problems related to the tests, and the reason for the implementation of this software tool.

We also specify how to interpret the laboratory tests, showing all the steps to understand the test and we detail the methods we used in the software tool. This tool was developed using objects oriented programming to analyze the data in an efficient, fast, organized and secure way.

Finally, we present an administrative module including an information system with a database to administer the information in the laboratory. This is made for the control of the users of this tool and for the control of the lifetime of the rocks in the laboratory.

Finally, we present the error rates between the results given by the software tool and the results obtained in the laboratory by using the traditional methodology.

* Degree Project in the investigation modality

** Physical-Mechanic Engineering Faculty. System and Informatics Engineering. MARTINEZ ABAUNZA Victor Eduardo.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera, el estudio de las propiedades mecánicas de las rocas ha tomado fuerza en las últimas décadas, ya que día a día son planteadas nuevas dificultades y retos a la hora de explotar los nuevos yacimientos petrolíferos y las aplicaciones geomecánicas sirven de apoyo en la toma de decisiones de dichos activos.

En la extracción de hidrocarburos, estos estudios son motivado por factores como el alto precio del petróleo, la escasez que puede presentarse en los próximos años y la dificultad que presenta la perforación de algunos pozos, ya sea por la profundidad del mismo o por lo intrincado que puede resultar hacer perforaciones en terrenos geológicamente difíciles.

Estos nuevos retos obligan a los ingenieros encargados de la estabilidad de pozo a conocer las propiedades de los materiales rocosos presentes en el suelo y la manera en la cual ellos reaccionan ante los esfuerzos mecánicos y los cambios del entorno, para evitar que el pozo colapse, es así que se mantiene la estabilidad, se genera mayor rentabilidad y se preserva la vida de quienes trabajan en dicha industria.

El Laboratorio de Mecánica de Rocas (LMR) del Instituto Colombiano de Petróleos (ICP) es una de las principales entidades del nororiente colombiano, encargada de realizar dichos estudios mecánicos y en donde se ha visto la necesidad de utilizar tecnologías de información con el fin de aumentar la eficacia y la eficiencia en las operaciones.

En el aspecto administrativo, un sistema de información contribuye al almacenamiento ordenado de la información, eliminando las redundancias y haciendo posible acceder fácilmente a ella cuando sea necesario. De esta manera la información estará siempre lista y ordenada cuando se necesario la toma de decisiones rápidas y contundentes.

En el aspecto técnico, la herramienta software se desarrolla con el fin de automatizar los procesos de realización de las pruebas, reduciendo el tiempo que tarda cada interpretación. También facilita la obtención y posterior interpretación de los resultados.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta software con el fin de sistematizar los procesos del laboratorio de mecánica de rocas, incluyendo el tratamiento digital de señales en la interpretación de las pruebas acústicas, para reconocer patrones de decisión con el fin de reducir la subjetividad en la selección del tiempo inicial.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar un módulo de reportes que soporte la sistematización de entrada y salida de materiales en el laboratorio de mecánica de rocas, especificando sus características y propiedades.
- Administrar la asignación de los permisos correspondientes a cada integrante del laboratorio por medio de cuentas de usuario, de acuerdo a las pruebas que está capacitado para realizar.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario que incluya un entorno de visualización con el fin de presentar gráficamente los resultados de las pruebas que lo requieran.
- Diseñar un módulo automático de interpretación de pruebas del laboratorio, disminuyendo así la intervención del usuario para evitar errores humanos.
- Desarrollar un módulo de inferencia para reducir la subjetividad implementando técnicas de tratamiento de señales, para la toma de decisiones, haciendo más objetivos los procesos en el laboratorio.

3. JUSTIFICACIÓN

La herramienta se desarrolla con el fin de realizar de manera automática la interpretación de las pruebas realizadas en el laboratorio y a su vez, reducir el grado de error presente en las mismas por medio de algoritmos más especializados; también busca eliminar la subjetividad presente en actividades realizadas por los funcionarios del laboratorio gracias a la aplicación de tratamiento de señales; permite extraer información relevante a partir de procesos y operaciones sobre la señal; hecha la caracterización de la señal por tratamiento de señales, podemos establecer cada parte de la señal, eliminar el ruido y encontrar el punto inicial de la señal.

Otra función importante consiste en sistematizar por medio de reportes las entradas y salidas de rocas del laboratorio, permitiéndole al administrador del laboratorio llevar un control claro y ordenado de las muestras presentes.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para dar una idea más concreta y específica del desarrollo del proyecto de grado, se decide dividir el problema con base en los 3 aspectos principales:

4.1. INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE LABORATORIO

Actualmente en el laboratorio se desarrolla una serie de pruebas o ensayos que son analizados por medio de Excel, éste procedimiento incluye gran cantidad de manejo de datos y el uso de varias formulas que ocasionar desorden al manipular, almacenar y actualizar la información durante el procedimiento de análisis; adicionalmente el tiempo necesario para realizar cada interpretación es demasiado alto, lo que desmejora el tiempo de respuesta del laboratorio. Con éste proyecto planteamos que:

Es posible agilizar la manera en que se interpretan las pruebas, desarrollando un módulo dentro de la herramienta, capaz de realizar el análisis de forma automática, minimizando la intervención del usuario con los datos.

4.2. SUBJETIVIDAD EN LAS PRUEBAS ACÚSTICAS

Una de las pruebas a interpretar, es la prueba Acústica (o ensayo Acústico), el cual necesita encontrar el tiempo inicial de viaje de la señal acústica de entre gran cantidad de datos (más de dos mil quinientos) para su correcta interpretación. Este procedimiento es realizado actualmente en el laboratorio de forma manual, haciendo muy subjetiva la forma de encontrar el tiempo inicial (t_0) dentro de las señales, ya que depende de la forma como el analista selecciona el tiempo de viaje a partir de la visualización de la onda. En este caso visualizamos que:

Se puede aplicar tratamiento de señales para identificar un patrón común en la selección del tiempo inicial (t_0) para las pruebas acústicas.

4.3. ADMINISTRACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Cada vez que una prueba es interpretada correctamente, el paso a seguir es elaborar su reporte final donde se especifica todo el procedimiento, material e instrumentos utilizados y características e información de la roca analizada. Toda esta información es llenada manualmente por los encargados de la interpretación de la prueba y hace que éste procedimiento sea bastante lento y repetitivo. Ahora con una herramienta software:

Es posible generar automáticamente los reportes que controlan la entrada/salida de material y los resultados de las interpretaciones y adicionalmente generar un registro de toda esta información utilizada dentro del laboratorio para aumentar el orden y el control sobre éste.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. TRATAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

El tratamiento digital de señales (TDS) es un área de las matemáticas aplicadas que se concentra en la representación, transformación y manipulación de señales en forma digital, es decir discretizadas en el tiempo o en el espacio. Esto implica que sólo se conoce el valor de la señal en instantes específicos.

Dichas técnicas son cada vez más utilizadas por los científicos e ingenieros; gracias a la aparición del computador, ya que éstos han permitido la ejecución de algoritmos que no podían realizarse manualmente, o que tardarían años e incluso siglos en ejecutarse.

Gracias a la evolución de las técnicas de TDS es posible cambiar muchos de los sistemas análogos por sistemas digitales que reducen el tamaño de los componentes y evitando antiguos problemas de ruido y tolerancia.

5.1.1. Señales Eléctricas

Se entiende por señal a un flujo de información que depende del tiempo y proveniente de fuentes de distinta naturaleza: mecánica, electromagnética, hidráulica, eólica, óptica, etc. En términos más concretos, una señal eléctrica corresponde a un conjunto de tensiones o corrientes que proviene de una fuente electromagnética.

Existen señales artificiales y no artificiales. Las señales artificiales son generadas por artefactos creados por el hombre tales como los teléfonos celulares, las antenas de radio, etc. Las señales no artificiales son aquellas que se encuentran por naturaleza en el ambiente, tales como la radiación electromagnética de una estrella, la voz, la velocidad del viento, etc.

Las señales son representadas como funciones matemáticas de una o más variables independientes, la más común de ellas es el tiempo, ya que señales como la voz, el desplazamiento, la velocidad de un objeto y las ondas de radio, dependen de él.

5.1.1.1. Señales Análogas

Es la forma en que se representan las señales presentes por naturaleza en el ambiente, la principal característica de este tipo de señales es que presentan un dominio y un rango continuo, es decir, pueden tomar infinitos valores.

Son señales análogas la velocidad del agua, la voz, las ondas producidas en un estanque, etc. Las cuales pueden tomar infinitos valores en cualquier intervalo de tiempo (Ver Figura 1).

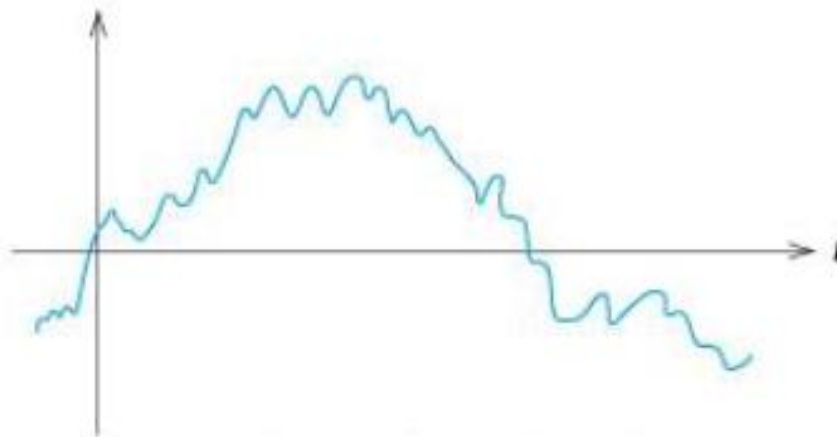


Figura 1. Señal Análoga en función del tiempo

Fuente: Autores

5.1.1.2. Señales Digitales

Las señales digitales corresponden a una magnitud física representada por medio de una función que solamente puede tomar valores discretos en lugar de valores dentro de un cierto rango (señales análogas).

Las señales digitales más utilizadas hoy en día corresponden al sistema digital binario con el cual operan los computadores y demás dispositivos electrónicos. Este sistema utiliza la lógica de dos estados representados por niveles de tensión eléctrica. Uno significa alto (High) y cero significa bajo (Low). Otro ejemplo de señal digital corresponde a los diez pulsos de un teléfono que obedecen a los números del cero al nueve donde es posible pasar del pulso siete al pulso cuatro sin tener que pulsar en orden los pulsos seis y cinco.

Si se quiere hacer referencia a un instrumento, se dice que es digital cuando realiza medidas que pueden ser representadas por números enteros y no por la posición de un indicador en un área determinada. (Ver Figura 2)

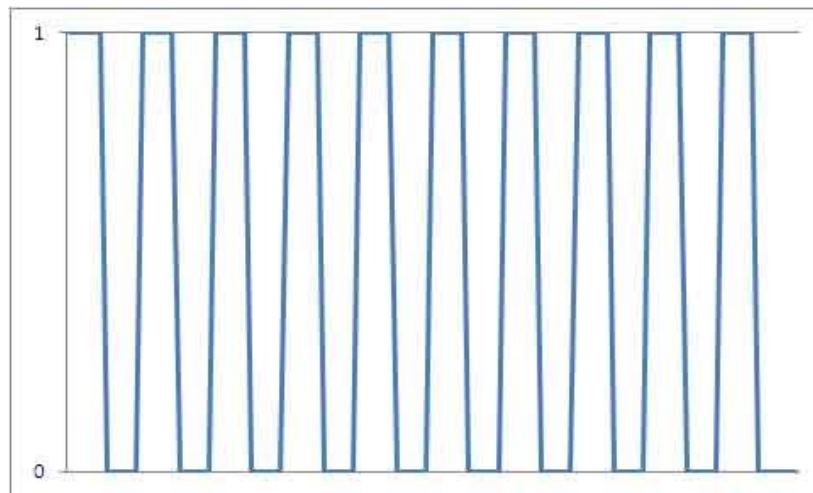


Figura 2. Señal Digital binaria.

Fuente: Autores

De esta manera la señal solo puede tomar ciertos valores haciendo que se pierda alguna información, pero permitiéndole a los computadores trabajar más fácilmente.

5.1.2. Ventajas y desventajas de las señales Análogas y Digitales

La transmisión de señales usando medios analógicos puede verse afectada por un fenómeno denominado “ruido”, nombre con el cual se definen las perturbaciones sufridas por la señal durante su transmisión y obedece a causas como:

- Interferencia con otro tipo de señales similares en el mismo ambiente de transmisión, como sucede en las ondas de radio, se puede presentar interferencia con una onda en una frecuencia similar o con la radiación del fondo del universo.
- Defectos o desperfectos en el medio encargado de conducir la señal, en el caso de las telecomunicaciones, el canal por el cual fluye la información puede verse afectado por factores como la temperatura o la resistencia que todo material tiene al flujo de electrones en su interior; caso que se puede encontrar cuando se están tomando las señales en la muestra rocosa.

Las señales transmitidas en formato digital se ven menos afectadas por el ruido producto de los factores ambientales, y dicho ruido no causa grandes alteraciones en la información, ya que una distorsión en los valores de la señal será aproximado al valor cercano adquirido por la máquina que interpreta la señal obedeciendo las leyes de discretización.

Debido a que las señales presentes en el ambiente se encuentran en forma análoga (voz, radiación electromagnética producida por la luz, etc.) es necesaria la transformación de dicha señal a formato digital para poder operar con ellas usando dispositivos electrónicos como computadores, enrutadores, teléfonos celulares, etc. Esta transformación ocasiona una pequeña pérdida de información que aunque en ocasiones puede ser irrelevante, muchas veces se tiene en cuenta, y permite inferir que los dispositivos digitales muestran una calidad reducida a los dispositivos análogos. Un ejemplo de lo mencionado anteriormente se observa en la pérdida de datos ocurridos en la conversión análogo-digital presente en las cámaras digitales. El ojo humano puede detectar 10.000 intensidades de un mismo color, el CCD de una cámara digital puede solamente detectar 256 intensidades lo que supone una pérdida de calidad.

La razón por la cual se realizan las conversiones a formato digital es porque los computadores no pueden manejar señales análogas, y operar con éstas de forma manual sería bastante dispendioso. En otras palabras, se acepta una pequeña pérdida de información con el fin de poder operar las señales digitales con dispositivos electrónicos de forma eficiente y así realizar las operaciones y transformaciones con las señales, pues sin la ayuda de dichos dispositivos sería prácticamente imposibles.

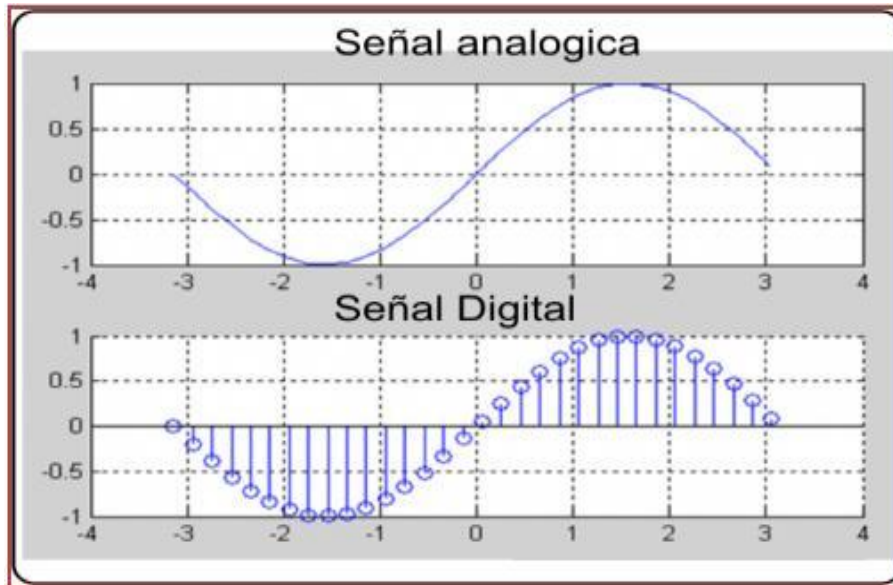


Figura 3. Muestreo de una señal Análoga

Fuente: Autores

5.2. TRANSFORMADA DE FOURIER

El ruido en una señal se caracteriza por que siempre se encuentra en altas frecuencias, por medio de la transformada de Fourier se puede cambiar del dominio en tiempo al dominio en frecuencia; esto nos permite conocer la distribución espectral de la señal y así separar la señal real del ruido y de esta manera dejar la señal más limpia para un posterior tratamiento.

El concepto de frecuencia en el procesado de imagen se utiliza normalmente para referirse a frecuencia espacial, y aunque la palabra frecuencia se suela asociar a variaciones en tiempo, es importante tener claro que se refiere a la

frecuencia con la que una señal (la imagen) varía como una función de las coordenadas espaciales.

Fourier contiene exactamente la misma información que la función original, únicamente se diferencian en la forma de representarla.

5.3. TRANSFORMADA DE WAVELET

La transformada de Wavelet permite realizar un análisis de la señal tanto en el dominio frecuencial como en el temporal, generalizando el concepto de transformada de Fourier; Wavelet nos permite identificar los cambios considerables en la frecuencia dentro de todo su dominio.

5.3.1. Descomposición de la señal

El tratamiento wavelet, nos permite hacer un análisis de la señal, utilizando filtros pasa-bajo y pasa-alto simultáneamente sobre la onda; este procedimiento puede repetirse continuamente para ver las diferentes descomposiciones de la señal (ver Figura 4); un nivel adicional en el tratamiento wavelet, implica un nivel mas de descomposición.

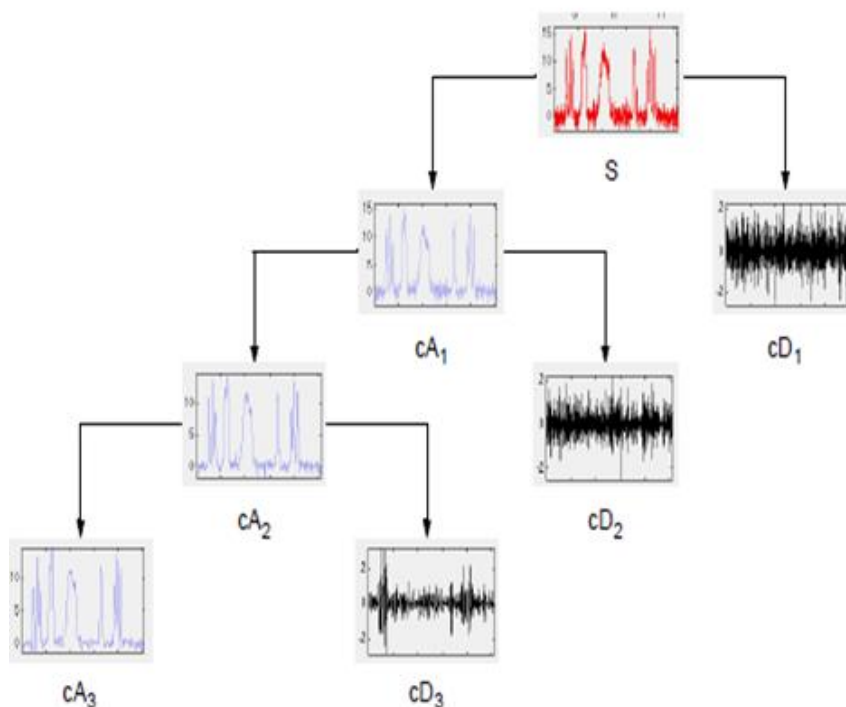


Figura 4. Descomposición wavelet para tres niveles.

Fuente: Wavelet ToolBox – Michael Misiti, Yves Misiti, Georges Openhein,
Jean- Michael Poggi

5.4. MANEJO DE BASES DE DATOS

Cada vez más se hace imperativo para las empresas tener su información organizada y dispuesta a la toma de cualquier decisión administrativa u operativa.

Es por eso, que mediante la creación de cuentas de usuario y la administración de permisos en el Laboratorio de Mecánica de Rocas se busca llevar un registro detallado de las acciones realizadas en el laboratorio, almacenando registros en la base de datos o en archivos de reporte con extensión .pdf con información acerca de quién y cuándo se realizaron interpretaciones de las pruebas y modificaciones a los ciclo de vida de las rocas.

La administración de permisos representa una gran herramienta de administración para el líder del laboratorio, ya que le permite elegir quien realiza cada prueba de acuerdo a las habilidades de cada integrante del laboratorio.

5.5. JASPER REPORTS

Jasper Reports es una herramienta que extiende la funcionalidad de Java, permitiéndole generar reportes visuales en diferentes formatos tales como .pdf, .xls, .html, .xml, etc. De esta manera se hace posible crear documentos de tipo página, preparados para imprimir en una forma simple y flexible.

Se decide la utilización de Jasper Reports debido a que es software de código libre y está totalmente escrito en java, lo que hace a la herramienta robusta y confiable a la hora de trabajar con Netbeans, eclipse, u otro entorno integrado de desarrollo (IDE) basado en Java.

Para la creación de un reporte usando esta herramienta, en primer lugar, se procede a la creación del diseño en Netbeans, el cual es guardado en un archivo de extensión jrxml. Dicho archivo contiene el nombre clave los parámetros y los campos que compondrán el reporte y su respectiva ubicación. Luego se procede a la compilación del archivo jrxml generando así un archivo *.jasper para finalmente cargarlo a la memoria y poder enviarle desde el código en Java la información que llenará los parámetros y campos en el reporte final.

5.6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE LABORATORIOS DE MECÁNICA DE ROCAS

Las técnicas sugeridas para determinar la deformación, resistencia y las constantes elásticas son dadas por la ISRM (Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas) y ASTM. Estas entidades han establecido normas en la industria que definen un marco de referencia para la estandarización de pruebas de laboratorio y procedimientos operacionales en la industria petrolera, manejo y preparación de ensayos, manipulación de corazones.

Los laboratorios de mecánica de rocas realizan pruebas de compresión, tensión, compresibilidad, entre otras; las pruebas de compresión se efectúan sometiendo un núcleo de roca a un esfuerzo único axial (prueba Uniaxial), o a un esfuerzo axial y un esfuerzo radial constante o confinamiento (prueba Triaxial).¹

5.6.1. Normas ASTM (American Section of the International Association for Testing Materials).

ASTM International es una de las organizaciones de desarrollo de normas internacionales más grande del mundo. En ASTM se reúnen productores, usuarios, consumidores, entre otros, para crear normas consensuales

¹ **Fuente:** tesis de grado *Desarrollo de una herramienta software utilizando redes neuronales artificiales para estimar propiedades del comportamiento mecánico de arenas limpias pertenecientes a una cuenca colombiana - Cesar Ochoa y Laura Galvis*

voluntarias. Las normas de ASTM se crean usando un procedimiento que adopta los principios del World Trade Organization Technical Barriers to Trade Agreement (Convenio de obstáculos técnicos al comercio de la Organización Mundial de Comercio). El proceso de creación de normas de ASTM es abierto y transparente; lo que permite que tanto a individuos como gobiernos participen directamente, y como iguales, en una decisión consensual global. Treinta y cinco mil miembros de ASTM en más de 125 países, contribuyen con sus conocimientos técnicos especializados a la creación de las más de 12,000 normas internacionales de ASTM. Estas normas son utilizadas y aceptadas mundialmente y abarcan áreas tales como metales, pinturas, plásticos, textiles, petróleo, construcción, energía, el medio ambiente, productos para consumidores, dispositivos y servicios médicos y productos electrónicos²

Para interpretar las pruebas de laboratorio, es necesario conocer la forma en que se hacen los cálculos y las operaciones necesarias para encontrar los resultados. Cada prueba tiene su correspondiente procedimiento y su forma de interpretación, por esto se hace necesario entender paso a paso cada una de las pruebas seleccionadas para este trabajo de grado, las cuales fueron: pruebas Acústicas, pruebas de Compresibilidad de la roca, pruebas de Envolvente de falla múltiple e Indentaciones;

5.6.2. **Ensayo Acústico**, Norma: ASTM D 2845 – 08 (Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock)

5.6.2.1. Teoría del ensayo:

La prueba acústica es un ensayo no destructivo; éste es un tipo de ensayo predictivo utilizado para el cálculo de propiedades elásticas de rocas Isótropas o con baja anisotropía; en este ensayo son adheridos unos cristales piezoeléctricos a la roca, debido a los cuales, aparece una diferencia de potencial eléctrico (voltaje) entre ciertas caras del cristal. Dichos cristales se

² Fuente: de www.astm.org – Fecha de revisión Enero 6 / 2011

excitan y por medio de un osciloscopio se puede obtener señales discretas que contienen información de la muestra, por medio de un estudio de velocidades y haciendo cálculos basados en la longitud de la muestra, se puede calcular las constantes elásticas: el Modulo de Young y la Relación de Poisson, resultados normalmente obtenidos en pruebas destructivas.

5.6.2.2. Análisis de la señal

Punto inicial (t_0): La señal que toma el osciloscopio está dividida en varios tramos, inicialmente se encuentra con gran cantidad de ruido (este ruido se debe a la calibración inicial de la máquina). Para hacer un correcto análisis wavelet hay que ignorar esta zona afectada, debido a que se encuentran varios cambios de frecuencia sobre esa zona.

Punto inicial Señal P: para la señal P, se cuentan con dos tramos principales, la zona inicial de ruido y la señal P que vamos a analizar (la señal P se caracteriza por ser una señal cuadrada, Ver Figura 5).

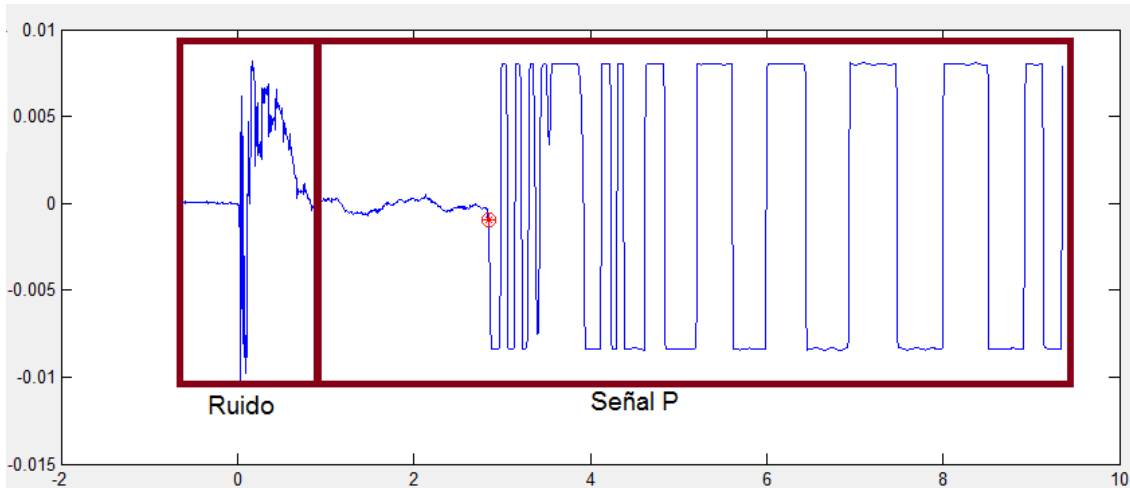


Figura 5. Señal P caracterizada, el círculo en rojo denota el punto inicial de la señal P

Fuente: Autores

Punto inicial Señal S: En el caso de la señal S, hay tres tramos durante toda la señal, inicialmente se encuentra el ruido de ajuste, luego hay un tramo donde se encuentra la señal P y finalmente se encuentra la señal S. La señal P está

incluida en la señal S debido a que el cristal piezoeléctrico de la onda S se encuentra una vez ha pasado por la señal P. Para la interpretación de esta señal, era necesario distinguir estos tres tramos (ver Figura 6).

