

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE POSTGRADO

**“DETERMINACIÓN DE LOS
PARÁMETROS MECÁNICOS
BÁSICOS EN LUTITAS, FORMACIÓN
CARAPITA, ORIENTE DE
VENEZUELA, MEDIANTE EL USO DEL
SISTEMA TSI (TERRATEK
STRENGHT INDEX)”**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Magister Scientiarum en Ingeniería Mecánica**

Realizado por:
Ing. Jackeline Rodríguez Tapias

TUTORES
Prof. Manuel Martínez PhD
Ing. Marisela Sánchez PhD

Caracas, Julio del 2003

APROBACION DE LOS TUTORES

En nuestro carácter de tutores del trabajo de grado de Maestría, presentado por la Ing. Jackeline Rodríguez Tapias para optar al título de Magister Scientiarum en Ingeniería Mecánica, consideramos que dicho trabajo cuenta con los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador designado.

Caracas, a los 10 días del mes de Julio del 2003.

Prof. Manuel Martínez PhD
Tutor Académico

Ing. Marisela Sánchez PhD.
Tutor Industrial

Este jurado aprueba el Trabajo de DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS MECÁNICOS BÁSICOS EN LUTITAS, FORMACIÓN CARAPITA, ORIENTE DE VENEZUELA, MEDIANTE EL USO DEL SISTEMA TSI (TERRATEK STRENGHT INDEX)", que la Ing. Jackeline Rodríguez Tapias presenta ante el Consejo de Facultad de Ingeniería, en cumplimiento con los requisitos señalados por el reglamento de la Facultad para optar el Título de Magister Scientiarum en Ingeniería Mecánica.

Caracas , 10 de Julio del 2003

JURADO:

Prof. Manuel Martínez PhD.

Tutor

Prof. Jorge Cruz M.Sc

Jurado

Prof. William Annicchiarico M.Sc

Jurado

Ing. Manuel Martínez PhD.

Coordinador de Postgrado de Ingeniería

A mi Esposo: Carlos .
A mis padres: Americo e Isabel.
A mi hermana: Jannette

AGRADECIMIENTOS

A DIOS por ser su voluntad la que me ha permitido alcanzar mis objetivos

A la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela y sus profesores por haberme hecho la profesional que soy hoy en día.

A Marisela Sánchez, quien hizo posible mi participación en este programa, le estaré por siempre agradecida.

A Manuel Martínez por permitirme emprender este trabajo de tesis y su valiosa asesoría.

A Marice, Pauly, Maurizio y Yenni quienes me ofrecieron en todo momento apoyo y estímulo para seguir adelante.

A Jorge Ramírez, Pedro Acuña y Hector González por la asesoría y asistencia técnica prestada.

Muy especialmente a mi esposo: Carlos, Gracias... por todo el apoyo y estímulo dado para culminar esta maestría.

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE POSTGRADO

“DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS MECÁNICOS BÁSICOS EN LUTITAS, FORMACIÓN CARAPITA, ORIENTE DE VENEZUELA, MEDIANTE EL USO DEL SISTEMA TSI (TERRATEK STRENGHT INDEX)”

Autor:

Jackeline Rodríguez T.

Tutores:

Prof. Manuel Martínez PhD

Ing. Marisela Sánchez PhD

RESUMEN

En la industria petrolera más del 75% de las rocas perforadas son lutitas, y un alto porcentaje de los problemas de perforación están asociados a este tipo de roca. En la actualidad existe un interés particular en resolver o minimizar los problemas de perforación asociados a formaciones que están constituidas por lutitas, especialmente los relacionados a la interacción de la lutita con el fluido de perforación y los asociados a esfuerzos y deformaciones (comportamiento mecánico) de las rocas. Para resolver estos problemas se necesita realizar estudios a escala de laboratorio que permitan definir los factores (físico-químicos, mecánicos y externos) que influyen en la inestabilidad de hoyo, siendo este el principal problema de perforación asociado a las lutitas.

El objetivo planteado en este trabajo es investigar la factibilidad de utilizar el sistema TSI (Terratek Strength Index) en la realización de ensayos del tipo Scratch como un método para determinar los valores de resistencia en muestras de lutitas pertenecientes a la formación Carapita.

Para alcanzar este objetivo, se diseñó y adaptó un recipiente contenedor de fluidos al banco de prueba del sistema TSI (Terratek Strength Index). Luego se determinó la mineralogía a las 5 muestras de lutitas utilizadas en este estudio. Por último se ensayaron 3 muestras de lutitas utilizando aceite mineral como fluido preservante y 2 muestras de lutitas utilizando un fluido base agua de tipo polimérico a diferentes períodos de exposición (24 y 48 hr).

De acuerdo a los resultados obtenidos se determinó que es factible utilizar el equipo TSI para realizar ensayos del tipo Scratch en muestras de lutitas, de manera rápida y sencilla, lo que acarrea menores costos. Por otro lado, con los resultados se determinó que los parámetros mecánicos estimados a partir de los ensayos con el sistema TSI, utilizando aceite mineral como fluido inhibitorio, resultaron ser muy parecidos (en un 16%) a los resultados obtenidos de los ensayos con el sistema MTS. De igual manera se observó que las muestras de lutitas sometidas a la presencia de un fluido de perforación base agua arrojaron valores de energía intrínseca muy cercanos a los valores de resistencia obtenidos en las muestras sometidas a la presencia de aceite mineral, mientras que el ángulo de fricción se mantuvo constante.