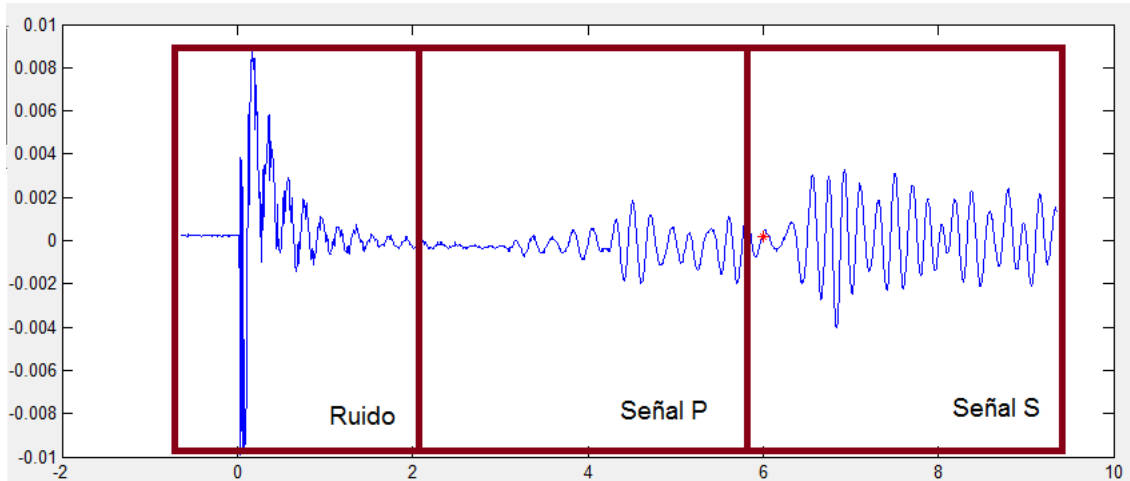


Figura 6. Señal S caracterizada, la cruz en rojo denota el punto inicial de la señal S.

Fuente: Autores

5.6.3. Ensayo de Envolvente de falla múltiple (EFM)

5.6.3.1. Teoría de ensayo

El análisis de la prueba consiste en la determinación del Módulo de Young, la relación de Poisson y los parámetros de la envolvente de falla (que para el caso del criterio de Mohr-Coulomb corresponde al ángulo de fricción y la cohesión). Si bien los módulos elásticos pueden ser determinados con la rigidez matemática, debido a la definición propia de los mismos, para el caso de los parámetros de la envolvente de falla, se debe hacer un análisis gráfico para encontrar la línea envolvente que yace por encima de los círculos de Mohr correspondientes a cada presión de confinamiento evaluada y con base en ésta línea se deben encontrar parámetros de falla como el ángulo de fricción y la cohesión (que en su orden corresponden al ángulo de la pendiente de la recta y el punto de corte con el eje de las coordenadas).

5.6.3.1.1. Significado del criterio de falla de Mohr Coulomb:

En términos físicos, si un círculo de Mohr para estados particulares de esfuerzo, yace enteramente por debajo de la envolvente, el suelo está en condiciones estables (Ver Figura 7). Si el círculo de Mohr toca la envolvente, la resistencia máxima del suelo ha sido alcanzada, es decir, la falla ha ocurrido en un plano determinado.

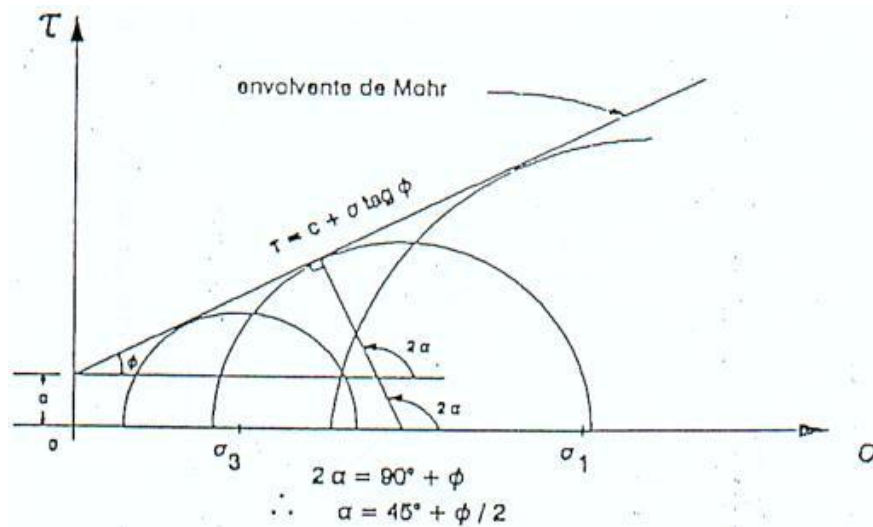


Figura 7. Envolvente de falla

Fuente: *Reservoir Geomechanics: Earth Stress and Rock Mechanics Applied to Exploration, production and Wellbore Stability - Mark Zoback*

5.6.3.1.2. Circulo de Mohr

El círculo de Mohr es una técnica usada en ingeniería para el cálculo de momentos de inercia, deformaciones y esfuerzos, adaptando los mismos a las características de un círculo (radio, centro). gráficamente cada esquina o corte del circulo con el eje x representa un esfuerzo tal y como se muestra en la figura 8.

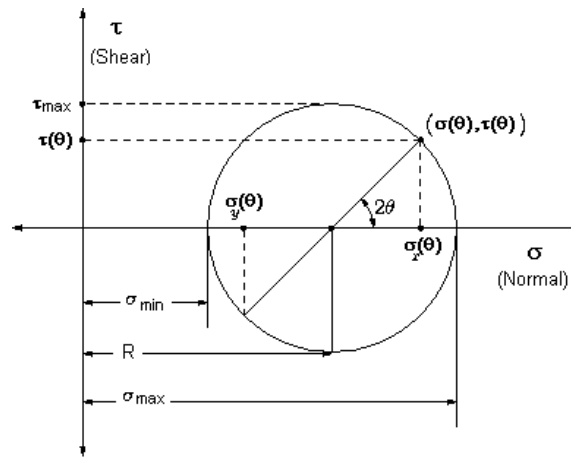


Figura 8. Representación del Círculo de Mohr.

Fuente: *Reservoir Geomechanics: Earth Stress and Rock Mechanics Applied to Exploration, production and Wellbore Stability - Mark Zoback*

5.6.3.1.3. Cálculo de la Envolvente de falla, Zoback.

Para encontrar la envolvente de falla, Zoback muestra una posibilidad para encontrar la envolvente que más se ajusta a los círculos de Mohr. Él asegura que la envolvente no siempre tiene forma lineal, puede ser una curva (Ver Figura 9^a), es decir la envolvente es una función polinomial, logarítmica o exponencial que pasa exactamente por encima de todos los círculo, luego a la función encontrada se le realiza su respectiva regresión y dará como resultado la envolvente ideal para los círculos de Mohr Coulomb (Ver Figura. 9^b).

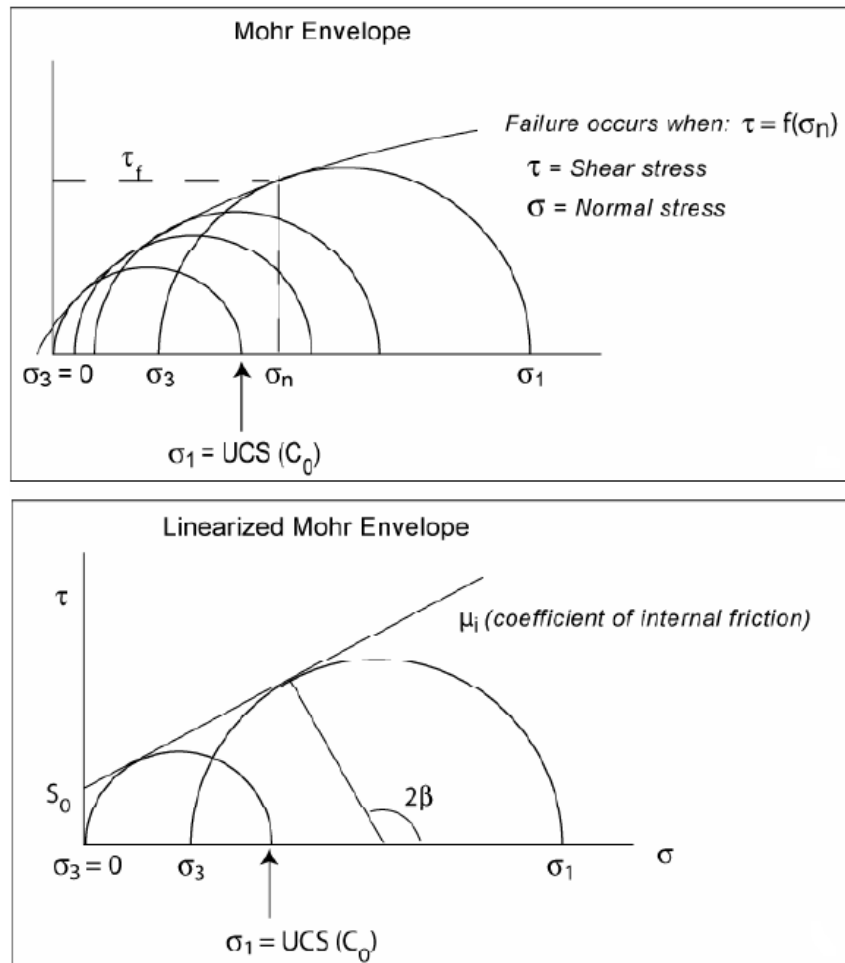


Figura 9. A) Función que más se ajusta a los círculos de Mohr Coulomb; B.) Linealización de la Función encontrada en el índice A.)

Fuente: *Reservoir Geomechanics: Earth Stress and Rock Mechanics Applied to Exploration, production and Wellbore Stability* - Mark Zoback

5.6.4. Ensayo de Indentación

5.6.4.1. Teoría del ensayo:

La prueba de indentación permite evaluar propiedades mecánicas en rocas tales como el módulo de elasticidad, la dureza del material, entre otros; El ensayo de indentación consiste en presionar un Indentador sobre la superficie la muestra, dejando una impresión sobre el material como se muestra en la

Figura 10. Dependiendo de la carga máxima aplicada y la geometría de la huella dejada se puede obtener el valor de la dureza.

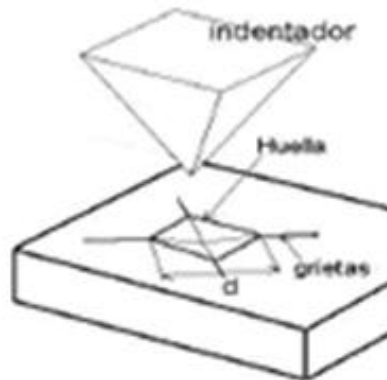


Figura 10. Huella en forma piramidal producida al aplicar una fuerza sobre el material a través de un indentador.

Fuente: artículo Técnicas de indentación: Medición de propiedades mecánicas en cerámicas

Algunos equipos de indentación permiten registrar la carga y los desplazamientos durante la aplicación de la carga y descarga, estos ensayos son conocidos como ensayos de dureza instrumentado o nanoindentación, donde aplican cargas entre 1 μN y 300 mN (30 gr), para ensayos de indentación elaborados en el LMR, se aplican cargas de hasta 30 N; haciendo desplazar el indentador una distancia máxima de 0.3 mm.

El indentador perfora la muestra en un proceso llamado carga, inmediatamente después el indentador se desplaza hacia afuera de la muestra en un proceso de descarga como se muestra en la Figura 11, estos procedimientos son medidos por un analizador de texturas (hardware del laboratorio: *TA.HD Plus Texture Analyser*), y graficados en un software llamado *Texture Exponent 32*.

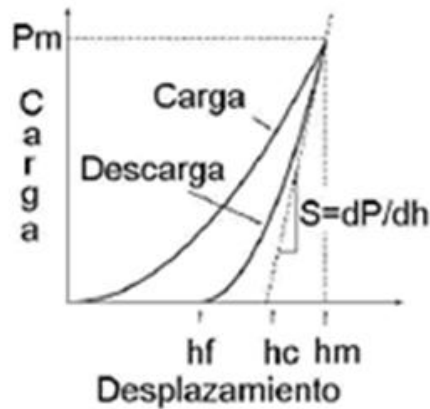


Figura 11. Proceso del indentador por cada una de las perforaciones sobre la muestra

Fuente: artículo Técnicas de indentación: Medición de propiedades mecánicas en cerámicas

La curva de carga contra desplazamiento ($p-h$) obtenida, permite calcular la dureza, el módulo de Young, entre otras propiedades.

La teoría desarrollada para el cálculo de dureza mediante ensayos de indentación, supone que la roca es idealmente elástico- plástico y que la muestra se hunde (Ver Figura 12) alrededor del indentador en vez de presentar apilamiento como se presenta en los materiales plásticos (para los cuales el ensayo presenta algunos errores).

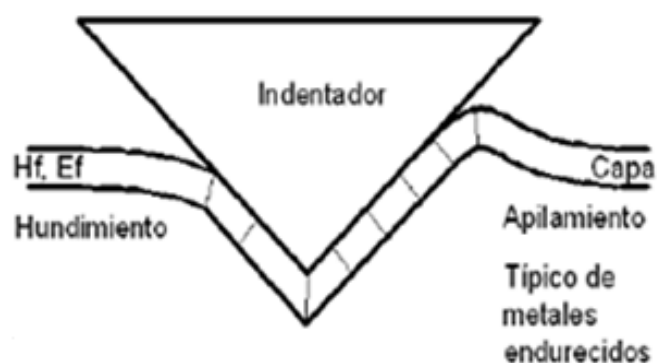


Figura 12. Hundimiento o Apilamiento según el material

Fuente: artículo Técnicas de indentación: Medición de propiedades mecánicas en cerámicas

5.6.5. Ensayo de Compresibilidad

5.6.5.1. Teoría del ensayo:

La compresibilidad de la roca al igual que la de los fluidos es un mecanismo de expulsión de hidrocarburos. Al comenzar la explotación de un yacimiento y caer la presión se expande la roca y los fluidos. La expansión de la roca causa una disminución del espacio poroso interconectado. La expansión de los fluidos tiende a contrarrestar el vaciamiento ocurrido por la producción de fluidos que a su vez causó la caída de presión. Ambos efectos van en la misma dirección, la cual es expulsar fluidos del espacio poroso interconectado. Este mecanismo de expulsión es especialmente importante en la producción de yacimientos subsaturados sin empuje de agua hasta que la presión baja hasta la presión de saturación. En el caso de la formación se definen tres tipos de compresibilidades:

- a) Compresibilidad de los Poros (C_p): Cambio fraccional en el volumen poroso por unidad en el cambio de presión.
- b) Compresibilidad de la matriz o compresibilidad de los granos: cambio en la en el volumen de la roca sólida con respecto al cambio unitario de presión.
- c) Compresibilidad Total de la Roca (C_b): para este ensayo se miden las compresibilidades anteriores.

Cuando se extrae fluido de una roca receptora, la presión interna cambia, aumentando la presión diferencial entre esta presión interna y la presión externa de sobrecarga que permanece constante. Esto trae como consecuencia el desarrollo de diferentes esfuerzos en la roca dando como resultado un cambio en la parte sólida, en los poros y por consiguiente en la roca total.³

³ **Fuente:** Blog de petróleos, Caracterización de Yacimientos de Jesús Manucci.

Una vez se ha preparado la muestra y esta lista para ensayar, en el laboratorio de mecánica de rocas, pueden hacer el cálculo de la compresibilidad colocando la muestra en la máquina MTS 185 y aplicando una presión de confinamiento creciente y constante sobre la roca o muestra; la presión de confinamiento es el único esfuerzo sobre la muestra, y este es alrededor de todo el volumen de la muestra como se muestra en la Figura 13.

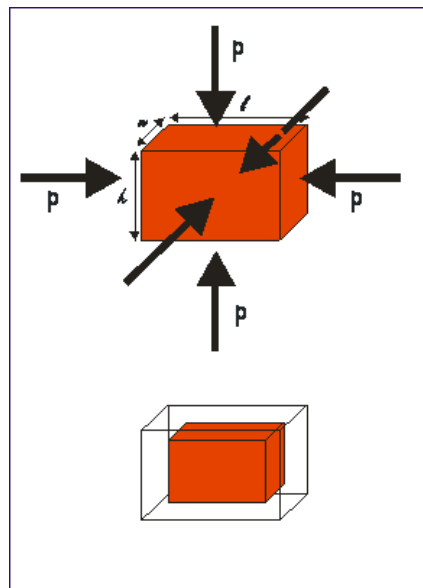


Figura 13. Prueba de compresibilidad de la roca, esfuerzos a través de ella por todo su volumen.

Fuente: artículo Técnicas de indentación: Medición de propiedades mecánicas en cerámicas

5.7. ANEXO DE PRUEBAS YA REALIZADAS

5.7.1. Brazilian Test

También llamada prueba de tracción indirecta, Brazil test o de resistencia a la tensión, este ensayo mide el esfuerzo a la tracción de la roca y consiste en la compresión en el punto de soporte de una muestra cilíndrica. Con esta prueba se halla la resistencia a la tensión inducida (T_0). Asumiendo que la roca es

homogénea e isotrópica y que la elasticidad lineal se mantiene, la fractura primaria empezará en tensión desde el centro del espécimen.⁴ (ver Figura 14)

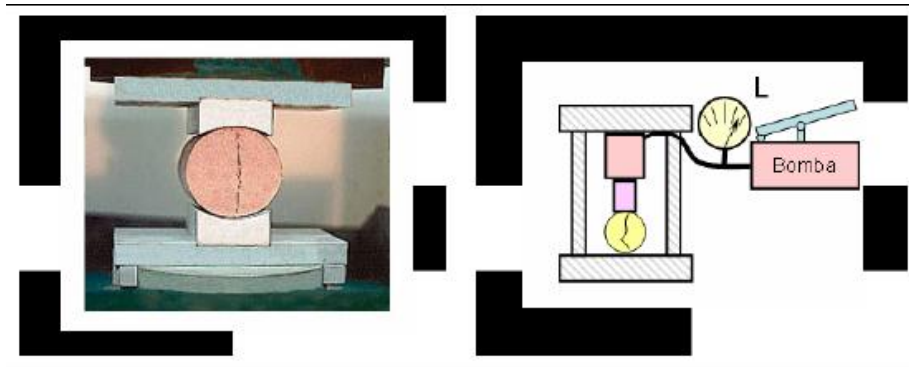


Figura 14. Brazilian Test.

Fuente: CABRERA J. R., and DE GENNARO S. *Aplicaciones Prácticas de la Geomecánica en la Industria Petrolera y Gasífera*, ICP, Diciembre 2003.

5.7.2. Compresión Uniaxial

La prueba consiste en someter a carga un cilindro recto de muestra de roca con una presión de confinamiento igual a cero hasta que esta falle (Figura 15). La prueba es una de las más convenientes y útiles para la determinación de las propiedades de la roca.

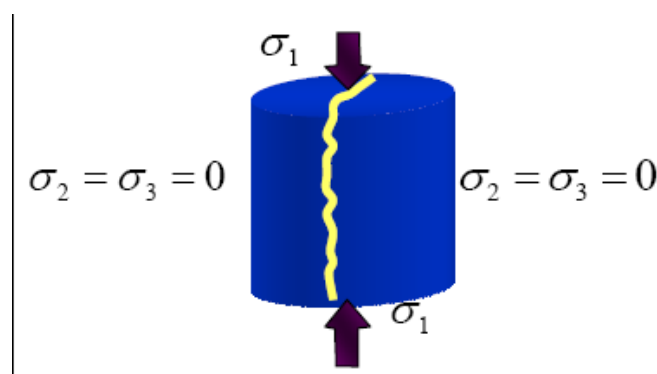


Figura 15. Compresión Uniaxial

⁴CABRERA J. R., and DE GENNARO S. *Aplicaciones Prácticas de la Geomecánica en la Industria Petrolera y Gasífera*, ICP, Diciembre 2003.

Fuente: CABRERA J. R., and DE GENNARO S. *Aplicaciones Prácticas de la Geomecánica en la Industria Petrolera y Gasífera, ICP, Diciembre 2003.*

5.7.3. Compresión Triaxial

La prueba triaxial es usualmente realizada incrementando la carga axial y de confinamiento simultáneamente hasta un nivel de esfuerzo definido (Ver Figuras 6 y 7). Entonces, la presión de confinamiento es mantenida constante mientras la carga axial se va incrementando hasta que la falla ocurra (Ver Figura 16)

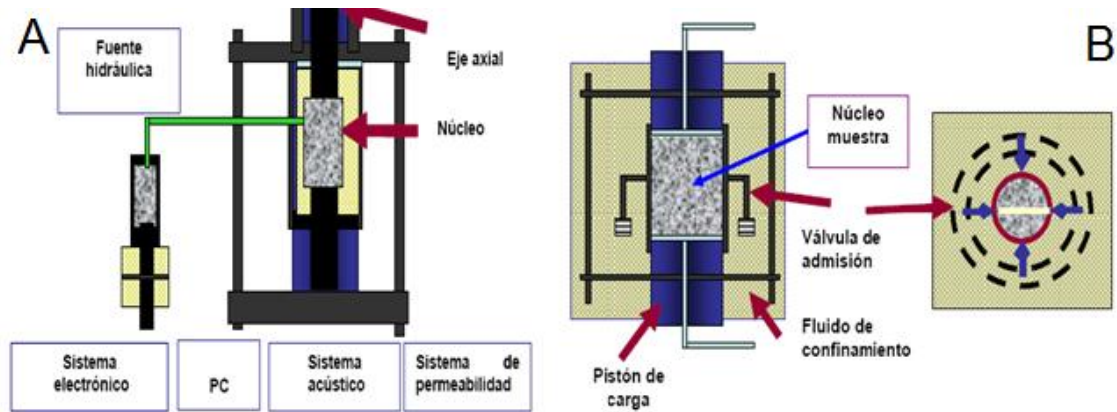


Figura 16. A.) Diagrama esquemático LMR. B.) Bosquejo del principio de la celda Triaxial

Fuente: FJAER E., and RASMUS R. *Petroleum Related Rock Mechanics,* 1996.

6. ESTADO DEL ARTE

6.1. BITÁCORA DE LA ROCA EN EL LABORATORIO

El ciclo de vida de la roca comprende todo el proceso realizado con las muestras de material rocoso desde que el cliente envía una solicitud de servicio al líder del laboratorio, pasando por la recepción de la muestra en el Centro de Recepción de Muestras (CRM); el ensayo y la preparación en el laboratorio; hasta que finalmente se crea un reporte de resultados con las características geomecánicas del material según la solicitud inicial del cliente.

6.1.1. Solicitud de Servicio y Recepción en el CRM.

Todo el proceso comienza cuando un cliente de cualquier parte del país expone la necesidad de realizar un determinado ensayo a un espécimen rocoso mediante una solicitud de servicio, ésta es recibida por el líder del Laboratorio de Mecánica de Rocas (LMR) quien se encarga de generar una nueva solicitud al CRM en función de las necesidades del cliente. Esta solicitud es posteriormente vinculada a la muestra recibida en el CRM mediante un número serial y finalmente es allí donde se realiza un reporte de ingreso de la muestra que luego es subido a la base de datos del ICP denominada SILAB (Ver Figura 17), la cual entre otras cosas lleva un registro detallado de todas las muestras que son ingresadas al laboratorio.

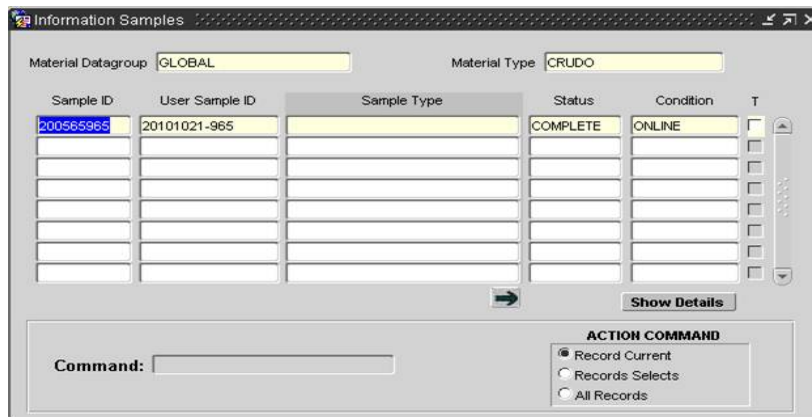


Figura 17. Ingreso a la base de datos SILAB de una muestra.

Fuente. Laboratorio Mecánica de Rocas, ICP.

Ninguna muestra puede ser procesada en el laboratorio sin haberse registrado en el SILAB y sin una previa autorización del líder del laboratorio.

Los ensayos que el cliente puede solicitar al laboratorio son los siguientes:

- Compresión Uniaxial:
 - Estática
 - Dinámica
 - Resistencia Tensil
- Compresión Triaxial
 - Estática
 - Dinámica
 - Envolvente de Falla Múltiple
 - TWC
- Compresibilidad
 - Bulk
 - Solido
 - Hidrostática
 - Triaxial
- Tomografía Acústica
- Dureza de Fractura
- Ensayo de Permeabilidad

- Módulos
- UCS

6.1.2. Ingreso de la muestra en el LMR

Luego de que el CRM realiza la vinculación solicitud-muestra y se realiza la posterior subida del reporte de ingreso de la muestra, ésta ya puede ser llevada al laboratorio, el cual debe reportar la llegada de la muestra.

Seguido de esto se toman mínimo cuatro fotografías frontales para identificar el estado de la muestras. Luego se llena un formato de ingreso al LMR.

Debido a que en la mayoría de los casos las muestras no llegan en condiciones aptas para realizar los ensayos, el ingeniero encargado de interpretar la prueba debe decidir que procedimientos realizar con el fin de dejar la muestra en las condiciones necesarias para realizar la interpretación.

Las condiciones aptas para realizar un ensayo establecen que la muestra debe ser cilíndrica, con una longitud igual a dos veces el diámetro de su cara plana, y el desfase en la planitud no puede ser mayor a 0.025 mm. En algunos casos los clientes solicitan ensayar muestras de diferentes tamaños, pero el 90% de las veces las rocas son ensayadas bajo estas especificaciones.

6.1.3. Procesos para Preparar la Muestra

Los procedimientos utilizados para preparar la muestra a ensayar son los siguientes:

6.1.3.1. Corte y Pre-pulido

En ocasiones es necesario realizar un corte y un pre-pulido de la muestra antes del pulido principal, ya que la muestra puede encontrarse demasiado irregular como para poder obtener mediciones coherentes con los instrumentos.

Un ejemplo de lo anterior se presenta cuando se intenta medir la planitud de la muestra con un instrumento denominado Comparador de Caratulas. Éste

presenta una sensibilidad bastante alta, de manera que si la muestra presenta muy baja planitud, el instrumento no permite determinar conclusiones coherentes.

6.1.3.2. Perfilado

Se realiza un perfilado o corte de la muestra cuando sus caras planas son bastante irregulares para ser desbastadas. También es necesario perfilar cuando se desea acortar la longitud de la muestra ya que puede ser demasiado larga con respecto a las condiciones estándares de longitud anteriormente mencionadas.

6.1.3.3. Pulido

El pulido a la muestra es realizado para corregir imperfecciones en las caras planas de la muestra luego de ser perfilada o cortada. También es necesario pulir cuando la muestra es solo un poco más larga con respecto a las condiciones estándares anteriormente mencionadas, pero este excedente no es lo suficiente para poder perfilar la muestra.

6.1.4. Toma de medidas Antes de Pulir

Para poder decidir con precisión que procedimientos de preparación deben realizarse a la muestra, es necesario tomar un conjunto de medidas para identificar sus características físicas.

6.1.4.1. Medición Longitudinal

Dicha medición se realiza dividiendo las dos caras planas del cilindro en ocho partes iguales y posteriormente unir cada punto extremo de dicha división para unir las parejas de puntos trazando ocho líneas rectas a través de la muestra. (Ver Figura 17).

6.1.4.2. Medición Diametral

Consiste en dividir la longitud de la muestra en ocho partes iguales y trazar una circunferencia en cada uno de los puntos.

A continuación utilizando el calibrador, se dispone a medir tanto longitudinal como diametralmente la muestra en cada uno de los 8 pares de puntos. Con el fin de observar las imperfecciones en la muestra. Cada una de estas medidas es anotada en la Bitácora de dimensión geométrica (Ver Figura 18).

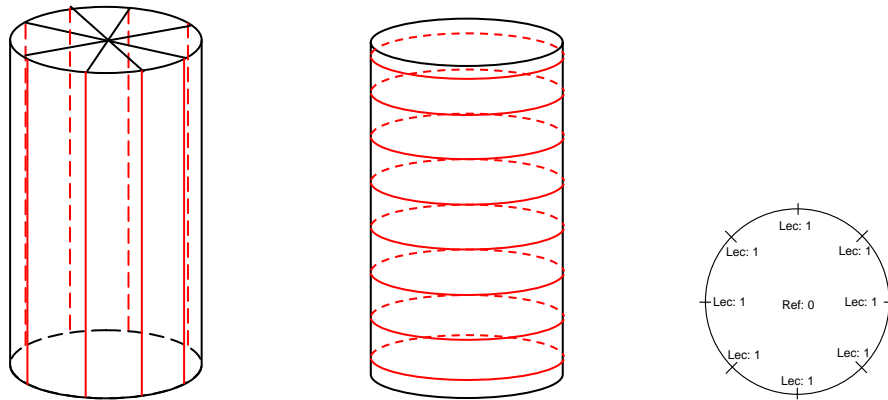


Figura 18. Preparación de la muestra para medición dimensional (Longitudinal y Diametral).

Fuente. Laboratorio de Mecánica de Rocas, ICP.

6.1.4.3. Medición de Planitud

Esta medición es realizada con un instrumento denominado Indicador de Carátula, el cual es utilizado para detectar los altibajos presentes en las caras planas de la muestra cilíndrica.

Este procedimiento es realizado ubicando primero la punta del instrumento en el centro de la cara plana de la muestra, y posteriormente desplazando la punta del instrumento hasta uno de los extremos de esta cara. Dicho procedimiento se repite con cada uno de los ocho puntos superficiales marcados sobre la cara plana de la muestra cuando se realizó la medición longitudinal. Los valores que finalmente se anotan en la bitácora de dimensión geométrica corresponden a la diferencia del valor marcado por el instrumento cuando la muestra se ubica en el centro del mismo menos el valor de cada uno de los extremos (Ver Figura 19).

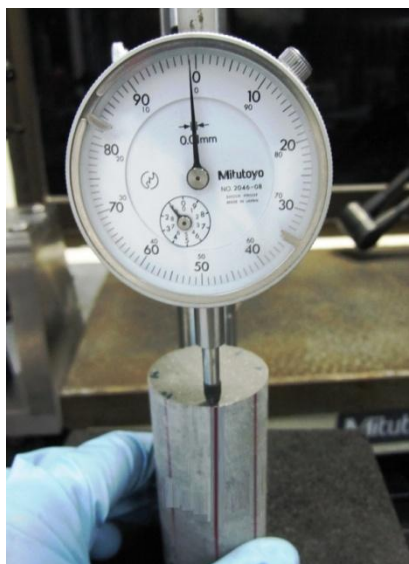


Figura 19. Medición de la planitud utilizando el Indicador de Caratulas

Fuente. Laboratorio de Mecánica de Rocas, ICP.

6.1.4.4. Medición de Cilindricidad

Esta medición es realizada con el fin de evaluar el grado de cilindricidad de la muestra rocosa, ya que algunas muestras recibidas en el laboratorio pueden tener una ligera forma cónica y es necesario que ésta sea lo más cilíndrica posible.

Éste procedimiento es realizado de igual manera con el Indicador de Caratula con ayuda de un bloque en V que tiene una cavidad calibrada perfectamente a 90 grados sobre la cual se ubica la muestra y su función mantener el Especimen de forma perpendicular a la base del instrumento de medición de la manera en que se observa en la figura (Ver Figura 20).

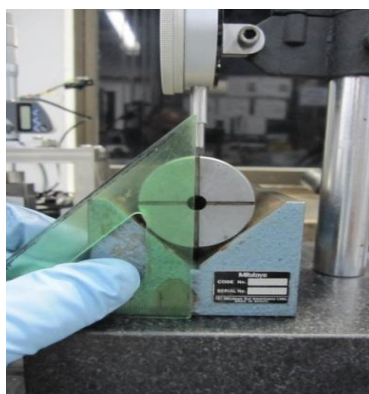


Figura 20. Montaje para medición de Cilindricidad

Fuente. Laboratorio de Mecanica de Rocas

El espécimen es desplazado de manera perpendicular sobre la base del Indicador de caratula, de manera que la punta de dicho instrumento pase por cada uno de los ocho puntos marcados anteriormente para realizar la medición diametral.

En la bitácora de dimensión geométrica son anotados tres valores:

- 1) Valor inicial: Corresponde al valor marcado por el reloj en la posición (i)
- 2) Valor Final: Corresponde al valor final marcado por el reloj en la posición (i+1).
- 3) Diferencial: Corresponde a la diferencia entre el valor final y el valor inicial, permitiendo establecer el grado de cilindricidad.

MEDICIÓN DE GEOMETRÍA, MASA Y VOLUMEN EN MUESTRAS DE ROCA												
SERVICIOS ESPECIALIZADOS DE TECNOLOGÍA												
SERVICIOS DE LABORATORIO Y PLANTA PILOTO												
CODIGO			Elaborado			Versión:						
UST-151-F-002			17/11/2010			6						
I. INFORMACIÓN GENERAL												
Fecha (DD/MM/YYYY):		Sample ID:			Submission ID:							
# SCCPL:		Nombre del Pozo:			Prorundidad (m):							
Nombre del Proyecto:		Registrado por:			# Registro:		Firma:					
ANTES DE PULIR			DESPUÉS DE PULIR			MASA						
Posición	LONGITUD-A		DIAMETRO-B		Posición	LONGITUD-A		DIAMETRO-B		Posición	Final (gr)	
	Inicial (mm)		Inicial (mm)			Final (mm)		Final (mm)			Promedio	#DIV/0!
1					1					1		
2					2					2		
3					3					3		
4					4					4		
5					5					5		
6					6					Promedio	#DIV/0!	
7					7					Desviación	#DIV/0!	
8					8					VOLUMEN (cc)		
Promedio	#iDIV/0!		#iDIV/0!		Promedio	#iDIV/0!		#iDIV/0!				
Desviación	#iDIV/0!		#iDIV/0!		Desviación	#iDIV/0!		#iDIV/0!				
ANTES DE PULIR					DESPUÉS DE PULIR							
Posición	PLANITUD		CILINDRICIDAD		Posición	PLANITUD		CILINDRICIDAD				
	Diferencial (mm)	Inicial (mm)	Final (mm)	Diferencial (mm)		Diferencial (mm)	Inicial (mm)	Final (mm)	Diferencial (mm)			
1				0	1				0			
2				0	2				0			
3				0	3				0			
4				0	4				0			
5				0	5				0			
6				0	6				0			
7				0	7				0			
8				0	8				0			
Maximo	U			U	Maximo	U			U			

Figura 21. Bitácora de dimensión geométrica realizada en Excel

Fuente. Laboratorio de Mecánica de Rocas, ICP.

6.1.5. Pulido y Medidas Finales

Luego de haber realizado dichas mediciones, la muestra pasa a un proceso de pulido realizado por el Equipo Pulidor de Superficies Coretest EFG-450 con el fin de mejorar la apariencia de la muestra, corrigiendo las imperfecciones para finalmente hacer que el espécimen se encuentre bajo los rangos aceptables para realizar los ensayos de laboratorio.

Después de realizar el pulido del espécimen se repiten nuevamente las cuatro medidas realizadas antes de pulir junto con cinco mediciones de la masa y una medición del volumen, esto con el fin de observar las propiedades geométricas y físicas de la muestra y poder decidir si la ésta pudo ser llevada a las condiciones aptas para realizar el ensayo.

Si después de realizar el proceso de pulido, no es posible llevar la muestra a dichas condiciones, se dice que la muestra es no apta y según las especificaciones del cliente, se decide o no realizar los ensayos solicitados, sin antes advertir que los resultados pueden contener un mayor grado de error.

Esta decisión es tomada por el líder del laboratorio quien se encarga de revisar las medidas anotadas en la Bitácora de dimensión geométrica por el ingeniero encargado de realizar la preparación de la muestra. En base a esta información, el líder del laboratorio decide si aprobar o no la realización de los ensayos solicitados por el cliente.

6.1.6. Saturación

Según el cliente desee, algunos ensayos pueden requerir de un proceso de saturación como una preparación final. Dicho proceso consiste en llenar los poros de la muestra de ciertos fluidos tales como:

- Aire
- Agua
- Salmuera
- Aceite

Esto depende principalmente de dos aspectos fundamentales

- 1) Permeabilidad: indica el grado de dificultad con la cual un fluido llena o abarca los poros de una muestra. Éste a su vez depende de la porosidad, medida que representa la relación del volumen de los poros con el volumen de los granos.
- 2) El tipo de organización de los granos.

La información que debe ser llenada en la Bitácora de este tipo de procedimiento es la siguiente:

Longitud (cm): Longitud de la muestra la cual en condiciones estándares debe ser dos veces el diámetro.

Diámetro (cm): Diámetro de la muestra en condiciones estándares debe ser la mitad de la longitud de la muestra.

Volumen Total: El volumen de los granos sumado al volumen de los poros

Porosidad (%): Relación porcentual entre el volumen de los granos y el volumen de los poros, el cual para efectos de realizar la saturación, debe ser menor a 45,3%.

Volumen Poroso: Volumen ocupado por los poros en la muestra.

Peso Inicial (gr): Peso de la muestra

Fluido de Saturación: Tipo de fluido que va a llenar los poros después de que la muestra está en estado de vacío.

Densidad del Fluido (g/cm): Es la relación de masa sobre el volumen presente en el fluido de saturación, la cual no puede ser menor a 2 gr/cm^3 y a su vez mayor a $0,7 \text{ gr/cm}^3$.

Esta tarea es monitoreada midiendo el grado de disminución de la masa del especimen a medida que pasa el tiempo en la cámara de vacío con respecto al estado inicial, ya que es de esperarse que al sacar el aire de los poros, el espacio vacío sea llenado por el fluido de saturación, y por lo tanto la masa total de la muestra aumenta.

Dicho monitoreo se realiza sacando periódicamente la muestra de la cámara de vacío; midiendo su masa y finalmente volviendo a introducirla en la cámara. La frecuencia de repetición de este procedimiento es realizada dependiendo de la permeabilidad y la porosidad de la muestra.

6.1.7. Toma de Medidas a Muestras Irregulares

En algunos casos, la muestra puede ser demasiado irregular como para ser convertida en forma cilíndrica; o es importante conservar la forma original de la muestra, haciendo necesario utilizar otro tipo de procedimientos para obtener las medidas de la misma.

6.1.7.1 Medición del Volumen

Debido a que no es posible calcular el volumen de una figura irregular con las formulas convencionales, se debe utilizar el principio de Arquímedes para poder obtener este valor, el cual afirma que el volumen de un cuerpo total o parcialmente sumergido en un recipiente con cierto liquido, es igual a la cantidad del volumen del liquido desplazado.

En consecuencia la muestra es envuelta en un papel de arena para evitar su contaminación o saturación, y a continuación es sumergida en una probeta con líquido. De esta manera podrá apreciarse el volumen de la muestra observando la subida de nivel de dicho líquido.



Figura 22. Ejemplo del principio de Arquímedes

Fuente. http://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Arqu%C3%ADmedes

Dicha medición es realizada cinco veces y posteriormente anotada en la bitácora de muestras irregulares, con el fin de promediar estos valores y disminuir el margen de error.

6.1.7.2 Longitud Eje Principal

Corresponde a la medición del eje de mayor longitud de la muestra. Dicha medida es realizada cinco veces con el fin de reducir el margen de error.

6.1.7.3 Masa

Corresponde a la medición de la masa de la muestra, la cual es realizada con la ayuda de una balanza. De la misma manera se realizan cinco mediciones.

6.1.7.4 Volumen de SandWrap paper utilizado

Corresponde al volumen del papel arena utilizado a la hora de calcular el volumen de la muestra. Esta medida debe ser restada al volumen total de la muestra encontrado utilizando el principio de Arquímedes para conocer el volumen real de la misma.

Finalmente y luego de haber realizado los procedimientos necesarios para la preparación de la muestra, se realiza el embalaje de la misma en un frasco plástico que contiene un código de barras y una identificación, la cual es utilizada para consultar en el SILAB el tipo de ensayo a realizar.

6.1.8 Realización del Ensayo y Reporte de Resultados

Luego de haber realizado la preparación de la muestra y de que ésta haya sido considerada apta por el líder del laboratorio, se procederá a realizar los ensayos que el cliente ha solicitado.

Cada ensayo es realizado con la ayuda de una maquina especializada, la cual arroja un archivo de datos que debe ser interpretado por el ingeniero encargado de realizar la prueba.

Luego de esta interpretación y de realizar el análisis de dicho archivo, se debe realizar el registro de resultados en un libro destinado para dicho fin, el cual es posteriormente revisado por el líder del laboratorio, quien finalmente se encarga de aprobar o no la realización del ensayo en base a los resultados obtenidos.

Después de que los resultados son verificados, el ingeniero encargado de realizar la interpretación, debe realizar un reporte de resultados y en ocasiones, según el cliente lo requiera, un informe técnico más detallado de la realización de los ensayos. Estas actividades requieren de una buena cantidad tiempo que puede ser utilizado en la interpretación de nuevos especímenes que llegan al laboratorio.

Debido a lo anteriormente mencionado y a que al laboratorio continuamente están llegando muestras para preparar y ensayar; la realización de dichos reportes esta generalmente atrasada alrededor de un 90%, lo cual indica que de 10 muestras preparadas y ensayadas, a solo una se le ha realizado los respectivos reportes de resultados.

6.2. INTERPRETACIÓN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas son interpretadas actualmente con Microsoft Office Excel, el cual a pesar de presentar numerosas ventajas en lo que corresponde a cálculos matemáticos y al manejo de grandes volúmenes de datos, no es un software hecho a la medida; y no satisface todas las necesidades presentes en la realización de las pruebas.

Una de las desventajas más grandes que se presenta en la interpretación de pruebas es que se tarda más tiempo del necesario analizando e interpretando cada ensayo, ya que se deben realizar procedimientos manualmente, como copiar datos de una casilla a otra para realizar cálculos posteriores, lo que puede ocasionar pérdidas de información y errores al seleccionar algún dato incorrecto.

Por otra parte, ciertos resultados de algunos ensayos obtenidos en Excel necesitan de una interpretación gráfica posterior, ya sea con las herramientas que Excel incluye o exportando resultados a otro programa que grafique; por esto se hace necesario incluir en la herramienta un entorno que sea capaz de graficar y ayude a facilitar la interpretación de los datos y además evite transportar información manualmente evitando que se pierdan datos en éste proceso.

Actualmente en el laboratorio de mecánica de rocas (LMR) se desarrollan varios ensayos tanto destructivos (estáticos) como no destructivos (dinámicos) sobre una muestra de roca extraída de algún yacimiento o suministrada por alguna Universidad o cliente del ICP, con el fin de conocer propiedades mecánicas de éstas. Para la correcta interpretación de una prueba se hace necesario conocer la norma internacional que describe tanto la teoría como el procedimiento de ensayo del laboratorio; El laboratorio de Mecánica de Rocas se basa en las normas ASTM para interpretación de muestras rocosas.

Los Ingenieros Cesar Ochoa y Laura Galvis, analizaron e interpretaron tres pruebas en Java que fueron: Compresión Uniaxial, Compresión Triaxial y Brazilian Test (Tensión Indirecta).

Para todos los ensayos la muestra llega al laboratorio de mecánica de rocas y allí se prepara y se deja lista para su análisis, el resto del procedimiento depende del tipo de prueba.

6.2.1. **Ensayo Acústico:**

6.2.1.1. Procedimiento del laboratorio:

La prueba acústica trae consigo un paquete de señales de ondas P, ondas S y en algunos casos trae señales S1 y S2 (ambas señales poseen la misma naturaleza). Cada una de estas señales tiene inicialmente un tiempo donde se encuentra ruido debido a la calibración de la muestra con el equipo o factores externos al desarrollo de la muestra, es por eso que antes de comenzar con la

interpretación es necesario conocer el punto inicial de la señal, que actualmente es obtenido de manera subjetiva en el laboratorio. Un integrante del laboratorio selecciona la señal y con base a la experiencia obtenida, hace un “picado de onda” donde considera que la señal inicia, luego agrega una a una las señales obtenidas y va picando cada una de ellas hasta obtener el punto inicial de todas ellas.

Por cada prueba se pueden encontrar alrededor de cien ondas para picar. Después de encontrados los diferentes puntos iniciales, los datos son llevados uno a uno a unas tablas desarrolladas en Excel, donde se hacen los diferentes cálculos (ver Figura 23), el encargado del laboratorio obtiene las diferentes velocidades y con la longitud de la muestra y la densidad, obtiene el Módulo de Young y la Relación de Poisson.

Tiempo P leído (ms)	Tiempo S1 leído (ms)	Tiempo S2 leído (ms)	Velocidad P (m/s)	Velocidad S1 (m/s)	Velocidad S2 (m/s)	Young S1 (Pa)	Young S2 (Pa)	Poisson S1	Poisson S2
28.3	58.2	57.5	4759.12	2149.72	2168.19	3.34E+10	3.39174E+10	0.37	0.36904
28.3	58.2	57.5	4759.12	2149.72	2168.19	3.34E+10	3.39174E+10	0.37	0.36904
28.3	58.2	57.5	4759.12	2149.72	2168.19	3.34E+10	3.39174E+10	0.37	0.36904
28.3	58.2	57.5	4759.12	2149.72	2168.19	3.34E+10	3.39174E+10	0.37	0.36904
28.3	58.2	57.5	4759.12	2149.72	2168.19	3.34E+10	3.39174E+10	0.37	0.36904
28.3	58.2	57.5	4759.12	2149.72	2168.19	3.34E+10	3.39174E+10	0.37	0.36904
28.3	58.2	57.5	4759.12	2149.72	2168.19	3.34E+10	3.39174E+10	0.37	0.36904
28.3	58.2	57.5	4759.12	2149.72	2168.19	3.34E+10	3.39174E+10	0.37	0.36904
28.3	58.2	57.5	4759.12	2149.72	2168.19	3.34E+10	3.39174E+10	0.37	0.36904

Figura 23. Datos calculados con Excel

Fuente: Laboratorio de mecánica de rocas

Picado de onda: este proceso consiste en seleccionar un punto donde se considera que la señal comienza; este proceso se valida con el líder del laboratorio que experimentalmente va verificando en señal que el punto sea certero; se hacen los cálculos de la velocidades y de los módulos y con base a este resultado se verifica la veracidad del punto encontrado. Valores certeros se establecen con el módulo de Young desde los cientos de miles hasta millones de PSI y la Relación de Poisson no mayor a 0.5 (cero punto cinco); los valores dinámicos son validados con los valores estáticos por la siguiente relación:

$$ValorComparación = \frac{ValorDinámico}{ValorEstático} \quad Ecuación 1$$

El *ValorComparación* no debe ser mayor del 30%. (0.3)

En caso de encontrar un resultado muy diferente al esperado para los módulos, se procede a picar nuevamente la señal hasta encontrar un *ValorComparación* entre los rangos estimados; el software que utilizan actualmente para picar las señales es un programa desarrollado en Matlab que devuelve el punto donde se hace click con el mouse (ver Figura 24).

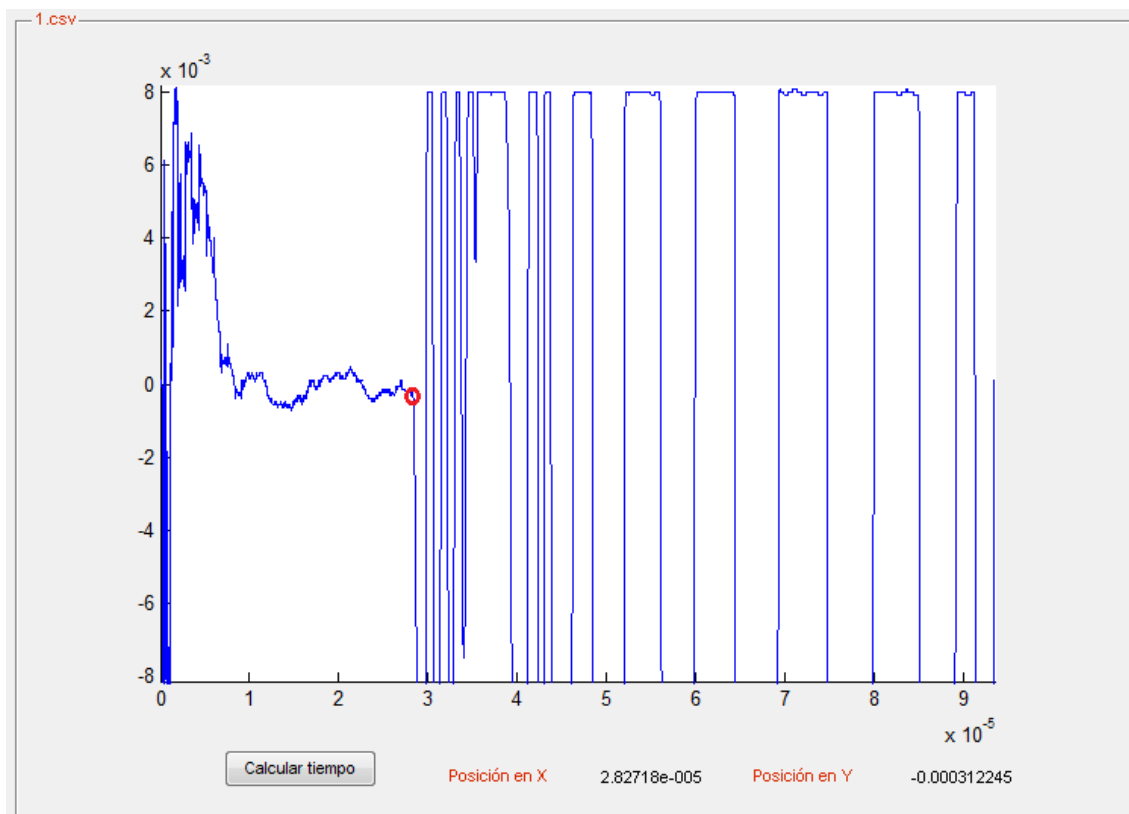


Figura 24. Señal P picada con el Software actual en el laboratorio

Fuente: Laboratorio de mecánica de rocas, ICP

6.2.1.2. Tiempo estimado para la interpretación:

Para interpretar una prueba acústica, el gasto de tiempo depende del número de señales que haya que picar, haciendo de éste ensayo, el más demorado en el laboratorio, este proceso puede llegar a tardar hasta doce horas en solo los cálculos de resultados.

Tiempo aproximado total: 12 horas.

6.2.2. Ensayo de Envolvente de falla múltiple:

6.2.2.1. Procedimiento del laboratorio

Una vez lista y preparada la muestra, se acomodan los diferentes extensómetros o instrumentos de medición necesarios para los cálculos de la deformación en el tiempo, se instala dentro de la MTS185 y se somete a las diferentes fuerzas y presiones. Segundo a segundo se va registrando bajo la exactitud de la MTS, la fuerza axial aplicada, la presión de confinamiento y las deformaciones de la muestra.

Ensayos para determinar la envolvente de falla: En el laboratorio de mecánica de rocas del ICP se realizan dos tipos de ensayo para determinar la envolvente de falla; el primero es conocido como envolvente de falla múltiple.

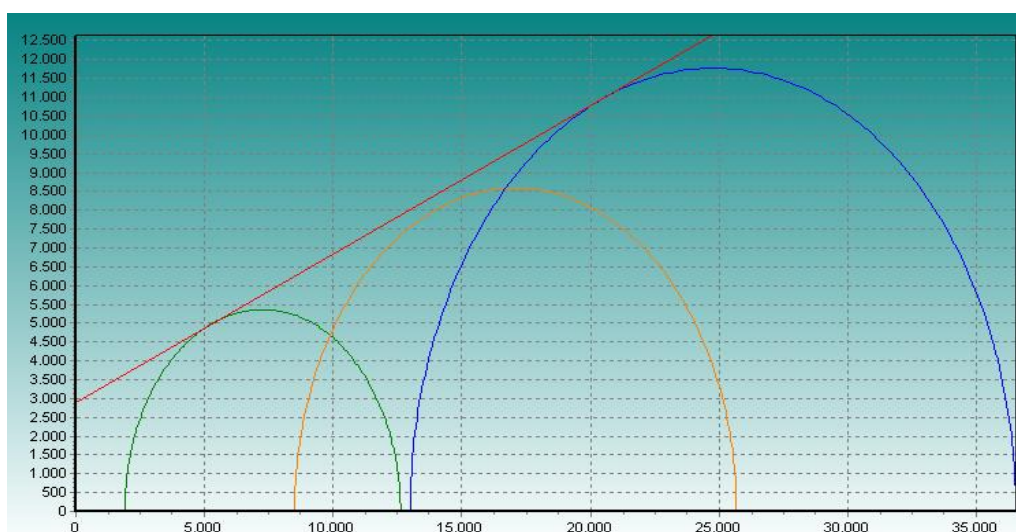
En este método la muestra se somete a una presión de confinamiento constante y se aplica sobre ella una fuerza axial variable y ascendente, el personal técnico que desarrolla la prueba va observando detalladamente el cambio en las deformaciones de la roca y en el momento que ésta va a fallar (se identifica con el cambio de la pendiente de la curva de deformación con el tiempo), se aumenta el confinamiento instantáneamente para recuperar la roca; de ésta forma obtiene el primer ascenso. Éstos pasos se repiten hasta llegar al último círculo de Mohr-Coulomb planteado en el diseño experimental. En éste último círculo el técnico que realiza el ensayo deja que la muestra falle.

El segundo, corresponde a la prueba de falla convencional, que se obtiene cuando se realiza una serie de pruebas triaxiales independientes, es decir, en cada muestra se aplica una sola presión de confinamiento y se aumenta la fuerza axial hasta producir el Fracturamiento de la muestra.

Una vez obtenidos los datos son registrados en un archivo al que se le da el nombre de "Specimen.dat" y éste se almacena en disco para su análisis; dicho análisis se realiza en un archivo prediseñado hecho en Microsoft office Excel, el

cual consta de varias páginas; en la primera se copian todos los datos del archivo original, en la segunda se realizan cálculos dato por dato de esfuerzo aplicado en dirección axial y promedio, deformaciones axial, diametral y volumétrica; la tercera hoja tiene los datos del primer círculo de Mohr evaluado y en ella se calculan adicionalmente, el Módulo de Young y la Relación de Poisson y se selecciona el esfuerzo máximo aplicado, las siguientes hojas corresponden a los diferentes ascensos encontrados en la prueba, lo cual se realiza considerando las diferentes presiones de confinamiento encontradas, cada una de ellas representa un círculo de Mohr dado, en cada caso, se debe también seleccionar el máximo esfuerzo aplicado en dirección axial, la penúltima hoja se registran los esfuerzos máximos aplicados en cada círculo junto con su presión de confinamiento respectiva en ella se calculan los radios y los centros de los círculos de Mohr de la envolvente de falla de la roca. La última hoja llamada “Resultados” contiene estos nuevos resultados incluidos los parámetros de cada círculo.

Terminado el procedimiento del cálculo de círculos, se acude a un programa diferente llamado *Envolventes*⁵, éste programa tiene como datos de entrada los centros y radios de los círculos almacenados en un archivo de texto (.txt); y permite determinar la envolvente de falla basándose en los círculo 3 y círculo 1 (Ver Figura 25).



⁵ Software Envolventes, Cálculo de la envolvente de falla – Publio Alejandro Sandoval

Figura 25. Cálculo de la línea envolvente actualmente en el LMR

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Rocas, Software *Envolventes*

Encontrada la envolvente, se determina el punto de corte con el eje Y, a éste punto se le conoce como Cohesión, y se calcula el ángulo de la envolvente con respecto al eje horizontal (el cálculo para este ángulo puede ser encontrado con base a la pendiente que es conocida); Éste se conoce como ángulo de fricción interna (AFI).

Finalmente se procesan éstos nuevos resultados copiando la información del programa *Envolventes* nuevamente en Excel, para finalmente reunir todos los resultados y visualizarlos.

6.2.2.2. Tiempo estimado para la interpretación:

El proceso de interpretación de una prueba de envolvente de falla múltiple se hace lento debido al manejo de todos los datos; además hay que traspasar datos de un software a otro diferente y para esto utilizan el blog de notas al cual le envían los datos (copiados) desde Excel, para luego leerlos con el programa *Envolventes*. El tiempo aproximado de interpretación es de dos horas y cuarenta minutos.

Tiempo total aproximado: 2h 40 min.

6.2.3. Ensayo de Indentación:

6.2.3.1. Procedimiento del laboratorio:

En el laboratorio de mecánica de rocas (LMR), se desarrollan ensayos de indentación exclusivamente para rocas con geometría irregular; en dichos ensayos es preparada sumergiéndola en un epóxico de dos fases, el cual al solidificarse le da una forma cilíndrica como se muestra en la figura 26, luego se coloca y se ajusta en el *TA.HD Plus Texture Analyser*.



Figura 26. Muestra rocosa preparada para ensayo de Indentación

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Rocas

Seguidamente ajustan el indentador arriba de la roca y lo preparan para hacer la primera perforación. Luego se hacen nuevas perforaciones para diferentes ubicaciones sobre la superficie de la muestra, el software *Texture Exponent* va registrando el periodo de carga y descarga por cada una de las perforaciones de la muestra, tal como se muestra en la Figura 27.

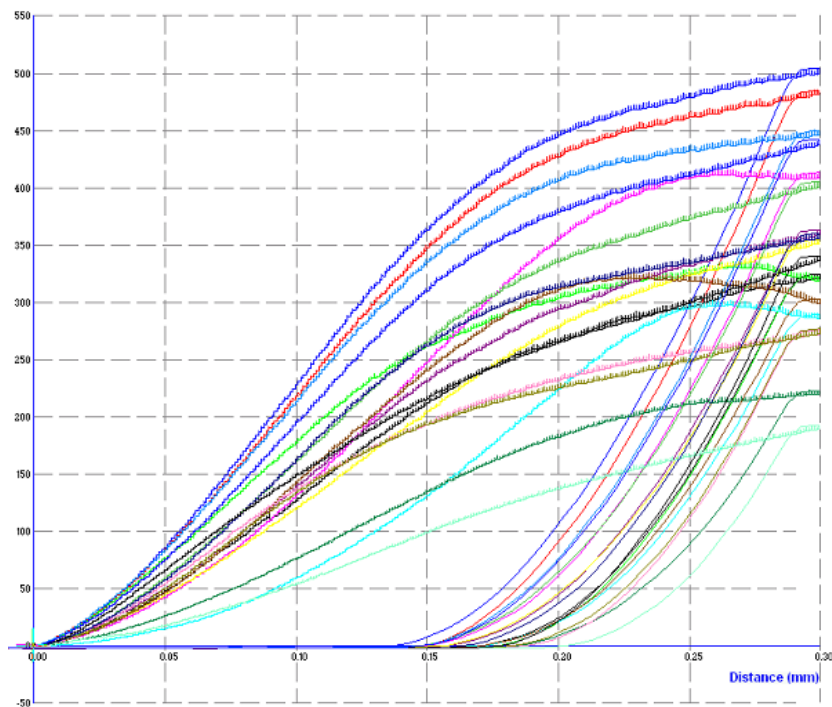


Figura 27. Cada color indica la carga y descarga del indentador sobre la muestra en el mismo punto. Grafica de Distancia (mm) vs. Fuerza(N)

Fuente: Laboratorio de mecánica de rocas, ICP.

El análisis e interpretación de los resultados consiste en encontrar una pendiente constante sobre una de las graficas registradas en la indentación, este proceso se realiza exclusivamente sobre el periodo de carga, y en este se debe tener en cuenta que las pendientes negativas representativas en el proceso, debido a que éstas ocurren por errores experimentales como características anómalas en la superficie de la roca, u otros factores que desestabilizan la toma de la medida con el indentador.

Una vez encontrada la pendiente, se busca en las diferentes graficas de carga, una pendiente similar, este proceso demora cierto tiempo mientras se analizan todas las graficas. Si la pendiente inicial seleccionada no se encuentra en el resto de graficas de carga, se descarta y se procede a buscar una nueva pendiente, repitiendo el procedimiento de comparación.

Finalmente, cuando se han obtenido las pendientes similares, se hace el cálculo del gradiente y se promedian los diferentes valores obtenidos; se determina su valor estándar y se grafica el gradiente encontrado y la fuerza final obtenida como se muestra en la figura 28.

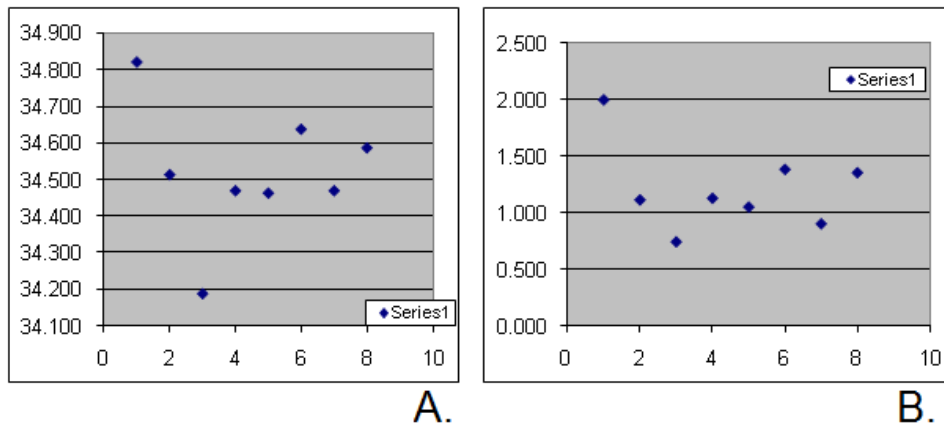


Figura 28. Resultados: A.) Gradiente; B.) Fuerza

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Rocas

6.2.3.2. Tiempo estimado para interpretación:

La prueba de indentación tarda aproximadamente dos horas en su interpretación; este tiempo varía dependiendo del número de graficas a analizar; su proceso se hace lento debido a las comparaciones de las pendientes con todas las gráficas.

Tiempo total aproximado: 2 h.

6.2.4. Ensayo de Compresibilidad:

6.2.4.1. Procedimiento realizado por el laboratorio:

Una vez sean tomados los datos de las deformaciones, la MTS 815 almacena esta información en especímenes, archivos de extensión .dat, el encargado de interpretar la prueba pasa esta información en archivos de Excel como se ha mencionado anteriormente.

- 1.) En el archivo de Excel se hacen los diferentes cálculos, los cuales son las diferentes operaciones matemáticas; Inicialmente se hacen los cálculos de las deformaciones, luego el esfuerzo promedio; con estos últimos el encargado de interpretar la prueba, encuentra la longitud y el diámetro, los cuales utiliza para calcular el volumen; ya teniendo este valor, se calcula la compresibilidad de la prueba; este procedimiento se desarrolla por cada ciclo (un ciclo equivale a un cambio en la presión de confinamiento).
- 2.) A continuación el encargado del laboratorio grafica la deformación Axial y circunferencial contra la presión de confinamiento; luego hace una regresión polinomial (Excel permite una máxima regresión polinomial de orden 6 (Seis)), una función que se ajuste a las diferentes deformaciones como se muestra en la Figura 29.
- 3.) A las nuevas deformaciones se les asigna el nombre de Deformación Axial Sintética y Deformación Circunferencial Sintética; y una vez calculadas se repite el paso 1 y se calcula una nueva compresibilidad; esta es la que tienen en cuenta en los resultados.

4.) Finalmente se repite el procedimiento para todos los ascensos (ciclos) que contenga la prueba, y se calculan las diferentes compresibilidades, por ascenso y descenso.

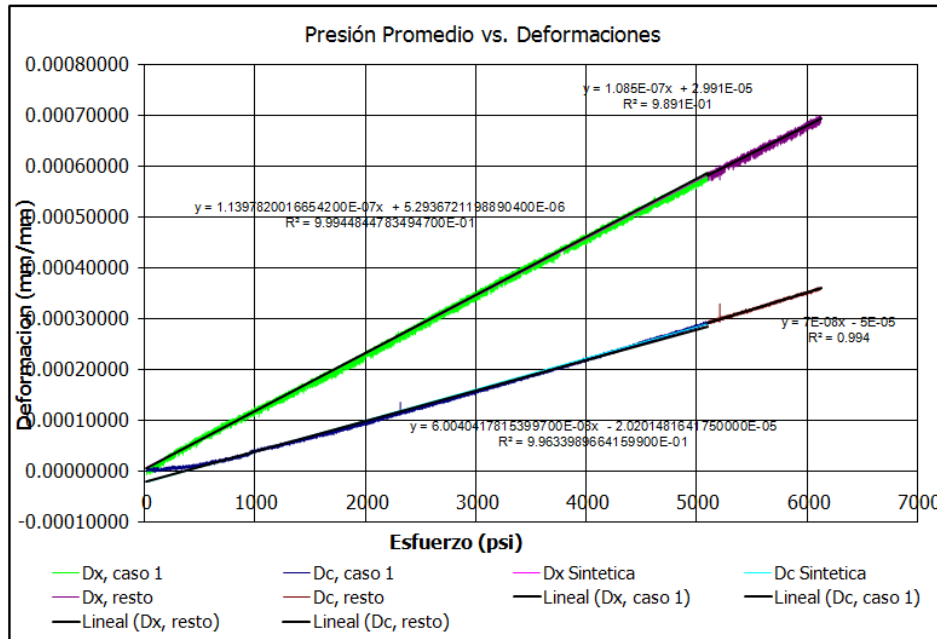


Figura 29. Grafica de las deformaciones con respecto al esfuerzo calculado con sus respectivas deformaciones sintéticas.

Fuente: Laboratorio de mecánica de rocas.

6.2.4.2. Tiempo estimado para la interpretación:

Para interpretar una prueba de compresibilidad, hay que encontrar cada uno de los ascensos, luego de esto copiar en hojas diferentes de Excel cada uno de los datos, ajustar los descensos y realizar las regresiones por cada uno de los ascensos y descensos; éste proceso puede llegar a tardar aproximadamente cuatro horas para obtener los resultados.

Tiempo total aproximado: 4h.

7. HERRAMIENTA SOFTWARE

Para desarrollar una herramienta software, es necesario conocer las necesidades del laboratorio, los problemas que se tienen (Numeral 4) y plantear por medio de una hipótesis y un análisis de requerimientos, la mejor manera de solucionar dicho problema.

Se plantea como hipótesis que es posible desarrollar una herramienta software, que sea capaz de realizar Administración de la información y además sea capaz de interpretar las pruebas más extensas del laboratorio.

7.1. TAREAS DE LA HERRAMIENTA

El laboratorio necesitaba de un software de escritorio desarrollado a la medida, que fuese capaz de realizar los siguientes trabajos:

- 1.) Administración de usuarios: este proceso incluye Login (Validación de nombre de usuario y contraseña), control de tipos de usuario: manejo de permisos (por tipos de usuario), Registro de nuevos usuarios a la base de datos, control exacto de quién y cuándo se interpretó una prueba, o manejó información de la roca.
- 2.) Ciclo de vida de la roca: Manejo de la información de la roca, desde su ingreso hasta su ensayo final; mostrar eventualmente el estado en el que se encuentra el espécimen. Este proceso del software debe ser capaz de almacenar información de la roca, mantener informado al líder de laboratorio por cada estado en el que la roca se encuentra. El líder puede controlar este proceso en todo momento haciendo consultas a la base de datos con el ID de la muestra (Sample ID).
- 3.) Intérprete de pruebas de laboratorio: El análisis y desarrollo de las pruebas del laboratorio, es una de las funciones más importantes y complejas que se realizan actualmente en el LMR. Es de gran

importancia que el software lea cualquier espécimen de las pruebas seleccionadas y además realizar los análisis y cálculos necesarios.

4.) Almacenamiento en Silab: Una vez se ha interpretado una prueba o se ha manejado información de una roca, estos resultados deben ser almacenados en el Silab (base de datos del ICP), este proceso es desarrollado por la herramienta, generando un archivo plano, teniendo en cuenta el estándar que utilizan para subir información a la base de datos del ICP.

7.1.1. Administración de cuentas de usuario

Cada vez más se hace imperativo para las empresas tener su información organizada y dispuesta a la toma de cualquier decisión administrativa u operativa. Es por eso, que mediante la creación de cuentas de usuario y la administración de permisos en el Laboratorio de Mecánica de Rocas se busca llevar un registro detallado de las acciones realizadas en el laboratorio, almacenando registros en la base de datos o en archivos de reporte con extensión .pdf con información acerca de quién y cuándo se realizaron interpretaciones de las pruebas y modificaciones a los ciclo de vida de las rocas.

La administración de permisos representa una gran herramienta de administración para el líder del laboratorio, ya que le permite elegir quién realiza cada prueba de acuerdo a las habilidades de cada integrante del laboratorio.

La herramienta implementa un sistema de cuentas de usuario de manera que todo integrante del laboratorio que desee realizar un ensayo o modificar el ciclo de vida de una roca debe registrarse y posteriormente iniciar sesión en el sistema. Está soportado en una base de datos creada con el motor de creación de bases de datos MySQL.

La tabla que representa la información del usuario en la base de datos es la siguiente:

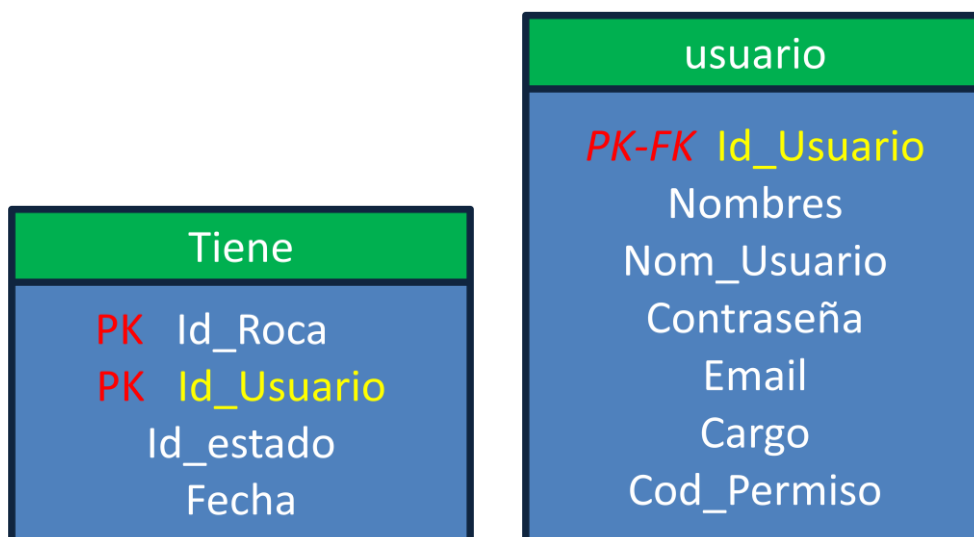


Figura 30. Sección de la base de datos que indica la relación de la tabla usuario con la tabla tiene.

Fuente: Autores

El campo ID_Usuario representa la clave primaria de la tabla, ya que corresponde a la identificación del usuario, la cual no puede repetirse. Dicho campo también es llave foránea en la tabla tiene, la cual conecta la tabla usuario con todas las demás.

Hay dos tipos de cuenta de usuario: Usuario ordinario y Administrador. Este último tendrá privilegios adicionales y será asignado al líder del laboratorio.

Luego de haber iniciado sesión en el sistema, el usuario podrá:

7.1.1.1. Actualizar Datos

Tanto los usuarios ordinarios como el usuario administrador podrán acceder a esta acción luego de ingresar al panel de manejo de cuentas de usuario por

medio del botón “Administrar cuentas de usuario” ubicado en el menú principal; allí se encuentra el botón “Actualizar”, el cual despliega un panel con casillas de texto para ingresar los valores que se desean actualizar. Es importante agregar que solo las casillas llenas se actualizarán en la base de datos, los campos de texto dejados en blanco no serán tenidos en cuenta.

A manera de ejemplo, el código SQL que actualiza los nombres y apellidos de un usuario es el siguiente:

```
"UPDATE usuario SET Nombres=" + nombres + " "+apellidos+ " " WHERE  
Nom_Usuario= " + nom_usuario + "";
```

7.1.1.2. Consultar

Esta acción le permite al usuario tipo administrador consultar información acerca de los demás integrantes del laboratorio. Los campos que se muestran en este panel son los siguientes: Cédula, Nombres, Nombre de Usuario, Email, Cargo y Código de Permiso (especificado más adelante).

La herramienta de consulta le permite al usuario realizar búsquedas por: Cédula, Nombre de Usuario, Cargo y una opción para mostrar todos los usuarios registrados en el sistema.

De esta manera el usuario administrador podrá observar la información básica de cada uno de los integrantes registrados incluyendo el código que representa la cantidad de pruebas que cada usuario está capacitado para interpretar.

A manera de ejemplo, el código SQL que realiza una consulta de usuarios por cargo es:

```
SELECT * FROM usuario WHERE Cargo = 'Ingeniero'
```

Actualizar Información | Consultar Información | Eliminar Usuario | Administrar Permisos

Criterio de búsqueda

Cargo

Cedula	Nombre	Nom_Usuario	Email	Cargo	Cod_Permito
1098	caro	caro	caro@hotmail.com	Ingeniero	0000000
1094528945	camilo	camilo	camilo@hotmail.com	ingeniero	1110101

Resultados Encontrados: 2



 

Figura 31. Tabla que muestra los resultados de las consultas.

Fuente: Autores

7.1.1.3. Eliminar:

Esta opción le permite al usuario tipo administrador seleccionar el nombre de los usuarios que se desean eliminar o desactivar.

El administrador podrá eliminar un usuario siempre y cuando éste no tenga acciones registradas en la base de datos del sistema tales como cambios en el ciclo de vida de la roca. Para estos casos se procederá a desactivar el usuario, lo cual impedirá que éste pueda iniciar sesión en el sistema, pero dejará intactos todos los registros históricos realizados.

Si el administrador quisiera eliminar un usuario con registros históricos, primero debe dirigirse al panel del ciclo de vida de la roca y eliminar todos aquellos registros realizados por el usuario.

A manera de ejemplo, el código SQL que elimina un usuario es:

```
DELETE FROM usuario WHERE nombres = nuevo_nombres ;
```

7.1.1.4. Administrar Permisos:

Esta opción le permite al administrador modificarle a cada usuario la capacidad de interpretar pruebas en el sistema. Esto con el fin de evitar que los usuarios que no estén capacitados para realizar ciertas pruebas las realicen.

¿Cómo funciona la administración de permisos?

A todo usuario que se registra en el sistema, la herramienta le asigna internamente un código denominado: "Cod_permiso". Dicho código es un número binario de 7 dígitos, donde cada uno representa el permiso para una determinada prueba de la siguiente manera:

Primer dígito: (151001) (151040) - Brazilian Test
Segundo dígito: (151018) (151039) - Envolvente de Falla Múltiple
Tercer dígito: (151006) (151006) - Compresión Uniaxial
Cuarto dígito: (151005) (151005) - Compresión Triaxial
Quinto dígito: (151033) - Prueba de Compresibilidad
Sexto dígito: (151047) - UCS a partir de indentación
Séptimo dígito: (151037) – Prueba Acústica

Si el dígito tiene un valor de '1' indica que el usuario en cuestión está habilitado para realizar la prueba, de lo contrario la herramienta desactivará todo lo que tiene que ver con dicha prueba para ese usuario.

Más concretamente el panel administrar permisos de la herramienta muestra una lista con los nombres de todos los usuarios del sistema. Al seleccionar un usuario y oprimir el botón "Aceptar" se activarán las casillas de selección ubicados en la parte derecha del panel.

También es importante mencionar que se ejecutará la siguiente consulta SQL:

```
SELECT Cod_Permiso FROM usuario WHERE Nombres = ?
```

Seleccionando de la base de datos el código de permiso del usuario que fue seleccionado en la lista. De esta manera aparecerán seleccionados las casillas

de texto correspondientes a las pruebas que según el código el usuario puede realizar (Ver figura 32).

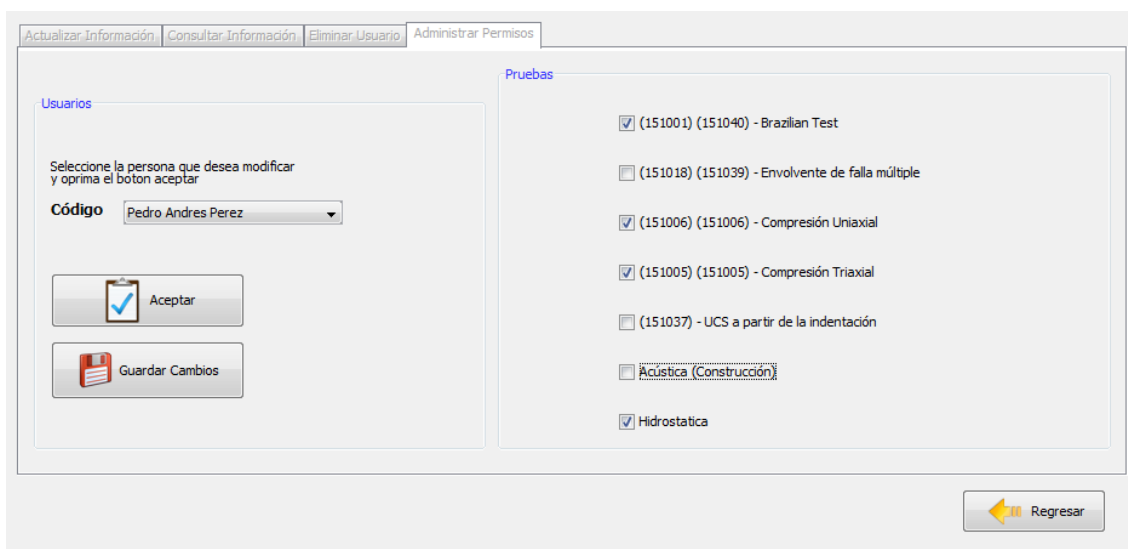


Figura 32. Panel administrar permisos

Fuente: Autores

Luego de seleccionar las casillas y oprimir el botón “Guardar Cambios” será modificado el código de permiso y posteriormente modificado en la base de datos.

Es importante mencionar que el Administrador no tendrá que entenderse con dicho código, ya que la modificación se realizara internamente en la base de datos con tan solo activar o desactivar las casillas de selección.

7.1.1.5. Creación de Reportes por la Herramienta

Después de haber realizado la lectura de un espécimen en una determinada prueba, la herramienta ofrece la opción de generar un reporte detallado de los resultados, mostrando por medio de pestañas una serie de casillas de texto que serán llenadas por el usuario (persona que solicita la creación del reporte). La casilla correspondiente a “responsable de laboratorio” será llenada automáticamente, luego de que el software solicite internamente a la base de datos los valores de nombres y apellidos del usuario que ha iniciado sesión en

ese momento. Las casillas correspondientes a los resultados de la prueba (en el caso de una prueba triaxial) tales como:

- Módulos de Young
- Módulos de Poisson
- Esfuerzos Máximos

Serán llenadas automáticamente por la herramienta después de la interpretación. Algunas casillas correspondientes a los datos de la muestra tales como:

- Id de la muestra
- Longitud
- Porosidad
- Temperatura
- Diámetro
- Permeabilidad

Serán de igual manera llenadas automáticamente luego de la lectura del espécimen. De esta manera se busca eliminar los errores humanos producto de la digitación manual de los resultados en el reporte. Es importante mencionar que los valores anteriormente mencionados no serán cargados automáticamente en el reporte, esto con el fin de permitirle al usuario poder verificarlos antes de la creación del mismo (Ver Figura 33).

Reporte H1	Reporte H2	Reporte H3	Reporte H4
Datos de la Muestra			
Id de la Muestra	xx	Nombre del Pozo	xx
Profundidad	xx	Diámetro	38.74
Longitud	78.45	Densidad	xx
Porosidad	10.1	Permeabilidad	1.1
Temperatura	23.0		
Resultados			
	Tangente	Promedio	Secante
Modulo de Young Psi	0.51321	0.50828	1.15003
Relación de Poisson	-1415695.64902	-1589958.52643	2815904.1148
			Esfuerzo Máximo CCS Kpa
			420272.38425
			Esfuerzo Máximo CCS Psi
			60955.46607
<input type="button" value="Regresar"/> <input type="button" value="Continuar"/>			

(151005) (151005) - Compresión Triaxial

Figura 33. Ejemplo del llenado del formulario para la creación de un reporte.

Fuente: Autores

7.1.2. Base de datos

7.1.2.1. Tabla Usuario

Como se menciona en el capítulo de Administración de Cuentas de Usuario, esta tabla contiene la información referente al usuario, que en este caso representa a los ingenieros encargados de preparar e interpretar las muestras. El motivo por el cual vuelve a ser presentada en este capítulo es debido a que esta tabla es de vital importancia en el ciclo de vida de la roca, ya que cada cambio de estado del mismo lleva adjunto la identificación de quien lo realizó, de esta manera se lleva un registro de quien realiza cada acción en el software.

7.1.2.2. Tabla Roca

Esta tabla comenzó siendo la más importante de la base de datos, ya que representa una de las entidades más importantes en el manejo de la información del LMR, pero finalmente debido a la normalización solo contiene los siguientes campos:

- Id_Roca

Es la clave primaria de la tabla, ya que representa el código con el cual se identifica la roca en el LMR denominado Sample_Id.

- Aprobado

Este campo contiene un valor binario que especifica si la roca en cuestión ha sido aprobada para pulir. Si el valor correspondiente es "0", indica que la muestra no ha sido aprobada por el líder del laboratorio, de lo contrario, la muestra está lista para pulir. Este campo le permite a la herramienta generar un control luego de realizar las medidas antes de pulir, pertenecientes al estado 3.

- Aprobado 2

Este campo contiene un valor binario que especifica si la roca en cuestión ha sido aprobada para ser ensayada. Si el valor correspondiente es "0", indica que la muestra no ha sido aprobada por el líder del laboratorio, de lo contrario, la muestra está lista para ensayo. Este campo le permite a la herramienta generar un control luego de haber realizado el último procedimiento en la preparación de la roca; ya sean las medidas después de pulir o la saturación correspondientes al estado 4 y 0 respectivamente.

7.1.2.3. Tabla Estado

Surge a partir de la normalización de la tabla roca. Contiene los campos correspondientes al código del estado (Id_Estado) de la muestra, que representa la llave primaria; y el nombre (Nom_Estado) que se le da en el laboratorio. Esta tabla nunca es modificada, a menos que en el laboratorio se decida agregar un nuevo estado a la preparación de las muestras. Los valores que contiene son los siguientes (Ver Figura 34).

Id_Estado	Nom_Estado
0	Saturacion
1	Ingreso
10	Comp U Estática
11	Comp U Dinámica
12	Resistencia Tensil
13	Comp T Estática
14	Comp T Dinámica
15	TWC
16	EFM
17	Compresibilidad Bulk
18	Compresibilidad Sólido
19	Compresibilidad Hidrost
2	Corte y Prepulido
20	Compresibilidad Triaxial
21	Tomografía Acústica
22	Dureza de Fractura
23	Esayo Permeabilidad
24	Indentacion Módulos
25	Indentacion UCS
26	Otros
3	Med Antes de Pulir
4	Pulido y Med Finales
6	Irregular

Figura 34. Valores que contiene la tabla “estado”

Fuente: Autores

7.1.2.4. Tabla Tiene

Debido a que en un principio la relación entre la entidad usuario y la entidad roca presentaban cardinalidad “muchos a muchos”, fue necesaria la creación de la tabla tiene, la cual después de haber normalizado el diagrama, se encarga de establecer una relación entre las demás tablas de la base de datos. Otra funcionalidad de esta tabla, la ofrece el atributo “fecha”, ya que por medio de éste queda un registro por cada cambio de estado en el ciclo de vida de la roca con su fecha correspondiente.

Las llaves primarias de dicha tabla corresponden a los campos “Id_Roca” y “Id_Estado”, lo que indica que no es posible que existan dos registros de la misma roca en el mismo estado.

Las llaves foráneas de dicha tabla corresponden a las tres llaves primarias de las tablas anteriormente mencionadas: "Id_Roca", "Id_Estado" y "Id_Usuario".

El diagrama Entidad-Relación de las cuatro tablas y su respectiva cardinalidad se observa a continuación:

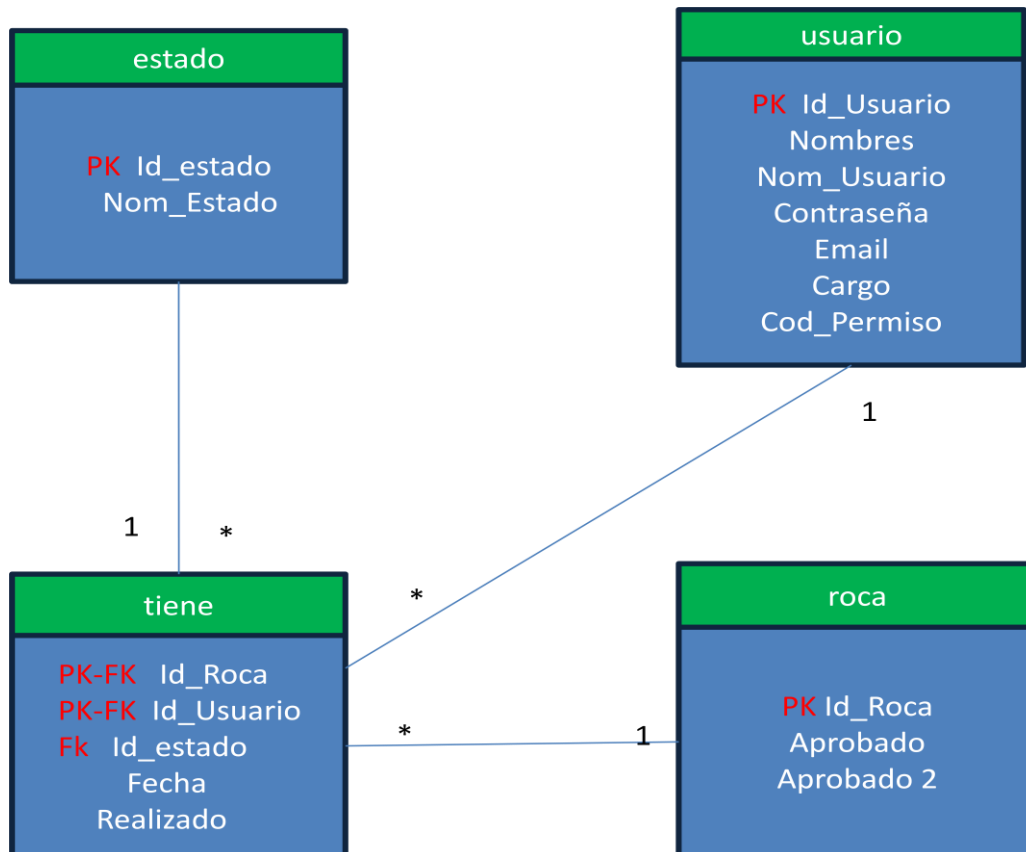


Figura 35. Diagrama Entidad-Relacion de la base de datos

Fuente: Autores

7.1.3. Bitácora de la roca

Otra de las funciones de la herramienta software consiste en realizar un acompañamiento a los ingenieros encargados de realizar las preparaciones y ensayos de muestras mediante un módulo que incorpora paneles que emulan las Bitácoras de dimensión geométrica creadas en Excel, de esta manera será posible diligenciar la información proveniente de las mediciones de la muestra

en cada uno de los ciclos de vida de la roca, y a su vez poder generar un reporte de resultados, sin tener que salir de la herramienta.

Este módulo esta soportado bajo una base de datos creada en MySQL sobre la cual es posible realizar consultas según diferentes parámetros, con el fin de encontrar rápidamente la información de la roca que se esté buscando y a su vez, abrir un informe de la información que se ha diligenciado sobre ella.

A continuación se presentara una breve descripción de las tablas que componen la base de datos.

7.1.3.1. Bitácoras de datos en la herramienta software

Luego de iniciar sesión en la herramienta, es posible acceder al menú de opciones del ciclo de vida de la roca, el cual permite realizar el ingreso de una roca por primera vez, continuar el ciclo de vida de una roca ya existente, realizar consultas y aprobar rocas listas para ensayar (Ver Figura 36). La herramienta ofrece un panel por cada ciclo de vida de la roca, emulando los actuales formatos utilizados en el laboratorio para llenar la información correspondiente a la toma de medidas realizadas en cada ciclo.

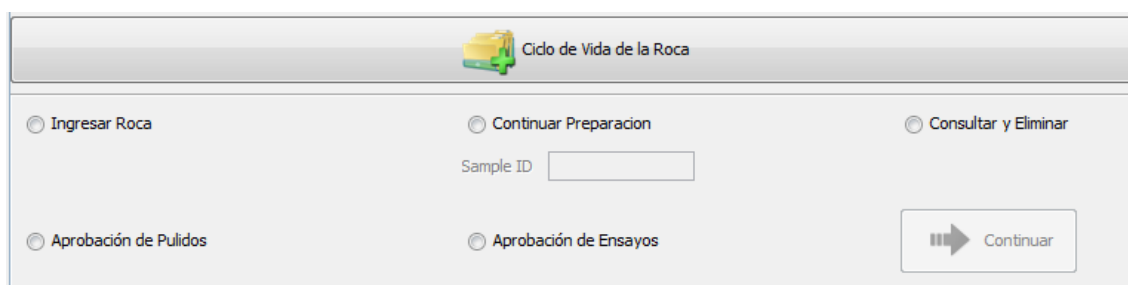


Figura 36. Menú de opciones del ciclo de vida de la roca.

Fuente: Autores

7.1.3.2. Iniciar ciclo de vida de una muestra

Esta opción se ejecuta luego de hacer click sobre al opción “Ingresar Roca” y enseguida oprimir el botón continuar en el menú anteriormente mencionado. A

continuación se mostrará el panel de ingreso de la roca (Ver Figura 37) en el cual se ingresará la información general de la roca antes de realizarle cualquier preparación o ensayo. También es necesario conocer el tipo de ensayos que serán realizados con la roca que se dispone a ingresar.

El Sample_Id corresponde al elemento más importante de este panel, ya que representa número con el cual será identificada la roca en el sistema.

Figura 37. Panel de ingreso de una roca.

Fuente: Autores

7.1.3.3. Continuar ciclo de vida de una muestra

A esta opción se accede luego de hacer click sobre la opción “Continuar Procedimiento” y enseguida digitar el Sample_Id en la casilla de texto contigua. Esta opción permite ir al panel que representa el siguiente estado en el ciclo de vida de la roca.

La siguiente sentencia SQL se ejecuta luego de oprimir el botón continuar, seleccionando de la base de datos el mayor código de estado, el cual

representa el último procedimiento realizado sobre la roca en cuestión; de esta manera es posible que el sistema despliegue el panel correspondiente al siguiente estado en el ciclo de vida de la roca:

```
select max(tiene.ID_Estado) from Estado, Tiene where Tiene.`Id_Estado` =  
Estado.`Id_Estado` and Id_Roca=?
```

Los ciclos de vida de la roca que maneja la herramienta software son los siguientes.

- 1) Ingreso
- 2) Corte y Prepulido
- 3) Medidas antes de Pulir
- 4) Medidas después de pulir
- 5) Saturación (en caso de que sea necesario).
- 6) Muestras irregulares (En caso de que la muestra sea Irregular).

A continuación se presenta un ejemplo del panel “Medidas Después de Pulir”, el cual representa el tercer estado en el ciclo de vida de la roca (Ver Figura 38).

MEDIDAS DESPUES DE PULIR

LONGITUD - A		DIAMETRO - B	PLANITUD		CILINDRICIDAD		
x	Inicial (mm)	Inicial (mm)	x	Diferencial (mm)	Inicial (mm)	Final(mm)	Diferencial (mm)
1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5	<input type="text"/>	<input type="text"/>	5	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
6	<input type="text"/>	<input type="text"/>	6	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
7	<input type="text"/>	<input type="text"/>	7	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
8	<input type="text"/>	<input type="text"/>	8	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Prom	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Max	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Desv	<input type="text"/>	<input type="text"/>					

MASA		VOLUMEN (CC)	Fecha
	Final (mm)		<input type="text"/>
1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
2	<input type="text"/>		
3	<input type="text"/>		
4	<input type="text"/>		
5	<input type="text"/>		
Prom	<input type="text"/>		
Desv	<input type="text"/>		

Figura 38. Panel de Medidas después de pulir.

Fuente: Autores

7.1.3.4. Consultar y Eliminar

A esta opción se accede luego de seleccionar la opción “Consultar y Eliminar” en el menú principal y enseguida oprimir el botón continuar. De esta manera se desplegará el panel de consultas sobre el cual se decidió también implementar las opciones de eliminación de registros del sistema.

7.1.3.5. Realizar Consultas

Dentro del panel buscar, es posible realizar consultas con base en tres parámetros diferentes. Los resultados de las consultas serán mostrados en la tabla que se observa en la Figura 39.

- **Consultas por Estado**

Es posible realizar este tipo de consulta luego de hacer click sobre la opción “Estado” en el sub-panel “Buscar”, y seleccionando a continuación uno de los 6 estados del ciclo de vida de la roca.

Esta operación es realizada gracias a la siguiente sentencia SQL, la cual selecciona solamente las rocas que presenten como estado final el estado seleccionado. Finalmente será mostrada en la tabla toda la información acerca de las rocas seleccionadas.

```
SELECT tiene select tiene.`Id_Roca`, nom_estado, Realizado, Nombres,
fecha, aprobado, Aprobado2 FROM Estado, Tiene,roca,usuario where
Tiene.`Id_Estado` = Estado.`Id_Estado` and roca.`ID_Roca`=tiene.`Id_Roca`
and tiene.`Id_Usuario`=usuario.`Id_Usuario` and tiene.Id_Roca in ("+"select
distinct tiene.id_roca from Estado, Tiene WHERE Tiene.`Id_Estado` =
Estado.`Id_Estado` and Tiene.`Id_Usuario`=usuario.`Id_Usuario`
and"+"(Tiene.`Id_Estado` =? ))and tiene.id_roca not in (select distinct
tiene.id_roca from Estado, Tiene where Tiene.`Id_Estado` = Estado.`Id_Estado`
and (Tiene.`Id_Estado` >? ))"
```

- **Consultas por Autor**

Es posible realizar este tipo de consulta luego de hacer click sobre la opción “Autor” en el sub-panel “Buscar”, y seleccionando a continuación uno de los autores que son cargados en la lista contigua.

Siempre que se elija esta opción, se ejecutará una sentencia SQL que busca en la base de datos todos los autores existentes en el sistema y los carga automáticamente en la lista.

Luego de haber seleccionado los parámetros mencionados anteriormente, se procederá a buscar en la base de datos todas las acciones realizadas por el usuario en cuestión mediante la siguiente sintaxis SQL.

```
SELECT select tiene.`Id_Roca`, nom_estado, Realizado, Nombres, fecha,
        aprobado, Aprobado2 FROM Tiene,Estado,Roca,Usuario WHERE
Estado.`Id_Estado`=Tiene.`Id_Estado` and tiene.`Id_Roca`=roca.`ID_Roca`
and tiene.`Id_Usuario`=usuario.`Id_Usuario` and usuario.Nombres=?
```

7.1.3.6. Eliminar Registros del sistema

Solamente el líder del laboratorio, quien tiene una cuenta de administrador podrá eliminar registros del sistema. La herramienta controla esta acción desapareciendo el sub-panel “Eliminar” del panel “Consultar y Eliminar”.

Se debe ingresar el código de la roca que se desea eliminar en la casilla de texto ubicada en el sub-panel “Eliminar”. La eliminación puede realizarse de dos formas, o bien eliminar todos los estados o registros de la roca en cuestión, seleccionado en la lista la opción “Todos” (Ver Figura 40); ó eliminar solamente el estado seleccionado en la lista. El sistema de eliminación controla automáticamente que el estado que se quiere eliminar sea el último estado realizado, de lo contrario mostrara un mensaje de error.

La sintaxis del código en SQL que realiza la eliminación de la roca seleccionada es la siguiente:

```
DELETE FROM tiene WHERE Id_Roca = "" + Id_Roca + "" and Id_Estado= ?
```

Dónde la variable “Id_Roca” representa el valor digitado en la casilla de texto anteriormente mencionada.

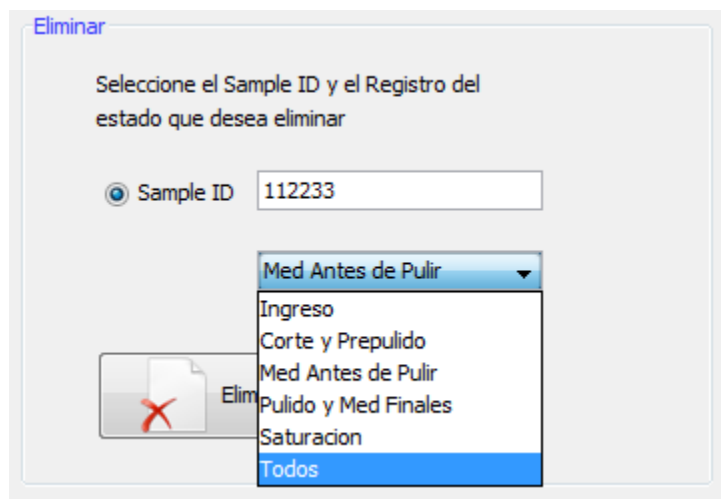


Figura 40. Sub-Panel Eliminar

Fuente: Autores

7.1.3.7. Aprobar Rocas

Como se explicó en el estado del arte del ciclo de vida de la roca, una prueba no puede ser ensayada sin una previa autorización del líder del laboratorio. Tampoco es posible que una roca sea pulida sin autorización.

Para aprobar una roca se debe seleccionar la opción “Aprobación de Pulidos” ó “Aprobación de Ensayos” en el menú principal y enseguida oprimir el botón continuar. De esta manera se desplegará el panel correspondiente al tipo de aprobación que se desea realizar Ver Figura 41.

La siguiente sentencia SQL se encarga de buscar en la base de datos las rocas que necesitan de aprobación, éstas serán cargadas en la tabla del panel correspondiente.

```
SELECT tiene.`Id_Roca`, nom_estado, Realizado, Nombres, fecha, aprobado
,Aprobado2 FROM Estado, Tiene,roca,usuario WHERE Tiene.`Id_Estado` =
Estado.`Id_Estado` and roca.`ID_Roca`=tiene.`Id_Roca` and
tiene.`Id_Usuario`=usuario.`Id_Usuario` and aprobado='0' and
tiene.Id_Estado=4 ";
```


Con la herramienta software, el picado de las ondas se hace por medio de tratamiento de señales, para la interpretación de este ensayo, se hace necesario utilizar el paquete de señales que incluye Matlab, y los toolbox relacionados de tratamiento de señales por Fourier y por Wavelet.

7.1.4.1.1. Punto inicial en la señal (to)

La base del ensayo acústico se encuentra en encontrar el punto inicial de la señal lo más exacto posible y además que lo haga de manera automática; para cada señal se hicieron varios tratamientos con el fin de ajustar el punto lo más exacto posible a los resultados de las pruebas ya analizadas en el laboratorio.

Para hacer un tratamiento wavelet sobre las señales es necesario establecer la señal madre por la que se rige la señal, la naturaleza de la onda.

Se busca entre todas las ondas que tiene Matlab, la señal madre que más se ajuste a las señales del laboratorio, y se establece la señal 'db8' como la señal madre para este tipo de ondas.

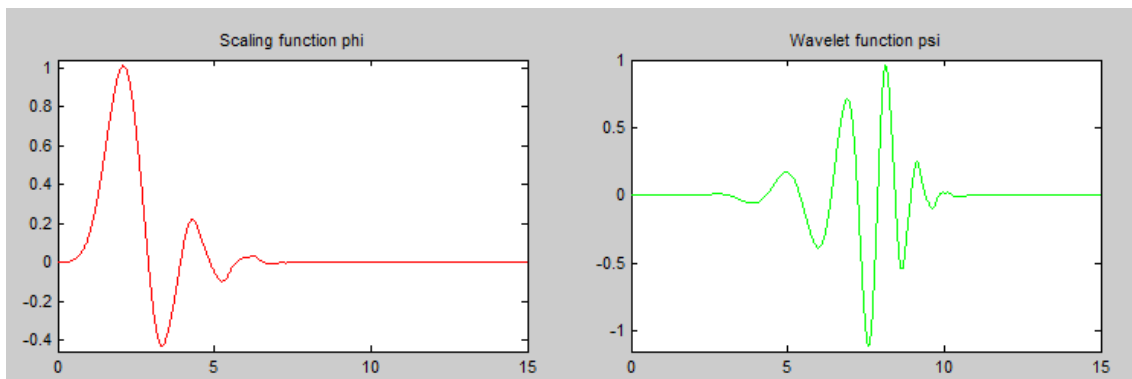


Figura 42. Señal madre seleccionada, *db8*.

Fuente: WaveMenu de Matlab.

Tratamiento realizado Señal P:

- 1.) Se eliminan los valores del ruido y luego se prepara la señal para leer los valores siguientes.
- 2.) Luego se selecciona la señal de análisis, y por medio de tratamiento de wavelet, se encuentran los detalles de la gráfica (Ver Figura 43)

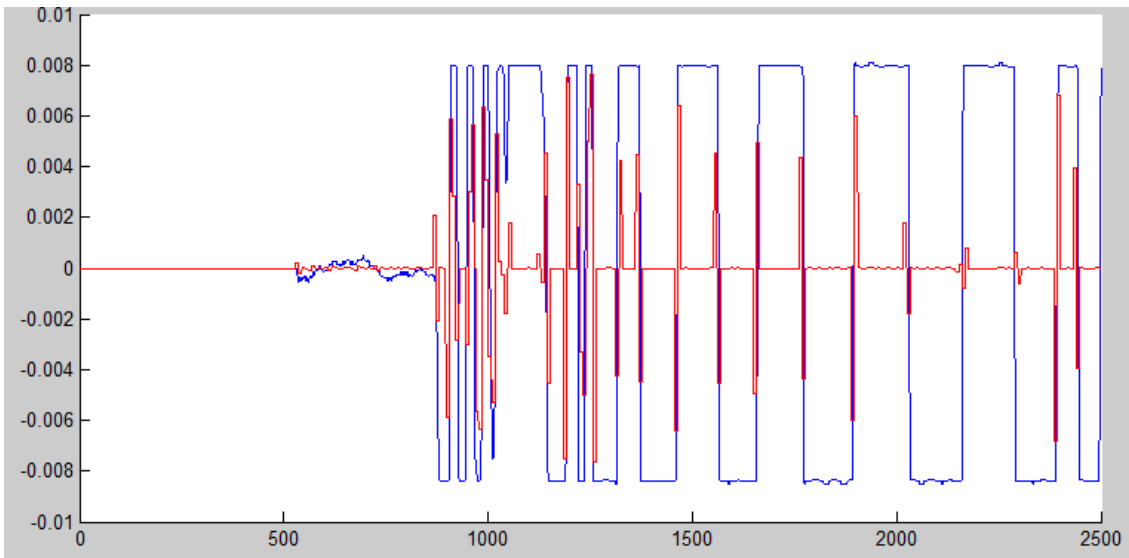


Figura 43. Azul: grafica señal P; Rojo: Grafica de los detalles para el tratamiento wavelet.

Fuente: Autores

3.) Se establece el punto inicial de corte entre la señal original y la señal de los detalles y este será nuestro valor del tiempo inicial de P.

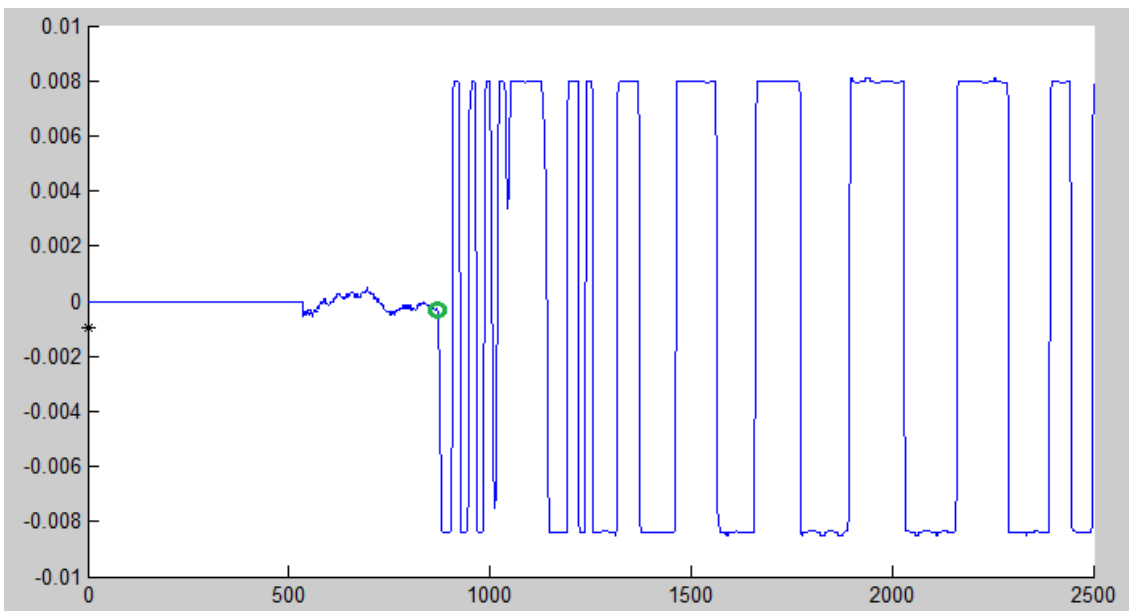


Figura 44. Punto inicial ajustado para la señal P

Fuente: Autores

Tratamiento realizado Señal S:

1.) Una vez seleccionada la señal para analizar, se analizan los diferentes tramos donde hay cambios fuertes en la frecuencia (tratamiento wavelet); cuando se grafica la señal (grafica azul Figura 45) y luego se compara con los detalles de la descomposición wavelet (grafica roja Figura XX) se puede detallar los puntos exactos donde hay cambio de frecuencia en la señal.

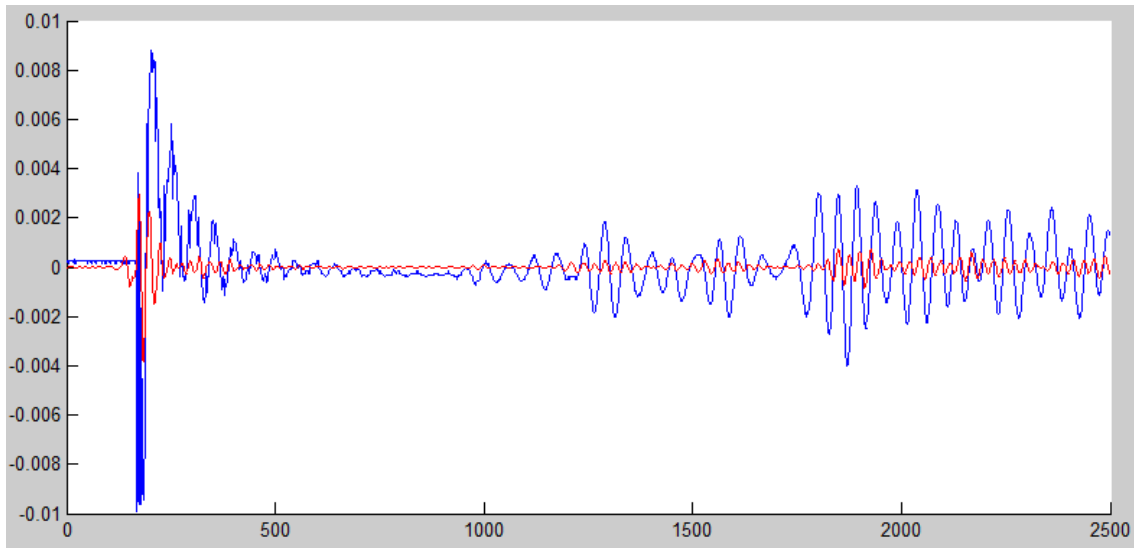


Figura 45. Azul: Señal del laboratorio; Rojo: Descomposición wavelet

Fuente: Autores

2.) Los valores negativos de la descomposición wavelet no son de relevancia para el tratamiento de la señal, por consiguiente son omitidos; y nuevamente se dibuja el valor absoluto de los detalles para la descomposición.(grafica verde de la figura 46)

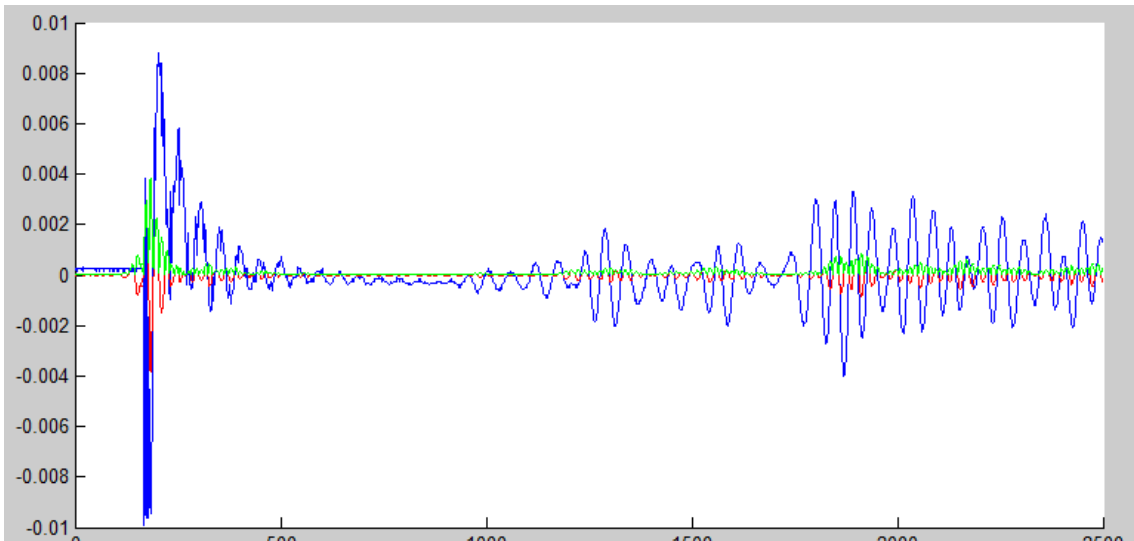


Figura 46. Verde: grafica del valor absoluto de los detalles para la descomposición wavelet.

Fuente: Autores

- 3.) Una vez obtenidos los tramos de la señal donde cambia en frecuencia, se tienen los posibles puntos donde inicia la señal; se ignoran los el tramo inicial (Ruido) y se analizan los siguientes picos.
- 4.) Para el tratamiento de la señal, se encuentra que existen varios tramos donde se crea un valle o un espacio entre un pico y el otro (ver Figura 47), al verificar con los resultados se establece que dentro del valle se encuentra el tiempo inicial que se esta buscando.

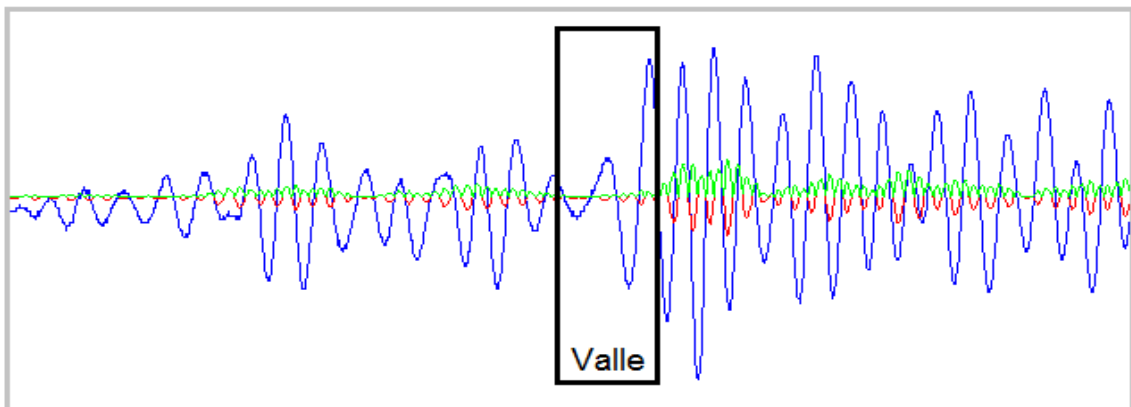


Figura 47. Valle encontrado, zona donde se encuentra to

Fuente: Autores

- 5.) Se establece un umbral de valores en los detalles y se ignora el resto; para el caso de la señal S, el umbral se encuentra $2e(-5)$.
- 6.) Una vez se establece el valle encontrado, se realiza una convolución entre la señal analizada y la grafica de los detalles, solo para los valores establecidos anteriormente.
- 7.) Finalmente se grafica los resultados de la convolución y luego se selecciona el punto donde la señal se corta con la convolución; este será el valor resultante y el punto inicial de la señal (ver Figura 48).

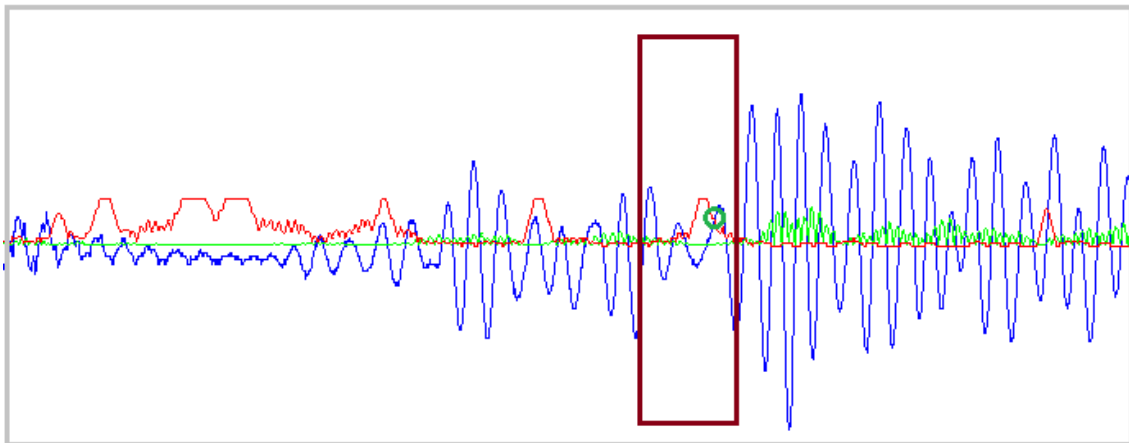


Figure 48. Rojo: Convolución resultante; Verde: Valor absoluto de los detalles; Azul: Grafica analizada; Cuadro Rojo: Valle; Círculo verde: Punto inicial de la señal.

Fuente: Autores

7.1.4.1.2. Graficador SNL

El Graficador SNL es el entorno grafico desarrollado en Matlab para la interpretación de pruebas acústicas; Este ejecutable de extensión .exe recibe los especimenes obtenidos del osciloscopio y lee todas las señales S y P, luego las va graficando una por una, a continuación realiza el cálculo del punto inicial de las señales S y P, además continúa con el resto de la interpretación, sin retornar a Java.

Con base a las velocidades se hace el cálculo del Módulo de Young (E):

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Y además con base a las velocidades y la densidad, se calcula la relación de Poisson (μ):

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde ρ corresponde a la Densidad de la muestra, V_s corresponde a Velocidad señal S y V_p corresponde a la Velocidad de la señal P.

Para la interpretación de este ensayo es necesario ejecutar el software *Graficador SNL*; para acceder al programa en el panel de pruebas (ver Figura 49), se selecciona la opción de “Prueba acústica” y el botón de continuar, abrirá el entorno grafico de Matlab.

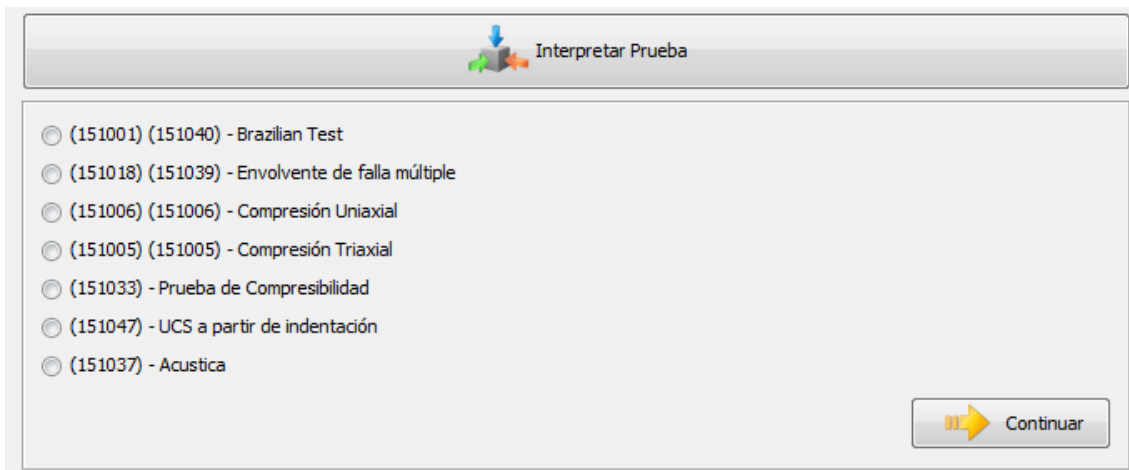


Figura 49. Panel del menú de pruebas

Fuente: Autores

Una vez se haya cargado el *Graficador SNL* (Figura 50), y el programa haya cargado su entorno gráfico correctamente, se puede cargar la señal ya sea individualmente (Cargar señal) o todas las señales (cargar carpeta) contenidas en el paquete que arrojó el osciloscopio.

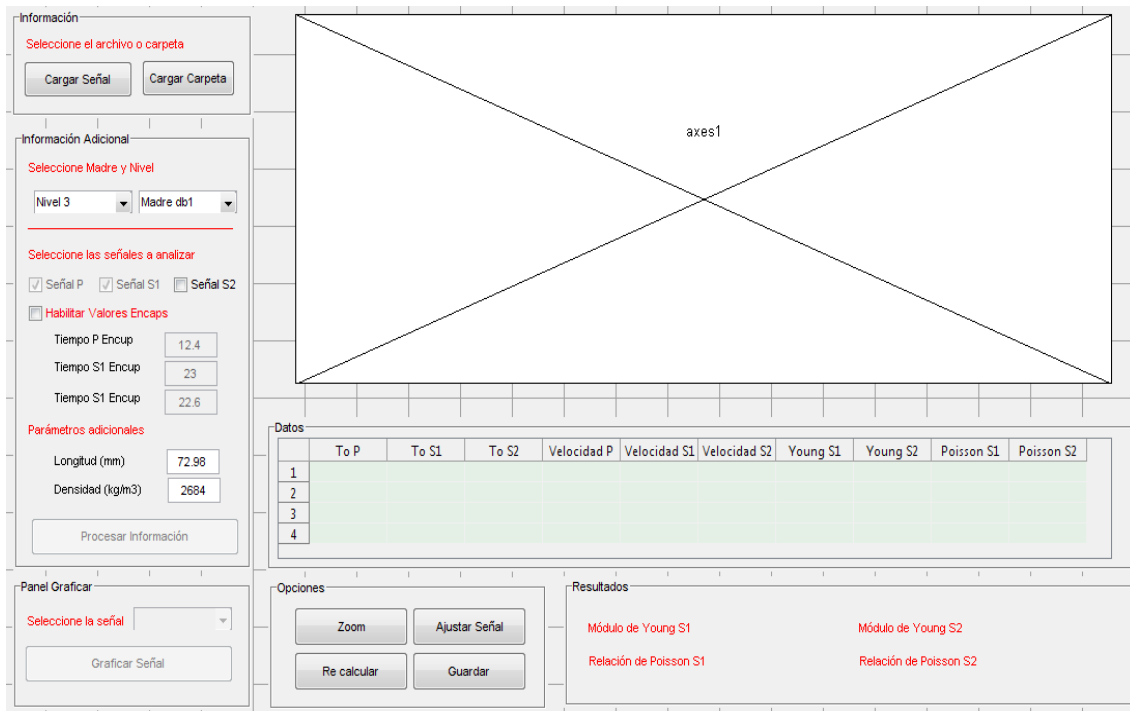


Figura 50. Diseño del Graficador SNL para interpretar pruebas Acústicas

Fuente: Autores

Después que se haya cargado las señales, se pasa selecciona un nivel y una madre (serán la base del ajuste wavelet).

Encups: Los encups son cilindros metálicos que tienen adheridos los cristales piezoeléctricos sobre su superficie; la finalidad de utilizar estos encups, es evitar tener que pegar nuevamente estos cristales a la roca cada vez que ésta se cambie. Utilizando los encups los encargados del laboratorio solo tienen que seleccionar una roca ya preparada (con geometría regular) y ajustarla entre los encups (se coloca un cilindro en la parte inferior de la roca y otro en la parte superior) para finalmente colocarla en el osciloscopio. Para efectos de interpretación, simplemente se le resta la longitud del encup al tiempo inicial encontrado por el software.

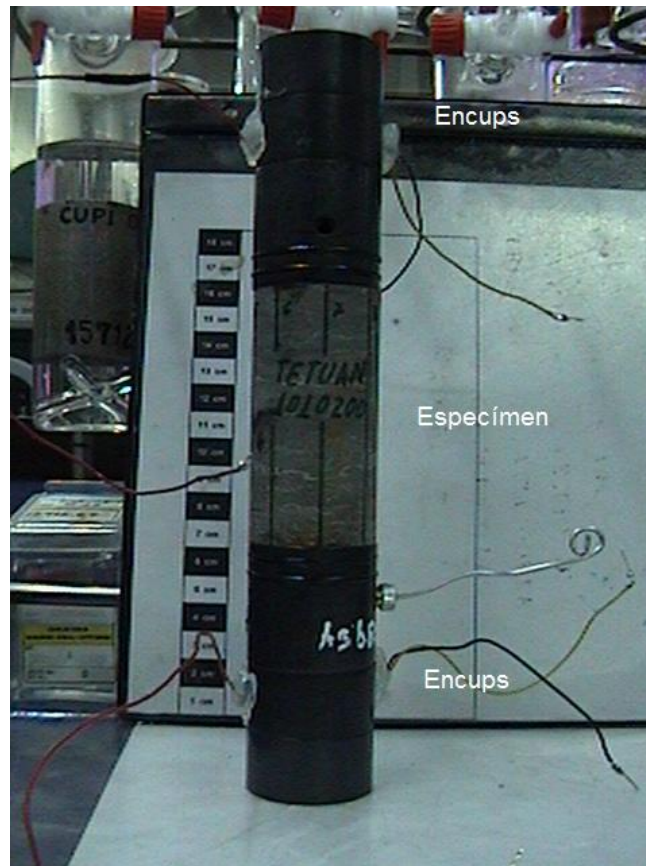


Figura 51. Especimen entre Encups.

Fuente: Laboratorio de Mecánica de rocas, ICP.

Para continuar con la interpretación en el software, se seleccionan los valores correspondientes a los encups y luego se llena la información restante (Longitud de la muestra y densidad de ésta misma); la densidad puede ser calculada con base en el volumen y la masa de la muestra.

Una vez se haya procesado la información, el software se encarga de analizar señal por señal, encontrar el punto inicial de cada una de éstas, hacer los cálculos de las velocidades y finalmente encontrar el módulo de Young y la relación de Poisson, graficar los resultados y finalmente almacenarlos.

7.1.4.1.3. Tiempo estimado en la interpretación:

El análisis del software por cada una de las señales tarda aproximadamente quince segundos, cuando el Graficador SNL carga todo el paquete de señales (más de 100 señales aproximadamente) tarda tres minutos leyendo el paquete

de señales; en el resto de interpretación (gráfica de resultados y posterior almacenamiento) puede llegar a tardar dos minutos adicionales; y un tiempo adicional verificando resultados por el encargado.

Tiempo total aproximado: 10 minutos

7.1.4.2. Ensayo de Envolverte de falla múltiple

Desarrollo del ensayo por medio del software:

Su interpretación inicial consiste en la lectura de los datos tomando como registro de entrada el archivo .dat que arroja la MTS del laboratorio, luego el software se encarga de clasificar entre las columnas que necesita y descarta las que no va a utilizar para la interpretación de éste tipo de pruebas. Una vez hecho esto se procesa ésta información para hacer los cálculos correspondientes de las diferentes deformaciones y presiones. Seguidamente el programa comienza a buscar los diferentes ascensos que hay dentro del espécimen asumiendo que se está interpretando una prueba de envolvente de falla múltiple, si no es así el programa detecta que solo hay un ascenso y se trata de un ensayo correspondiente a una prueba de envolvente de falla normal.

Una vez encontrados los ascensos se hacen los cálculos del Modulo de Young y la Relación de Poisson exclusivas para el primer ascenso. Con los valores de la presión axial se encuentra el UCS y con base a éste se calculan los esfuerzos, la deformación axial y circunferencial para cada uno de los porcentajes establecidos que actualmente son 0%, 20%, 25%, 50%, 75% y 80%. Una vez terminados estas operaciones, se calcula el Módulo de Young y la Relación de Poisson que finalmente son almacenados en el disco duro como los primeros resultados de la interpretación.

Finalmente se carga el entorno gráfico de Matlab para el cálculo de la envolvente.

7.1.4.2.1. Graficador EFM

Para lograr graficar y encontrar la envolvente de falla se necesitaba un entorno en el cual se pudiese graficar estos resultados, se desarrolló el programa Graficador EFM en Matlab ya que este software, se muestra como la mejor alternativa por la gran cantidad de librerías incluidas en su paquete básico de señales, los comandos especializados en graficación y la exactitud que incluye en las operaciones y los cálculos.

El Graficador EFM, es un programa desarrollado en Matlab, almacenado en extensión .exe (archivo ejecutable) dentro de la ubicación del programa principal. El objetivo principal de este programa es terminar la interpretación (encontrar el ángulo de fricción interna AFI y la Cohesión) del ensayo de envolvente de falla múltiple.

Calculo de la envolvente de falla que más se ajusta a los círculos:

Para encontrar la envolvente de falla se plantearon dos alternativas:

Buscar por medio de métodos numéricos (Planteamiento de Zoback) una función que se ajustara a los círculos de Mohr, y luego linealizarla, siendo ésta última la envolvente resultante a los círculos de Mohr.

La segunda opción es llamada Circulo Envolvente y Círculo de corte, consiste en encontrar todas las posibles envolventes entre los diferentes círculos de Mohr que se están analizando y compararlas unas con otras para encontrar la línea envolvente que más se ajusta a los círculos de Mohr.

En ambos casos, se calcularon las áreas entre la envolvente resultante y los círculos de Mohr. Mientras menor fuese esta área resultante, se tenía un mejor ajuste de envolvente de falla.

- Métodos numéricos de Zoback: Para el desarrollo del método, inicialmente se plantea como posible solución el método de Zoback, el dice que se puede encontrar una función que se ajuste a los círculos de Mohr. Con base al comportamiento de los círculos y su estructura, se plantean las posibles funciones para rodear los círculos de Mohr, éstas serían funciones polinomiales o una funciones logarítmicas; la

desventaja que se encontraba con ésta alternativa es que ninguna de las funciones se ajustaba lo suficiente a los círculos de Mohr (esto quiere decir que la función cortaba en varias oportunidades a los círculos de Mohr o pasaban muy alejados de éstos).

Polinomial: Se prueba con una funciones polinomial de orden 2 hasta orden 10 y se detalla que las funciones impares: 3, 5, 7 y 9 no tienen una función continua o no sirven para representar los círculos, ya que son cortados en varias ocasiones, mientras que las funciones polinomial pares si dan un mejor ajuste (Ver Figura 52). Como las funciones de orden mayor o igual a 4 se ondulaban solo quedaba como opcionales las funciones polinomial de orden 2 (Ver Figura 53). Luego de linealizar la función polinomial encontrada y podía detallar que la línea final cortaba a los círculos en varias ocasiones, dando un área final bastante grande mucho mayor que el área calculada con el método mencionado anteriormente.

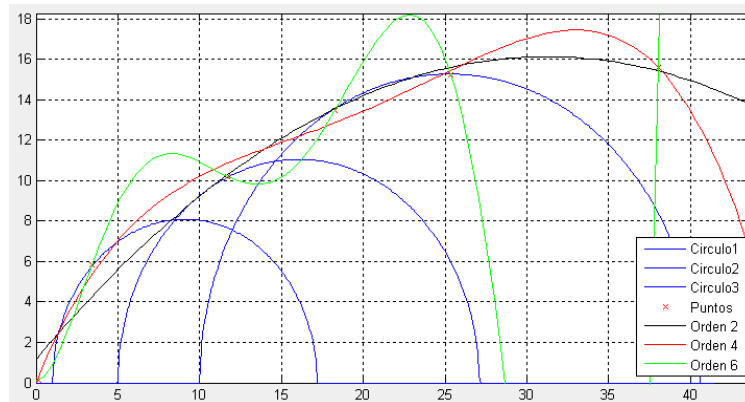


Figura 52. Ajuste polinomial para los círculos de Mohr, Función de orden par.

Fuente: Autores

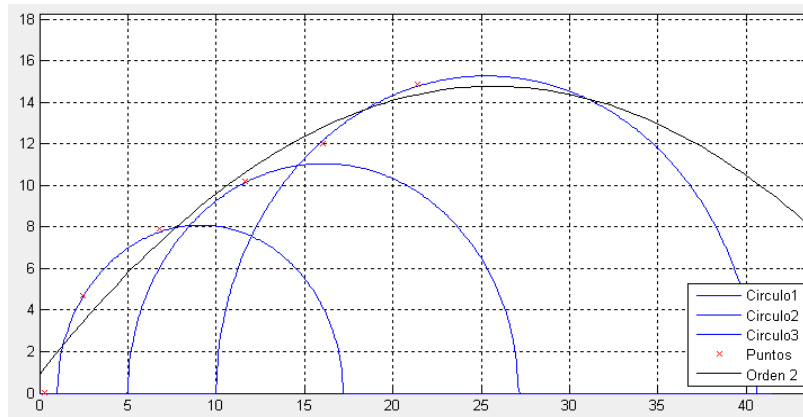


Figura 53. Ajuste polinomial para los círculos de Mohr, Función de orden cuadrada.

Fuente: Autores

- Círculo Envolvente y Círculo de Corte: El círculo envolvente y el de corte son la configuración más importante para el cálculo de la envolvente de falla, inicialmente planteado por el Ingeniero Publio Alejandro Sandoval, solo que en su metodología el círculo envolvente siempre era el último y el de corte era el primero (ver Figura 54.)

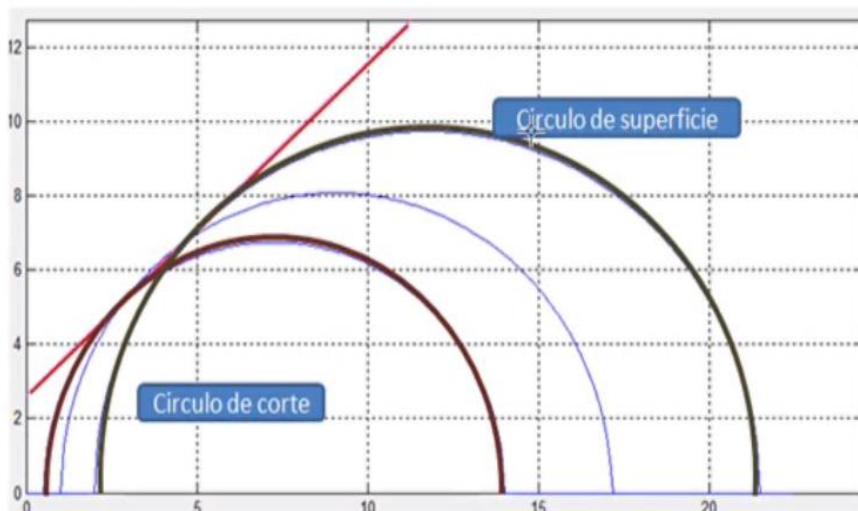


Figura 54. Círculo de superficie y círculo de corte.

Fuente: Autores

Para entender la nomenclatura utilizada, primero se definen algunos parámetros:

FunLinea: Función de la línea envolvente

FunCir1: Función dada para el Círculo 1

FunCir2: Función dada para el Círculo 2

FunCir3: Función dada para el Círculo 3

Radio, Centro: Corresponden a los valores encontrados en Java, correspondientes a los radios y centros de cada círculo.

Punto1: Valor dado al punto de corte, establece los límites de las integrales.

Círculo Envolvente: El círculo Envolvente es aquel en el que la línea envolvente va a seguir su superficie hasta encontrar el círculo de corte (Ver Figura); el procedimiento utilizado para que la línea siguiera la superficie del círculo es por medio del uso de la derivada.

Para calcular el paso de la línea envolvente primero hay que encontrar la derivada en un punto para la función del Círculo Envolvente y con eso se hace el cálculo de la pendiente:

$$m = \frac{d(\text{FunCir3})}{dx} \quad \text{Ecuación 4}$$

FunCir3 está dada en términos de X y lleva tiene la forma:

$$Y = \sqrt{(\text{Radio}^2 - (X - \text{Centro})^2)} \quad \text{Ecuación 5}$$

X esta desplazada en su centro, pero el radio se encuentra exactamente en $X=0$ por consiguiente no tiene desplazamiento. Luego el valor de X se reemplaza y se genera una línea recta dada por la ecuación:

$$Y = mX + b \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde Y es la función de la línea recta envolvente que va a pasar por la superficie del círculo, m es la pendiente, calculada de la *Ecuación 1*.

Luego se le resta al primer punto X el paso seleccionado por el usuario y se repite el procedimiento.

Círculo de Corte: El círculo de corte indica el final del recorrido de la línea envolvente.

El procedimiento para encontrar el círculo de corte consiste en igualar la función del círculo con la función de la envolvente, así como se muestra en la Ecuación 4.

Ecuación 5 = Ecuación 6,

$$Y = \sqrt{(\text{Radio}^2 - (X - \text{Centro})^2)} \quad ,y \quad Y = mX + b$$

$$Y = \sqrt{(\text{Radio}^2 - (X - \text{Centro})^2)} = mX + b \quad \text{Ecuación 7}$$

Luego de haber hecho éste procedimiento, se encuentran los puntos de X donde sean iguales a cero y se dice que la función ha cortado en esos puntos. Como la función de la envolvente va descendiendo por el círculo 3, se le establece al código que siga rodeando este círculo 3 hasta que encuentre el círculo 1 (encuentre el primer punto de corte).

- Panel de error del programa Graficador EFM:

El panel encargado de calcular el porcentaje de error, hace los cálculos por medio de integrales definidas, donde se especifican el número de puntos.

Para la especificación de los puntos se debe tener en cuenta la forma como quedaron los círculos y el número de puntos en los cuales ellos se corta, si ésta configuración queda mal realizada el área final no será confiable; para la especificación de los puntos de corte se puede dividir el cálculo del área en 3 opciones diferentes, 4 cortes, 5 cortes y 6 cortes.

Cuatro cortes: éste tipo de cortes se generan siempre que se seleccione el círculo 3 como círculo envolvente, el círculo 1 como círculo de corte y adicionalmente el círculo 2 no se toque con la línea envolvente. Cuando este evento ocurre los puntos de corte serían el primero entre la línea envolvente y el círculo 1 o de corte, el segundo sería el punto de corte entre el círculo 1 y el círculo 2, el tercer punto de corte estará entre el círculo 2 y el círculo 3 y el cuarto y último punto de corte estaría entre el círculo 3 y la línea envolvente (Ver Figura 55).

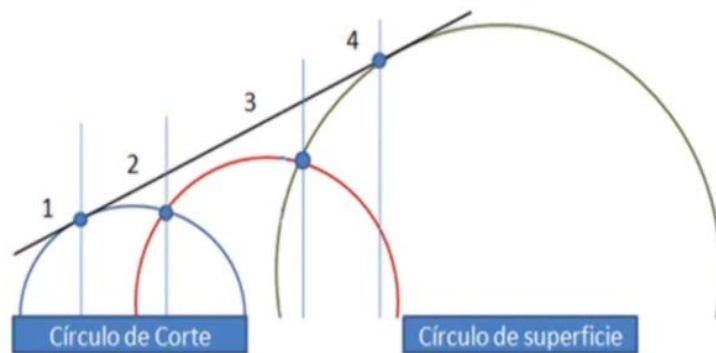


Figura 55. Panel de error para Cuatro cortes.

Fuente: Autores

Cinco Cortes: Para el evento de cinco cortes puede haber dos posibilidades:

Círculo 3, Superficie y Círculo 2 de corte: Cuando se seleccionan éstos círculos y adicionalmente el círculo 2 es más pequeño que el círculo 1, hace la que línea envolvente corte al círculo 1 en 2 puntos. Los respectivos puntos serían: punto 1 y 2 del círculo 1 y la línea envolvente, punto 3 entre los dos círculos punto 4 entre el círculo 2 y 3 (se puede notar que se ignora el punto de corte entre la línea envolvente y el círculo 2, ya que el punto anterior y el siguiente punto tendrían la integral entre las mismas funciones entonces no se ve afectada por ese punto. Y finalmente el punto 4 entre el círculo 3 y la línea envolvente (Ver Figura 56a).

Círculo 2, Superficie, Círculo 1 de corte: Una vez seleccionados éstos círculos y el círculo 3 sea lo suficientemente grande que se vea cortado por

la línea envolvente, se generan los siguientes puntos de corte: Punto 1, círculo 1 con línea envolvente, Punto 2 corte entre el círculo 1 y el círculo 2; al igual que en el caso anterior el punto de corte entre la línea envolvente y el círculo 2 no se toma en cuenta ya que la integral no se ve afectada, Punto 3 corte entre el círculo 2 y 3, Punto 4 y Punto 5 los cortes del círculo 3 con la línea envolvente (Ver Figura 56b).

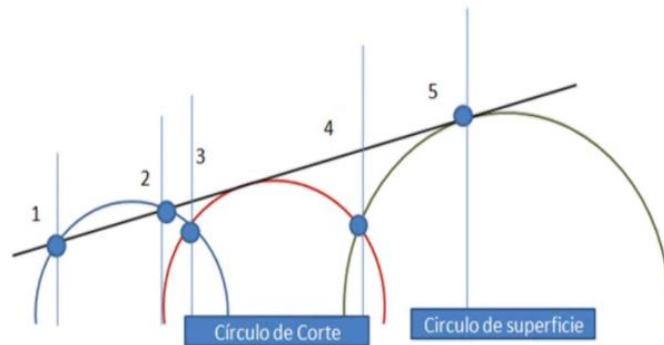


Figura 56a. Panel de error cinco cortes, seleccionando el círculo dos y círculo tres.

Fuente: Autores

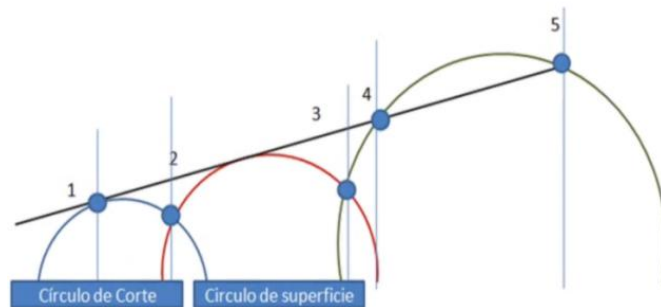


Figura 56b. Panel de error para cinco cortes, Seleccionando el círculo uno y dos.

Fuente: Autores

Para éste caso específico el programa esta implementado para que sepa distinguir entre cual de las dos opciones se está presentando en el momento en que recibe que se trata de 5 puntos. Por medio de un sistema

de guía el programa sabe los puntos hacia cual círculo está más cerca y con base a eso distingue entre sí es el numeral 3.2.1 o el 3.2.2.

Seis Cortes: El evento de 6 puntos de corte ocurre cuando se selecciona el círculo 3 como círculo de envolvente y el círculo 1 como círculo de corte, la diferencia con el numeral 3.1 es que en este caso el círculo 2 es mayor que el círculo 1, por consiguiente se ve cortado en dos puntos. Los correspondientes puntos de corte para éste caso serían: Punto 1 el corte entre el círculo 1 y la línea envolvente; el Punto 2 el corte entre el círculo 1 y el círculo 2; el Punto 3 y 4 el corte entre la línea envolvente y el círculo 2; El punto 5 el corte entre el círculo 2 y el círculo 3. Y finalmente el Punto 6 es el corte entre el círculo 3 y la línea envolvente.

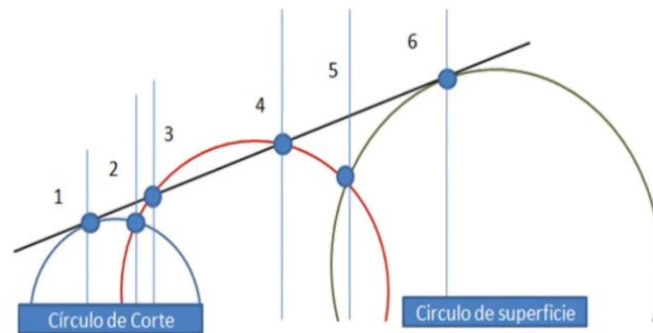


Figura 57. Panel de error para seis cortes.

Fuente: Autores

- Área bajo la línea envolvente:

El cálculo del área entre la línea envolvente y los círculos de Mohr se hace con el fin de encontrar cual es la línea envolvente que más se ajusta a los círculos de Mohr, para cada uno de los cortes se tienen las diferentes ecuaciones que son necesarias para el cálculo de ésta área.

Ahora se establecen las diferentes ecuaciones para los cálculos de las áreas según el número de cortes:

Cuatro cortes:

$$|Area1| = \left[\int_{Punto1}^{Punto2} (FunLinea - FunCir1) dx + \int_{Punto2}^{Punto3} (FunLinea - FunCir2) dx + \int_{Punto3}^{Punto4} (FunLinea - FunCir3) dx \right] \quad \text{Ecuación 8}$$

Cinco Cortes: para cinco cortes se pueden presentar las siguientes dos posibilidades:

Cinco Cortes A:

$$|Area2| = \left[\int_{Punto1}^{Punto2} (FunLinea - FunCir1) dx + \int_{Punto2}^{Punto3} (FunLinea - FunCir1) dx + \int_{Punto3}^{Punto4} (FunLinea - FunCir2) dx + \int_{Punto4}^{Punto5} (FunLinea - FunCir3) dx \right] \quad \text{Ecuación 9}$$

Cinco Cortes B:

$$|Area3| = \left[\int_{Punto1}^{Punto2} (FunLinea - FunCir1) dx + \int_{Punto2}^{Punto3} (FunLinea - FunCir2) dx + \int_{Punto3}^{Punto4} (FunLinea - FunCir3) dx + \int_{Punto4}^{Punto5} (FunLinea - FunCir3) dx \right] \quad \text{Ecuación 10}$$

Seis Cortes:

$$|Area4| = \left[\int_{Punto1}^{Punto2} (FunLinea - FunCir1) dx + \int_{Punto2}^{Punto3} (FunLinea - FunCir2) dx + \int_{Punto3}^{Punto4} (FunLinea - FunCir2) dx + \int_{Punto4}^{Punto5} (FunLinea - FunCir2) dx + \int_{Punto5}^{Punto6} (FunLinea - FunCir3) dx \right]$$

Ecuación 11

- Porcentajes de Error

Una vez hecho el análisis de los dos procedimientos (método numérico y método círculo envolvente y círculo de corte), se hicieron los cálculos de las diferentes áreas para descartar el método menos exacto. Se dice que a mayor área entre la envolvente y el círculo de Mohr, mayor es el error encontrado. Por medio de Matlab se hicieron los diferentes cálculos y se encontró que el método numérico después de linealizada la función, se presentaba un mayor porcentaje de error (ver Figura 50), debido a que

presenta mayor área que el método de Círculo envolvente y círculo de corte (ver Figura 59).

En la Figura 58 se puede detallar que la envolvente linealizada corta en varias oportunidades a los círculos de Mohr, haciendo que el área calculada por la integral se haga mayor a 38 unidades de área; Mientras que en la Figura 51 se seleccionó el círculo 3 como círculo envolvente y el círculo 1, como círculo de corte, generando 5 puntos de corte y un área menor a 4 unidades de área.

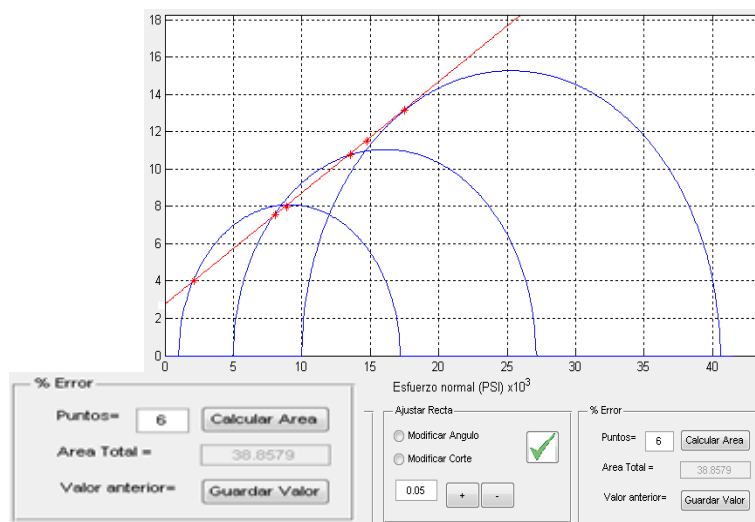


Figura 58. Porcentaje de Error Función linealizada; 38.8570 Unidades de área.

Fuente: Autores

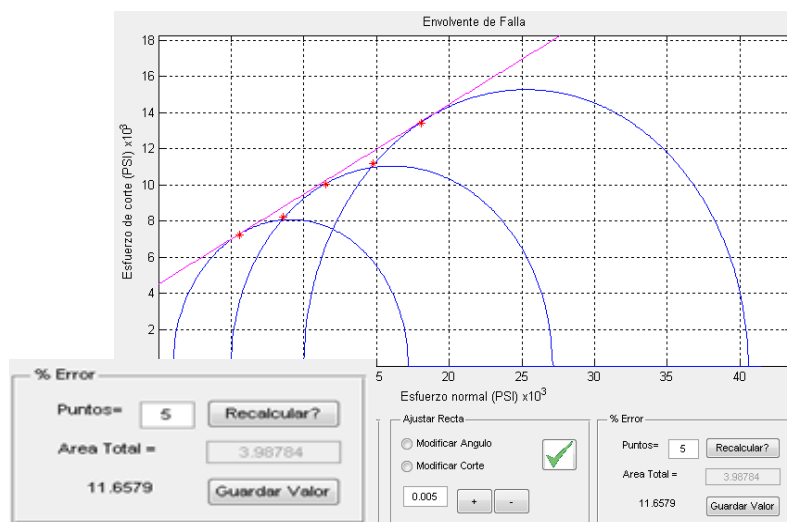


Figura 59. Porcentaje de Error, método círculo envolvente y círculo corte;
3.987 Unidades de área

Fuente: Autores

7.1.4.2.2. Tiempo estimado para la interpretación:

El proceso de interpretación de una EFM es el más lento en el software, debido a que tiene que cargar el entorno gráfico de Matlab luego de haber interpretado la mitad de la prueba en Java. En el cálculo de los módulos y los círculos de Mohr la herramienta tarda aproximadamente cinco minutos; cinco minutos adicionales esperando que el entorno del Graficador EFM cargue totalmente y finalmente se esperan diez minutos adicionales en la interpretación final de el Angulo de fricción interna y la cohesión (teniendo en cuenta que se utilizó el panel de error para encontrar la envolvente que más se ajusta a los círculos de Mohr).

Tiempo total aproximado: 20 minutos.

7.1.4.3. Ensayo de Indentación

Desarrollo del ensayo por medio del software

El software intérprete para las pruebas de Indentación fue desarrollado en Matlab; se puede acceder desde el Módulo de Java, seleccionando la prueba de Indentación y el programa se encargará de abrir el ejecutable; Se selecciona Matlab debido a que es necesario el uso de Métodos numéricos para encontrar las diferentes pendientes, evitando que este procedimiento siga siendo manual.

7.1.4.3.1. Mínimos Cuadrados:

Mínimos cuadrados es una técnica de análisis numérico encuadrada dentro de la optimización matemática, en la que, dados un conjunto de pares (o ternas,

etc), se intenta encontrar la función que mejor se aproxime a los datos (un "mejor ajuste"), de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático.⁶

El Graficador IDN es un programa de extensión .exe desarrollado en Matlab; se escoge Matlab como software para desarrollar el programa, debido a que cuenta con un paquete de librerías, que incluyen análisis numérico.

Para el Software era necesario encontrar una pendiente que mostrara el mejor ajuste para los tramos en que se encontraba dividida la grafica de Carga en la prueba de Indentación; para este caso se utiliza la función *Polyfit*.

Polyfit es una función en Matlab que se encarga de encontrar los coeficientes de un polinomio $p(x)$ de grado n que se ajusta a los datos introducidos, por medio de mínimos cuadrados.

7.1.4.3.2. Graficador IDN

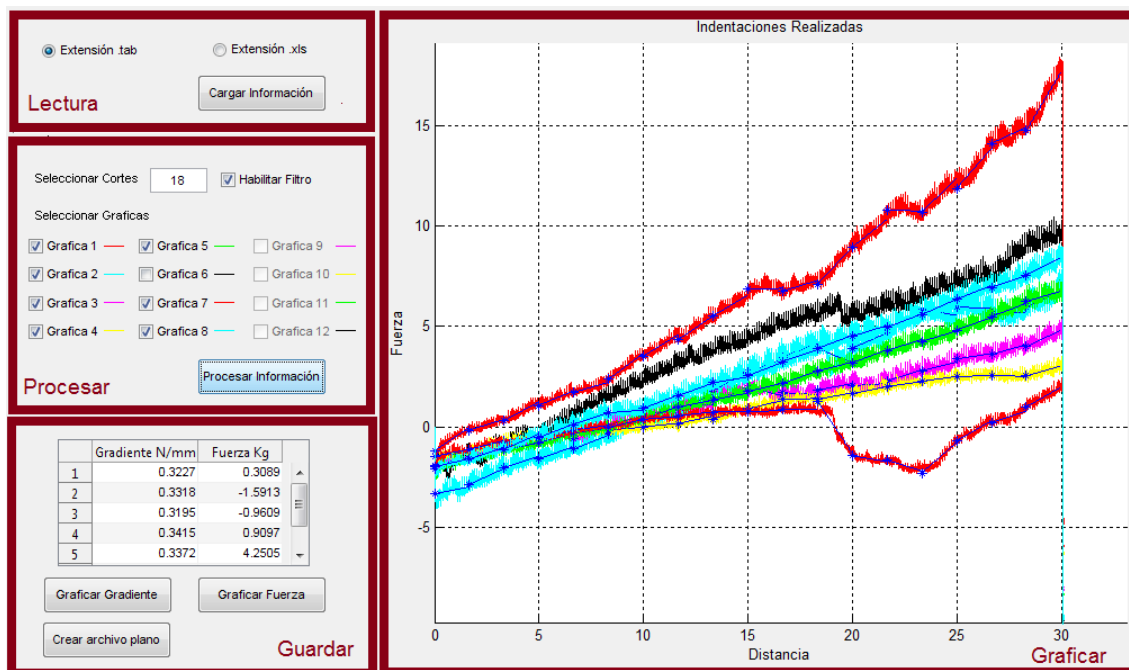


Figura 60. Diseño del Graficador IDN

Fuente: Autores

⁶ Fuente: Análisis Numérico – Richar L. Burden

El proceso de interpretación que utiliza el Graficador IDN es:

- Proceso de Lectura: El Graficador IDN lee el espécimen que arroja el software en el que se hizo el ensayo; cada vez que el indentador perfora la muestra genera una grafica de carga y descarga; por consiguiente existe un espécimen por cada uno de estos procesos. El software puede leer 1 (un) espécimen o varios en caso en que el indentador haya perforado la muestra en varias ocasiones.
- Dibujado de las graficas: El software pinta la grafica de cada uno de los especimenes en diferentes colores (al igual que en el software del laboratorio, Ver Figura 61).
- Selección del número de cortes: El Software selecciona varios números de corte de las graficas y con base a ese número, se corta la grafica en cada uno de los puntos.

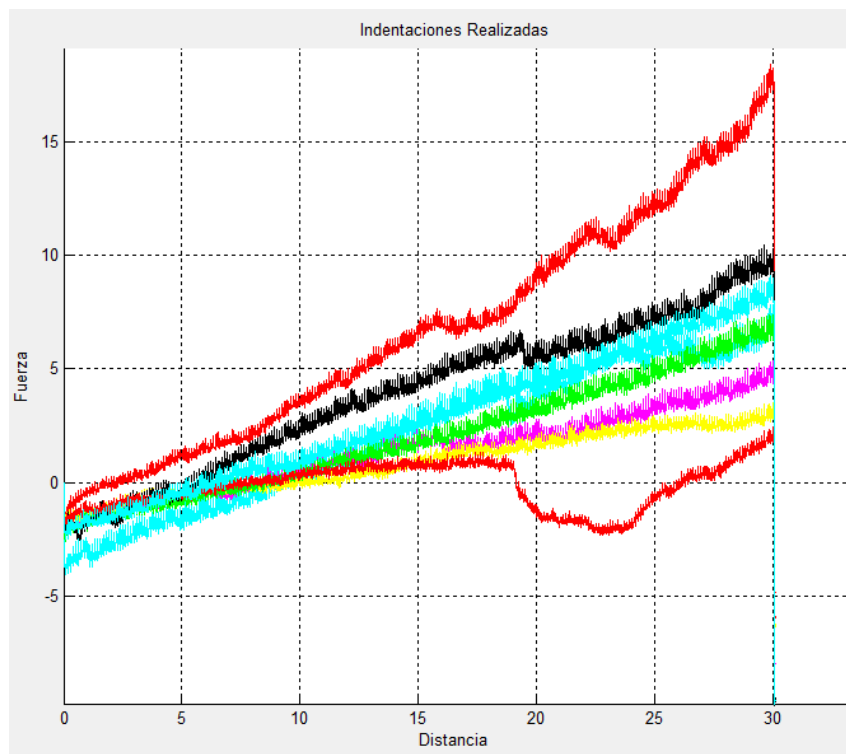


Figura 61. Grafico generado

Fuente: Autores

- Selección de las pendientes: Una vez que se han cortado las diferentes graficas, el Graficador IDN comienza a encontrar todas las pendientes por gráfica; este procedimiento se hace por métodos numéricos, usando la teoría de Mínimos cuadrados; una vez procesada la información se encuentra una línea recta por cada uno de los puntos en los que se había dividido la gráfica.
- Eliminación de pendientes negativas: Las pendientes negativas no son relevantes en la interpretación de este ensayo; el programa no elimina las pendientes, pero tampoco las tiene en cuenta para seleccionarlas como pendiente pivote.
- Comparación de las pendientes: Se establece la primera pendiente de la Grafica 1 como pivote y se compara con el resto de pendientes en el resto de Graficas dibujadas; el objetivo es encontrar por lo menos una pendiente similar (aceptando una tolerancia igual a 0.03 o 3% de error) o cercana a la pendiente pivote. Si la pendiente que se establece como pivote no encuentra al menos 1 pendiente similar en las otras graficas, es descartada y se selecciona la siguiente pendiente como pivote. Este proceso se repite hasta encontrar una pendiente similar en cada una de las gráficas.
- Cálculo de resultados finales: una vez obtenida cada una de las pendientes por gráfica, se selecciona el valor máximo de Y , o y2, para encontrar la fuerza aplicada:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad \text{Ecuación 12}$$

- Graficación de los resultados: Finalmente se visualizan los resultados encontrados en el paso anterior; se genera una gráfica de número de indentaciones en la roca vs. gradiente (pendientes encontradas) y número de indentaciones vs. Fuerza.

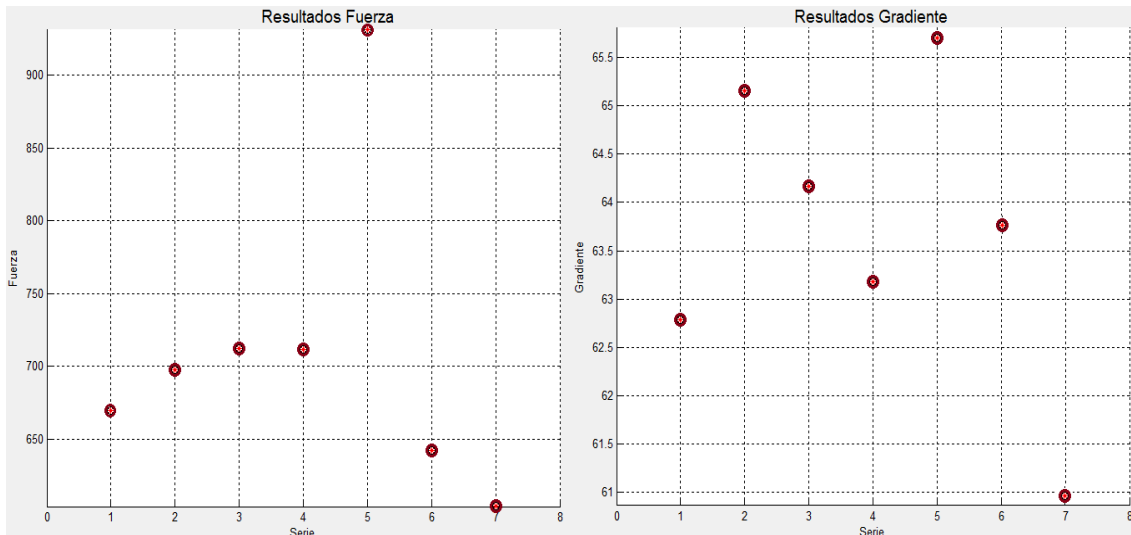


Figura 62. Resultados de Fuerza y de gradiente contra número de Indentaciones

Fuente: Autores

Para algunos casos específicos, se encontrarán ensayos de indentación, en que alguna de las graficas no suministre información valiosa o relevante para los resultados que se esperan, por este motivo en el software se implementó un panel que puede eliminar graficas según el operador (Ver Figura 63).

Hecho esto se elimina una de las graficas, eliminando así las posibles pendientes de esa gráfica que pueden dar resultados incongruentes.

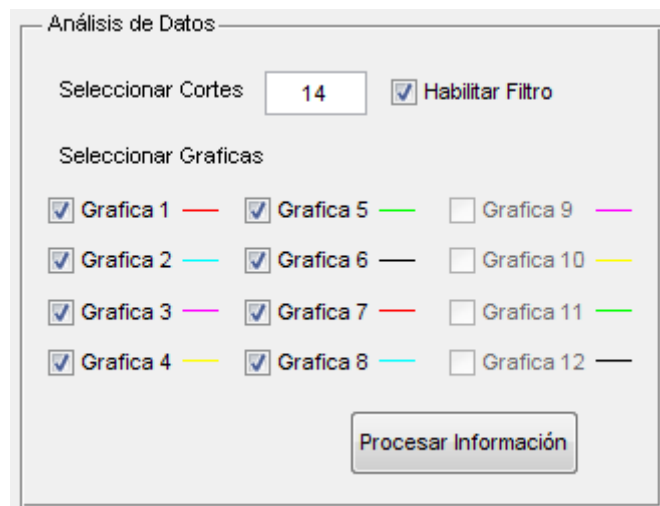


Figura 63. Selección de graficas para interpretación del ensayo de Indentación

Fuente: Autores

7.1.4.3.3. *Tiempo estimado para la interpretación:*

Esta prueba es la prueba más rápida en el software, tarda aproximadamente dos minutos encontrando la pendiente, haciendo las comparaciones y realizando los cálculos finales, cinco minutos adicionales en revisión y resultados finales.

Tiempo total aproximado: 7 minutos.

7.1.4.4. Ensayo de Compresibilidad:

Desarrollo del ensayo por medio del software

La interpretación del ensayo de compresibilidad fue totalmente desarrollada en Java. La complejidad de la prueba se encuentra en el análisis gráfico que hay que realizar y en la regresión polinomial de las diferentes deformaciones. Una alternativa es enviar toda la prueba a Matlab al igual que con las Indentaciones, EFM y acústicas, se revisa el procedimiento de la prueba y la graficación es exclusivamente para visualización, haciendo innecesario el cambio de entorno gráfico para este ensayo.

Para graficar en Java se necesita un paquete de librerías de licencia gratuita llamado JFreeChart; se puede acceder al código y al paquete de clases desde la página oficial de los creadores.

Diseño del intérprete para Compresibilidad:

El entorno gráfico para este ensayo, fue desarrollado completamente en Java, un panel para mostrar los gráficos, otro panel para mostrar los resultados y un adicional para las opciones del ensayo.

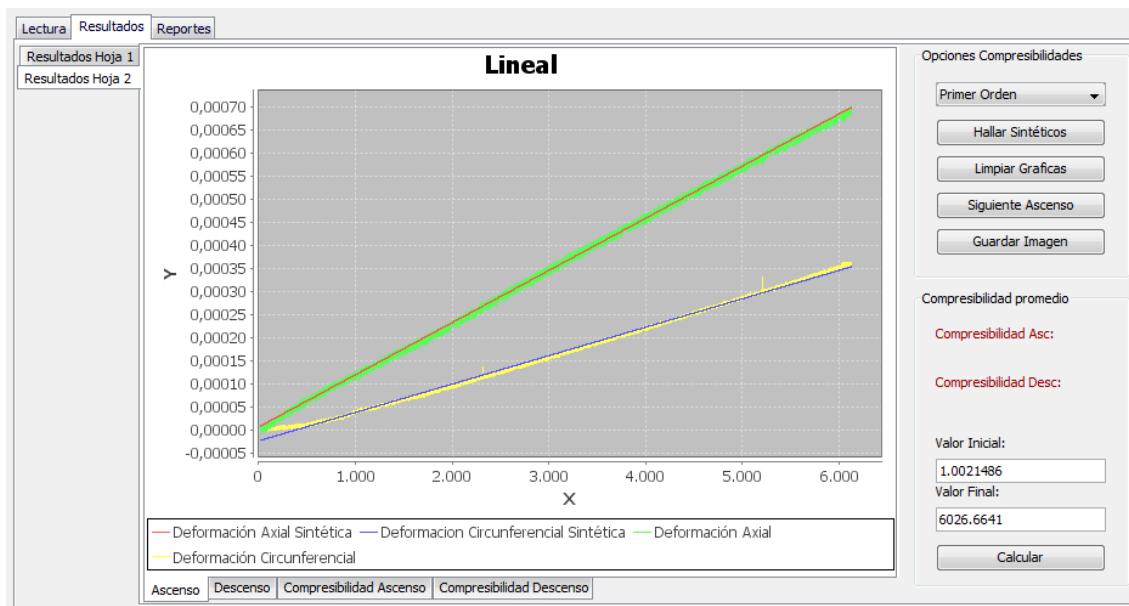


Figura 64. Diseño del intérprete de pruebas de compresibilidad.

Fuente: Autores

7.1.4.4.1. Librerías JFreeChart

JFreeChart es una biblioteca 100% gratuita para desarrollo de gráficos en Java, ésta librería o paquete, hace que sea fácil para los desarrolladores mostrar gráficos de calidad profesional en sus aplicaciones.

El amplio conjunto de funciones JFreeChart incluye:

- Una consistente y bien documentada API, que admite una amplia gama de tipos de gráficos.
- Un diseño flexible que es fácil de extender tanto del lado del servidor y las aplicaciones como del lado del cliente.
- Soporte para los tipos de salida, incluyendo los componentes Swing, archivos de imagen (incluyendo PNG y JPEG) y gráficos vectoriales en formato de archivo (incluyendo PDF, EPS y SVG).

- JFreeChart es "fuente abierta" o, más específicamente, el software libre . Se distribuye bajo los términos de la GNU Lesser General Public Licence (LGPL), que permite su uso en aplicaciones propietarias.⁷

7.1.4.4.2. Procedimiento del Intérprete para la prueba de compresibilidad:

- 1.) Primero se hacen los diferentes cálculos de deformación axial y circunferencial; luego se encuentran los valores de esfuerzo, longitud y diámetro; finalmente se calcula el volumen y la Compresibilidad¹.
- 2.) Luego se utiliza una regresión por mínimos cuadrados para las dos deformaciones requeridas. Los cálculos se han ampliado para hacer regresión a los datos desde polinomios de orden 2 hasta polinomios de orden 9.
- 3.) Finalmente se grafican las deformaciones Axial, Circunferencial, Axial Sintética encontrada y Circunferencial sintética encontrada; y en una pestaña adicional se grafica la compresibilidad.

Para interpretar las pruebas de compresibilidad, se accede por el menú de pruebas (Figura 65) seleccionando la opción que dice “prueba de Compresibilidad” y el botón de continuar redireccionará hacia el panel principal de lectura e interpretación de pruebas.

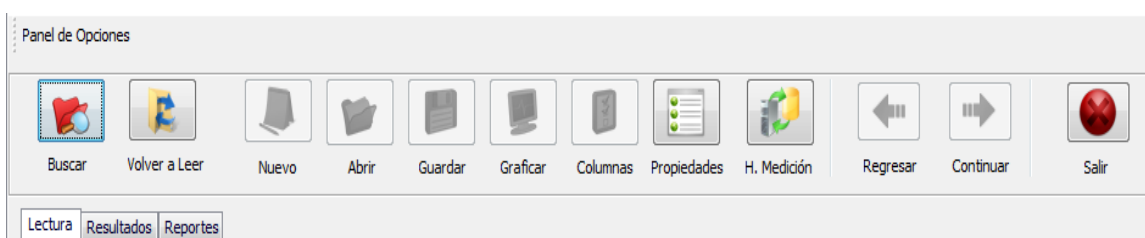


Figura 65. Panel de interpretación

Fuente: Autores

⁷ Fuente: <http://www.jfree.org/jfreechart/>

En el entorno de lectura, el programa por medio de “Buscar” puede acceder al espécimen que contiene información de la prueba (valores tomados mientras se desarrollaba la prueba de compresibilidad en la MTS 815).

Una vez que el programa haya leído del espécimen, visualiza la información en el Área de datos que se encuentra dentro del panel de lectura en el panel de Interpretación (ver Figura 66).

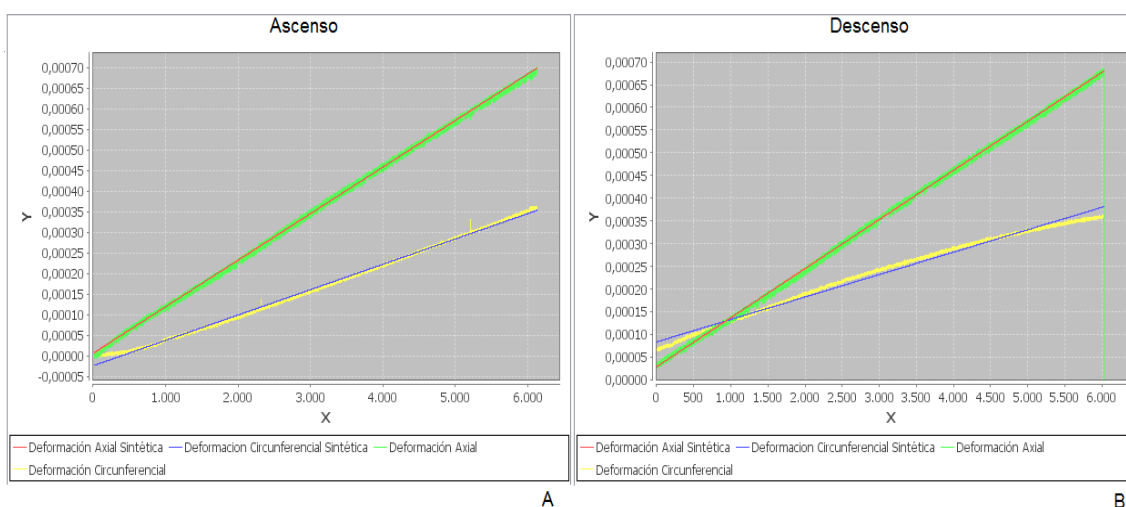


Figura 66. Resultados gráficos de la prueba; A.) Ascenso; B.) Descenso

Fuente: Autores

Compresibilidad promedio

Compresibilidad Asc:
1.1405944039305815E-7

Compresibilidad Desc:
1.193623291500654E-7

Valor Inicial:

Valor Final:

Figura 67. Resultados finales del ensayo

Fuente: Autores

7.1.4.4.3. Tiempo estimado para la interpretación:

La prueba de compresibilidad es totalmente interpretada en Java, debido a esto se ahorra gran cantidad de tiempo; el problema consiste en la cantidad de datos que lee el software, durante el proceso de lectura y análisis de los datos, puede llegar a tardar un poco menos de cinco minutos; para el proceso de graficación y análisis de resultados tarda 5 minutos adicionales.

Tiempo total aproximado: 10 minutos.

7.1.5. Enlace de Java a Matlab

Para utilizar Matlab como alternativa de graficación, se necesita buscar la manera de enlazarlo todo lo desarrollado en Java. Se contaban con dos posibles alternativas:

- *Generar una librería:* Crear el programa en Matlab y luego generar una librería con una opción en el compilador llamado BuilderJA, donde el programa se encargaba de crear una librería exclusiva para Java, donde se puede anexar el programa al intérprete. La desventaja que presentaba ésta alternativa era que cargar todo el entorno gráfico de Java y Matlab sobre el mismo programa (compilado en Java) hacía que éste trabajara más lento (desbordando un error muy común: “*Java heap space*”, esto significa que la máquina virtual de Java se ha quedado sin espacio suficiente) haciendo necesario un ordenador con mayor capacidad para trabajar con el software.
- *Generar un ejecutable:* La otra opción consiste en crear un ejecutable del programa desarrollado en Matlab por medio de la opción BuilderEX del compilador y luego hacer un enlace por Java para abrir el Graficador. Ésta opción fue la seleccionada, porque además de disminuir la sobrecarga gráfica que generaba el anterior, también da la opción de cargar los programas individualmente.

Finalmente por medio del módulo desarrollado en Java se accede por medio de la función *Runtime* (código en java para hacer llamado a un archivo externo al proyecto generado). Éste llamado se hace especificando la ubicación donde el ejecutable de Matlab se encuentra (directorio raíz del Graficador IDN, SNL y EFM).

7.1.6. Robustéz del Software

7.1.6.1. Módulo en Java

El programa desarrollado en Java va generando la información a medida que el usuario va navegando por él; por consiguiente no se puede acceder a ningún panel sin seguir el procedimiento señalado por cada tarea.

- Interpretar un ensayo: Una vez validado el usuario, accede por el menú de pruebas al ensayo que desea realizar, lo cual se le impide pasar a otra pestaña hasta que no lea e interprete el espécimen, evitando así que se generen errores en Java.

Una vez haya interpretado la prueba podrá guardar o graficar los resultados, antes los botones estarán inhabilitados, evitando así que se creen archivos sin información en el disco.

Cuando se obtienen los resultados se habilita el panel de reportes, generando la posibilidad de crear un archivo pdf con la información del ensayo y no antes.

- Crear el registro de una roca en el laboratorio (Ciclo de vida de la roca): Como se estableció en el capítulo 7, el registro de la roca es procedimental y no se puede saltar de un estado a otro, por consiguiente este proceso se valida con base a los pasos que siguen en el laboratorio.
- Administrar usuarios y permisos: el software otorga el control total de la herramienta exclusivamente al líder del laboratorio; el resto de usuarios van a estar limitados y las opciones van a ser limitadas a los trabajos para los que se encuentra preparado.

7.1.6.2. Módulo en Matlab

Para Matlab se verificó la robustez de cada uno de los graficadores, evitando que los usuarios cometieran errores en la navegación

- Graficador EFM: todos los paneles dentro del programa se encuentran deshabilitados a excepción del panel de lectura; una vez que se leen los datos de los círculos se habilita el panel de propiedades y con éste se hacen visibles los círculos que el software encuentra (evitando así que se seleccionen círculos que no existen); seleccionados los círculos para encontrar la envolvente se habilitan los paneles para ajustar la envolvente, el panel de error y el panel de opciones. Este procedimiento se hace gradual con el fin de evitar que el usuario seleccione opciones no funcionales en momentos no indicados por la herramienta y siga el procedimiento correcto para la interpretación de la prueba.
- Graficador IDN: El Graficador para los ensayos de indentación, mantiene habilitado inicialmente el panel de Lectura; una vez leídos los datos, habilita las graficas que encuentra (evitando así que no se seleccionen graficas que no existe); luego interpretada la información habilita el panel de resultado, para graficar en este momento (y no antes) los valores finales obtenidos.
- Graficador SNL: El Graficador para los ensayos acústicos, mantiene habilitado inicialmente el panel de Lectura; luego habilita el panel de opciones, donde se van a colocar los valores de la longitud, densidad y los valores de las gráficas. Una vez procesada la información habilita el panel de graficación para evitar que de esta manera se hagan gráficas sin haber encontrado el punto inicial de la señal. Además se habilita el panel de resultados con las opciones correspondientes para éste proceso (ajuste de punto inicial, etc).

Una vez se han obtenido todos los resultados en el programa, se habilita el botón de guardar, para almacenar la información del ensayo, este botón

almacena todos los resultados en tablas organizadas, y además generar un archivo de extensión .txt con el estándar del SILAB:

Sample ID	Componente	Unidad	Resultado
-----------	------------	--------	-----------

7.1.7. Seguridad del Software:

- El software va ser para uso exclusivo de los integrantes del laboratorio, por consiguiente la base de datos solo va a estar instalada en el computador principal del LMR.
- Sólo los usuarios del laboratorio podrán tener el programa en su computador, por medio del líder del laboratorio se controla quién tiene permitido instalar el programa en su equipo.
- Solo los usuarios activos del laboratorio podrán crear cuenta de usuario y contraseña para acceder al software, de ésta manera se mantendrá controlado quienes estarán accediendo al programa.
- Solo los usuarios con cuenta activa en la base de datos, podrán acceder a la información del LMR, por consiguiente aquellos que dejen el laboratorio, pasarán a ser inactivos y así continúen con el software en su equipo no podrán validarse en la base de datos, ni acceder a la información del laboratorio.

7.2. ESTRUCTURA FINAL DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE

El software finalmente quedó estructurado de la siguiente manera:

Para la administración de la información se utilizó Java (Netbeans) y MySQL, dos programas de licencia gratuita.

Para el desarrollo de interpretación de pruebas de laboratorio, se desarrolló la herramienta con Java dentro del IDE Netbeans, con uso de librerías gráficas gratuitas JFreeChart.

Para el intérprete de acústicas e Indentaciones y además para el cálculo de la pendiente para la prueba de envolvente de falla múltiple, se utiliza el software Matlab, el cual cuenta con una serie de librerías especializadas en el análisis de datos y manejo matemático de la información.

Matlab no es de uso gratuito, para su uso en el laboratorio fue necesario adquirir las toolbox de señales, se realizó la cotización para la compra de las librerías necesarias para el uso de los Graficadores (SNL, IDN, EFM).

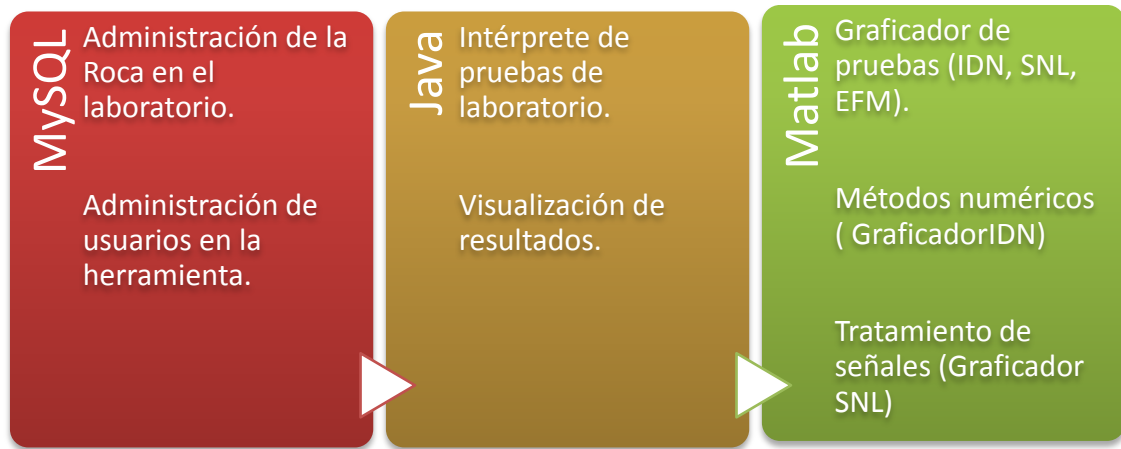


Figura 68. Lenguajes de programación y sus tareas.

Fuente: Autores

8. RESULTADOS

8.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

El cálculo del error se basa en los resultados obtenidos con el valor dinámico del software y el valor dinámico del laboratorio:

$$\%Error = \frac{ValorLaboratorio - ValorSoftware}{ValorLaboratorio} \quad Ecuación13$$

8.1.1. Ensayo Acústico:

Para el ensayo acústico se hicieron pruebas en 26 grupos de datos de TETUAN, cada uno con más de 110 archivos. El ajuste encontrado fue similar al ajuste manual que utilizaban en el laboratorio y los datos se encuentran dentro del valor esperado.

Para establecer la relación entre la prueba dinámica y la prueba estática, se compara el valor de la prueba (Herramienta software) con el valor del ensayo estático (prueba destructiva). Este valor se debe ser menor al 30%:

$$\%ErrorEstático = 100 * \frac{ValorEstático}{ValorDinámico} \quad Ecuación14$$

Ésta ecuación solo puede ser utilizada para el Módulo de Young y la Relación de Poisson (valores obtenidos en la prueba destructiva).

Para la visualización de los resultados, se selecciona una muestra de 2 ensayos (de los 26 totales) y 5 valores (de los 110 totales) de la población total de pruebas elaboradas:

8.1.1.1. Punto inicial de la señal S y P (to)

Ensayo 1:

Software			Laboratorio			%Error		
Señal P	Señal S1	Señal S2	Señal P	Señal S1	Señal S2	Señal P	Señal S1	Señal S2
28.12	64	61	28.3	58.2	57.5	0.636	9.965	6.086
28.12	64	61	28.3	58.2	57.5	0.636	9.965	6.086
28.44	63	61	28.3	58.2	57.5	0.494	8.247	6.086
28.44	60	61	28.3	58.2	57.5	0.494	3.092	6.086
28.44	60	61	28.3	58.2	57.5	0.494	3.092	6.086

Tabla1. Resultados Punto inicial Señal S y P, ensayo 1

Ensayo 2:

Software			Laboratorio			%Error		
Señal P	Señal S1	Señal S2	Señal P	Señal S1	Señal S2	Señal P	Señal S1	Señal S2
28.12	62.6	60	27.9	54.7	56	0.788	14.442	7.142
28.12	58.1	58.3	27.9	54.7	56	0.788	6.215	4.107
28.44	58.1	58.2	27.9	54.7	56	1.935	6.215	3.928
28.44	58.1	58.2	27.9	54.7	56	1.935	6.215	3.928
28.44	58.1	58.3	27.9	54.4	56	1.935	6.801	4.109

Tabla2. Resultados Punto inicial Señal S y P, ensayo 2

8.1.1.2. *Módulo de Young*

Ensayo 1:

(Señal S1)

Valor Software	Valor Laboratorio	%ErrorDinámicos	Valor Estático	%ErrorEstáticos
2.50E+7	3.34E+7	25.101	3.247E+7	29.88
2.50E+7	3.34E+7	25.101	3.247E+7	29.88
2.50E+7	3.34E+7	25.101	3.247E+7	29.88
2.80E+7	3.34E+7	16.301	3.247E+7	15.96
2.80E+7	3.34E+7	16.302	3.247E+7	15.96

Tabla3. Resultados Módulo de Young, Señal S1, ensayo 1

(Señal S2)

Valor Software	Valor Laboratorio	%ErrorDinámicos	Valor Estático	%ErrorEstáticos
2.61E+07	3.391E+07	23.01	3.247E+07	24.40
2.61E+07	3.391E+07	23.01	3.247E+07	24.40
2.60E+07	3.391E+07	23.31	3.247E+07	24.40
2.60E+07	3.391E+07	23.31	3.247E+07	24.40
2.60E+07	3.391E+07	23.31	3.247E+07	24.40

Tabla4. Resultados Módulo de Young, Señal S2, ensayo 1

Ensayo2:

(Señal S1)

Valor Software	Valor Laboratorio	%ErrorDinámicos	Valor Estático	%ErrorEstáticos
3.15E+07	4.08E+07	2.28E+01	3.52E+07	11.74
3.15E+07	4.08E+07	2.28E+01	3.52E+07	11.74
3.15E+07	4.08E+09	9.92E+01	3.52E+07	11.74
3.15E+07	4.08E+07	2.28E+01	3.52E+07	11.74
3.15E+07	4.14E+07	2.39E+01	3.52E+07	11.74

Tabla5. Resultados Módulo de Young, Señal S1, ensayo 2

(Señal S2)

Valor Software	Valor Laboratorio	%ErrorDinámicos	Valor Estático	%ErrorEstáticos
4.10E+07	3.72E+07	1.02E+01	3.52E+07	14.14
3.06E+07	3.72E+07	1.77E+01	3.52E+07	15.03
3.08E+07	3.72E+07	1.73E+01	3.52E+07	14.28
3.08E+07	3.72E+07	1.73E+01	3.52E+07	14.28
3.06E+07	3.72E+07	1.77E+01	3.52E+07	15.03

Tabla6. Resultados Módulo de Young, Señal S2, ensayo 2

8.1.1.3. *Relación de Poisson (S1,S2)*

Ensayo 1:

(Señal S1)

Valor Software	Valor Laboratorio	%ErrorDinámicos	Valor Estático	%ErrorEstáticos
0.413	0.37	11.400	0.302	26.87
0.414	0.37	11.300	0.302	27.05
0.409	0.37	10.100	0.302	26.16
0.383	0.37	3.250	0.302	21.14
0.389	0.37	4.700	0.302	22.36

Tabla7. Resultados Relación de Poisson, Señal S1, ensayo 1

(Señal S2)

Valor Software	Valor Laboratorio	%ErrorDinámicos	Valor Estático	%ErrorEstáticos
0.404	0.369	9.530	0.302	25.24
0.404	0.369	9.530	0.302	25.24
0.399	0.369	8.230	0.302	24.31
0.399	0.369	8.230	0.302	24.31

0.399	0.369	8.170	0.302	24.31
-------	-------	-------	-------	-------

Tabla8. Resultados Relación de Poisson, Señal S2, ensayo 1

Ensayo 2:

(Señal S1)

Valor Software	Valor Laboratorio	%ErrorDinámicos	Valor Estático	%ErrorEstáticos
0.358	0.34	5.291	0.253	29.32
0.358	0.34	5.290	0.253	29.32
0.358	0.34	5.290	0.253	29.32
0.358	0.34	5.290	0.253	29.32
0.358	0.34	5.290	0.253	29.32

Tabla9. Resultados Relación de Poisson, Señal S1, ensayo 2

(Señal S2)

Valor Software	Valor Laboratorio	%ErrorDinámicos	Valor Estático	%ErrorEstáticos
0.364	0.362	0.552	0.253	30.49
0.363	0.362	0.276	0.253	30.30
0.363	0.362	0.276	0.253	30.30
0.363	0.362	0.276	0.253	30.30
0.364	0.362	0.552	0.253	30.40

Tabla10. Resultados Relación de Poisson, Señal S2, ensayo 2

8.1.2. Ensayo Envolvente de Falla Múltiple

8.1.2.1. Módulo de Young y Relación de Poisson

Resultados encontrados en el Intérprete, Módulo de Young y Relación de Poisson, el programa solo hace el procedimiento para pruebas realizadas con extensómetro.

Módulo de Young

Prueba 1	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Tangente	2.82E+06	2,8078 E +06	0.37%
Promedio	2.84E+06	2,8593 E +06	0.75%
Secante	2.26E+06	2,2516 E +06	0.40%

Tabla11. Resultados Módulo de Young, EFM Prueba 1

<u>Prueba 2</u>	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Tangente	1.86E+06	1.8078 E +06	2,5759%
Promedio	1.88E+06	1.8090 E +06	3,7080%
Secante	1.45E+06	1.3430 E +06	7.26%

Tabla12. Resultados Módulo de Young, EFM Prueba 2

Relación de Poisson

<u>Prueba 1</u>	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Tangente	0.088	0.0867	1,4772%
Promedio	0.0919	0.0932	1,4145%
Secante	0.0726	0.0714	1,6528%

Tabla13. Resultados Relación de Poisson, EFM Prueba 1

<u>Prueba 2</u>	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Tangente	0.0608	0.0603	0.82%
Promedio	0.0699	0.0693	0.86%
Secante	0.0362	0.0369	1,9337%

Tabla14. Resultados Relación de Poisson, EFM Prueba 2

8.1.2.2. *Graficador EFM*

Resultados encontrados con el software desarrollado en Matlab, para el cálculo de la pendiente, el AFI y la cohesión:

Prueba 1, Círculos 1,2,3

Dato	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Pendiente	1.14	1.14	0
AFI	48.8	48.909	0.2233
Cohesión	2449,00	2451.2	0.0898

Tabla15. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 1, círculos 1,2,3

Prueba 1, Círculos 2,3,4

Dato	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Pendiente	0.81	0.81	0
AFI	39.31	39.201	0.2777
Cohesión	6391.39	6413	0.3381

Tabla16. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 1, círculos 2,3,4
Prueba 2, Círculos 1,2,3

Dato	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Pendiente	1.07	1.08	0.9345
AFI	47.099	47.339	0.7019
Cohesión	2203.82	2145.26	2.6572

Tabla17. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 2, círculos 1,2,3

Prueba 2, Círculos 2,3,4

Dato	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Pendiente	0.9	0.9	0
AFI	42.101	42.109	0.019
Cohesión	4359,55	4394.52	0.8021

Tabla18. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 2, círculos 2,3,4

Prueba3, Círculos 1,2,3

Dato	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Pendiente	0.42	0.43	2.3809
AFI	23.2	23.325	0.5387
Cohesión	3423.51	3415.29	0.2401

Tabla19. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 3, círculos 1,2,3

Prueba 3, Círculos 2,3,4

Dato	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Pendiente	0.71	0.71	0
AFI	35.599	35.592	0.5421
Cohesión	1150.64	1189.57	3.3833

Tabla20. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 3, círculos 2,3,4

Prueba 3, Círculos 3,4,5

Dato	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Pendiente	1.35	1.35	0
AFI	53.5	53.599	0.185
Cohesión	-5111.49	-5138.21	0.5227

Tabla21. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 3, círculos 3,4,5
Prueba 4, Círculos 1,2,3

Dato	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Pendiente	1.23	1.23	0
AFI	51	51.058	0.1137
Cohesión	3382.05	3410.08	0.8287

Tabla22. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 4, círculos 1,2,3

Prueba 4, Círculos 2,3,4

Dato	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Pendiente	0.99	0.99	0
AFI	44.799	44.777	0.0491
Cohesión	6176.83	6197.61	0.3364

Tabla23. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 4, círculos 2,3,4

Prueba 5, Círculos 1,2,3

Dato	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Pendiente	1,07	1.07	0
AFI	47.001	47.01	0.01914
Cohesión	4363.05	4411.67	1.1143

Tabla24. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 5, círculos 1,2,3

Prueba 5, Círculos 2,3,4

Dato	Resultados Laboratorio	Resultados EFM	% Error
Pendiente	0.93	0.93	0
AFI	43.201	43.179	0.0509
Cohesión	6378.19	6438.7	0.9487

Tabla25. Resultados AFI, Cohesión, EFM Prueba 5, círculos 2,3,4

8.1.3. Ensayo de Indentación:

Cálculo del porcentaje de error para encontrar el gradiente:

Ensayo 1: Número de cortes utilizados: 18.

Grafica	Gradiente Software	Gradiente Laboratorio	%Error
1	32.27	34.82	7.323
2	33.18	34.51	3.853
3	31.95	34.18	6.524
4	34.15	34.46	0.899
5	33.72	34.46	2.141
6	32.50	34.63	6.150
7	34.54	34.46	0.232
8	34.28	34.58	0.867

Tabla26. Resultados gradiente, prueba de Indentación, ensayo 1

Ensayo 2: Número de cortes utilizados: 6

Grafica	Gradiente Software	Gradiente Laboratorio	%Error
1	63.02	64.99	3.031
2	64.72	64.99	0.415
3	64.13	64.99	1.323
4	63.72	64.99	1.954
5	62.79	64.99	3.385
6	65.35	64.99	0.553
7	63.76	64.99	1.892
8	61.10	64.99	5.985

Tabla27. Resultados gradiente, prueba de Indentación, ensayo 2

8.1.4. Ensayo de Compresibilidad:

El ensayo de compresibilidad fue desarrollado con base a un solo archivo .dat; por consiguiente la validación fue hecha con base a ese sólo ensayo.

Ciclo 1	Valor Software	Valor Laboratorio	% Error
Compresibilidad Ascenso	1.140E-07	1.141E-07	0.087
Compresibilidad Descenso	1.193E-07	1.108E-07	7.671

Tabla28. Resultados Compresibilidad, prueba de Compresibilidad, Ciclo 1

Ciclo 2	Valor Software	Valor Laboratorio	% Error
Compresibilidad Ascenso	1.120E-07	1.118E-07	0.178
Compresibilidad Descenso	1.153E-07	1.108E-07	4.061

Tabla29. Resultados Compresibilidad, prueba de Compresibilidad, Ciclo 2

Ciclo 3	Valor Software	Valor Laboratorio	% Error
Compresibilidad Ascenso	1.100E-07	1.079E-07	1.946
Compresibilidad Descenso	1.153E-07	1.081E-07	6.660

Tabla30. Resultados Compresibilidad, prueba de Compresibilidad, Ciclo 3

9. CONCLUSIONES

- Por medio de la administración de la base de datos, se aumenta la organización sobre toda la información de cada prueba y de quién la interpreta en el laboratorio; adicionalmente con la inclusión de los permisos y las restricciones, mantenemos un control específico sobre cada usuario y las pruebas que éste puede realizar, evitando futuros errores humanos con el software.
- El módulo administrativo para el ciclo de vida de la roca, mantiene organizada la información y además informado al Administrador del laboratorio, sobre el estado en que cada una de las rocas ingresadas al laboratorio se encuentra y la disponibilidad de éstas para algún nuevo proceso.
- El desarrollo de una herramienta software de escritorio, con un buen diseño implica una mejor navegación del usuario con la herramienta, el nuevo software de interpretación facilita al usuario el cálculo de los resultados de las diferentes pruebas para las que esté capacitado a realizar.
- El desarrollo de la herramienta software ha mostrado grandes ventajas con respecto al trabajo realizado actualmente en el laboratorio por medio de Excel, aumentando las posibilidades de interpretación para todas las pruebas seleccionadas, haciendo el proceso más eficaz y efectivo.
- El método de mínimos cuadrados mostró grandes ventajas al momento de seleccionar las diferentes pendientes en cada grafica de la prueba de Indentación; adicionalmente se ha encontrado un buen ajuste de cada pendiente con respecto a la otra.

- Wavelet aumenta las posibilidades a la hora de caracterizar las señales debido a que no se ve limitado su tratamiento exclusivamente en el dominio de la frecuencia, como lo hace la transformada de Fourier, sino que nos muestra un análisis detallado de la señal en tiempo.
- Una vez eliminado el ruido blanco en toda la señal y utilizando la transformada Wavelet se establecen patrones en los cambios de las frecuencias encontradas en la señal, facilitando la ubicación del tiempo inicial en cada una de las señales.
- El software desarrollado, evita al máximo la intervención del usuario, esto favorece el desarrollo de la interpretación debido a que no hay que trasladar ningún dato de un software a otro.
- La utilización de señales digitales en lugar de analógicas genera una pequeña pérdida de información pero facilita procesos como la caracterización de la señal o la reducción del ruido.
- Wavelet ha dado un buen ajuste del punto inicial de la señal (t_0) para el desarrollo de la prueba acústica; se calcularon los módulos elásticos y se validaron, en las pruebas dinámicas el porcentaje de error fue menor a 10% y con respecto a la validación por pruebas estáticas el resultado fue menor al 30%, valores esperados para este tipo de ensayo.

10. RECOMENDACIONES

- El ajuste realizado para las señales acústicas, fue realizado con un grupo de datos suministrado por el laboratorio, veintiséis pruebas (TETUAN), cada una con un poco más de ciento diez archivos de Excel fueron la base para crear el ajuste para las señales P y S. Para señales con características diferentes a éstas, el procedimiento puede no resultar muy exacto; se recomienda hacer un análisis a ensayos de diferentes campos para mejorar la precisión, en el intérprete de señales acústicas.
- Fue necesario aumentar la Máquina virtual de Java a 512 Mbytes debido a que era necesario mayor capacidad para el proceso de graficación de los diferentes ascensos encontrados en las pruebas de compresibilidad, por esto se recomienda instalar el software resultante en una máquina con un mínimo de Ram de 512 MBytes.
- Es recomendado no leer archivos con más de trescientos mil datos por fila, debido a que puede generar problemas en la máquina virtual de java.
- Siempre que se desee hacer una nueva interpretación en el intérprete de datos de Java, se recomienda limpiar los valores anteriores con el botón nuevo, o ejecutar nuevamente el programa, para evitar que los atributos de los objetos tengan valores incongruentes.
- Hacer un chequeo y mantenimiento semestral, del funcionamiento de la base de datos y el correcto funcionamiento de la herramienta.
- Hacer un Backup cada 15 días de los archivos almacenados en disco para evitar pérdida de información.
- Enviar inmediatamente la información de los archivos planos hacia el SILAB para almacenamiento de archivos en el disco.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1.] Matlab - Matematicas - Usando FFT en Matlab
<http://groups.google.com/group/matlab-users/web/usando-fft-en-matlab>.
- [2.] Procedimiento técnico de ensayo para pruebas de envolvente de falla múltiple en areniscas consolidadas, sin aplicar presión de poro, realizadas a temperatura ambiente. (Basado en la Norma ASTM D6026-06, ICP-PTE-151018).
- [3.] Michael Misiti, Yves Misiti, Georges Openhein y Jean Michael Poggi, Wavelet ToolBox ,1999.
- [4.] Tratamiento de señales con Wavelet
<http://coco.ccu.uniovi.es/immed/compresion/descripcion/spiht/wavelets/wavelets.htm>.
- [5.] Transformada Wavelet - DESCOMPOSICIÓN DE SEÑALES - Curso 2006
- [6.] Germán Figueroa (Trabajo de grado, año 2009) Titulado como: AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE ONDAS Y MEDICIÓN DE VELOCIDADES ACÚSTICAS DEL EQUIPO DT14210-ROP PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PROPIEDADES MECÁNICAS EN ROCAS.
- [7.] Ingeniería del software - Un enfoque práctico, Rogger S. Pressman, Quinta edición - Fase de Diseño, 2002.
- [8.] Cesar Ochoa y Laura Galvis (Trabajo de grado, año 2009) Titulado como: DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE UTILIZANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES PARA ESTIMAR PROPIEDADES DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ARENAS LIMPIAS PERTENECIENTES A UNA CUENCA COLOMBIANA.
- [10.] Weitzenfeld, A. "Ingeniería del Software Orientada a Objetos con UML, Java e Internet". Thomson, 2005.

[11.] SOMMERVILLE, IAN. Ingeniería del Software (séptima edición, Fase de diseño). Pearson Educación S.A –Madrid 2005.

[12.] Procedimiento técnico de ensayo para pruebas de envolvente de falla múltiple en areniscas consolidadas, sin aplicar presión de poro, realizadas a temperatura ambiente. (Basado en la Norma ASTM D6026-06, ICP-PTE-151018)

[13.] FJAER E., and RASMUS R. Petroleum Related Rock Mechanics, 1996.

[14.] CABRERA J. R., and DE GENNARO S. Aplicaciones Prácticas de la Geomecánica en la Industria Petrolera y Gasífera, ICP, Diciembre 2003.

[15.] Blog de petróleo, Caracterización de Yacimientos de Jesús Manucci.

[16.] Mark Zoback Reservoir Geomechanics: Earth Stress and Rock Mechanics Applied to Exploration, production and Wellbore Stability. 2006.

[17.] Manual de procedimientos técnicos – Laboratorio de Mecánica de Rocas

[18.] Proakis, John G. Tratamiento Digital de Señales, 2005.

[19.] Mitra, Sanjit K. Procesamiento Digital de Señales

[20.] Proakis, John G. y Manolakis, Dimitris G Señales y Sistemas Lineales.

[21.] Clavin Austin, Mónica Pamal, Advance Programming for Java tm2 plataforma.

[22.] Joyanes Aguilar, Luis Programación en Java 2: Algoritmos, estructuras de datos y programación orientada a objetos.