Descriptores: Carapita, Lutita, Recipiente contenedor de fluidos, Fluidos de perforación, Ángulo de fricción, Resistencia a la compresión, Energía intrínseca específica.

“DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS MECÁNICOS BÁSICOS EN LUTITAS, FORMACIÓN CARAPITA, ORIENTE DE VENEZUELA, MEDIANTE EL USO DEL SISTEMA TSI (TERRATEK STRENGHT INDEX)”

Jackeline Rodríguez Tapias.

CONTENIDO

CAPITULO I

EL PROBLEMA

	Pág
1.1 Introducción	1
1.2 Formulación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4 Justificación.....	4
1.5 Limitaciones.....	6

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

	Pág
2.1 Antecedentes.....	7
2.2 Bases teóricas.....	8
2.2.1. Fluidos de Perforación	8
2.2.2. Tipos de fluidos de perforación	9
2.2.3. Lutitas	9

2.2.4. Clasificación de las lutitas	10
2.2.5. Arcillas	13
2.2.6. Grupos de minerales de arcilla	15
2.2.7. Análisis de secciones finas	19
2.2.8. Propiedades mecánicas de la roca.....	19
2.2.9. Resistencia máxima de compresion.....	20
2.2.10. Fricción	20
2.2.11. Criterio de falla Mohr-Coulomb.....	21
2.2.12. Ensayos de laboratorio	23
2.2.13. Ensayos de Compresión	23
2.2.14. Ensayos índices	24
2.2.15. Ensayos del tipo Scratch o de rayado	24
2.2.16. Estabilidad de hoyo.....	24
2.2.17. Sistema TSI "Terratek Strenght Index"	25
2.2.18. Sistema MTS "Rock Testing System"	25

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

.....	Pág
3.1. Tipo de investigación.....	26
3.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	26
3.3. Método de investigación.....	27
3.3.1. Procedimiento seguido	27

CAPITULO IV
SISTEMA TSI

	Pág
4.1 Descripción del sistema	29
4.1.1. Estructura del equipo	29
4.1.2. Mecanismo de movimiento	31
4.1.3. Elemento de corte	32
4.1.4. Traductor de fuerzas	32
4.1.5. Adquisición de datos	33
4.2 Principio del ensayo.....	33
4.3 Corte dúctil y frágil.....	34
4.3.1. Transición entre modo de falla dúctil y frágil.....	35
4.4 Distribución de las fuerzas	36
4.4.1. Fuerzas de corte (cuchilla afilada y no afilada)	37

CAPITULO V

**DISEÑO Y ADAPTACIÓN DE UN RECIPIENTE AL EQUIPO TSI PARA
REALIZAR ENSAYOS DE LUTITAS**

	Pág
5.1. Consideraciones del diseño	39
5.1.1 Selección del material	42
5.2. Cálculos para el diseño del soporte.....	44
5.3. Recipiente fabricado	50

CAPITULO VI
CARACTERIZACIÓN ROCA-FLUIDO

	Pág
6.1 Roca (Lutita).....	53
6.1.1. Composición mineralogía	53
6.2 Fluido (Base agua)	55
6.2.1. Características de rendimiento del sistema AQUA DRILL	55
6.2.2. Composición de sistema AQUA DRILL	56
6.2.3. Comportamiento reológico del lodo	58

CAPITULO VII
PROCEDIMIENTOS Y RESULTADOS

7.1 Procedimientos previos a la ejecución de los ensayos	59
7.1.1. Planificación de la sequencia de ensayos	60
7.1.2. Preparación de las muestras	61
7.1.3. Ejecución de los ensayos	62
7.2 Procedimientos para la determinación de los parámetros mecánicos.....	64
7.2.1. Determinación de la energía intrínseca específica.....	65
7.2.2. Determinación del coeficiente de fricción	66
7.2.3. Determinación del ángulo de fricción	66
7.3 Resultados de los parámetros mecánicos	68
7.3.1. Resultados aceite mineral.	70
7.3.2. Resultados fluidos de perforación (base agua)	73

CAPITULO VIII
ANÁLISIS DE RESULTADOS

	Pág
8.1. Ensayos del tipo Scratch	77
8.2. Correlación de resultados	80
Conclusiones	82
Recomendaciones.....	84
Referencias	85
Glosario	89
Anexos	
Anexo A: Características de las cuchillas	92
Anexo B: Recipiente diseñado (piezas).....	95
Anexo C: Análisis de sensibilidad	103
Anexo D: Muestras de lutitas.....	108
Anexo E: Procedimiento técnico para ejecución de ensayos con el equipo TSI	114
Anexo F: Gráficas de resultados	118

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Capa octaédrica	14
Figura 2.2 Capa tetraédrica	14
Figura 2.3 Estructura de la Caolinita	16
Figura 2.4 Estructura la Mica (Ilita)	16
Figura 2.5 Estructura de la Montmorolita-Esmectita	18
Figura 2.6 Estructura de la Clorita	18
Figura 2.7 Envoltente de falla Mohr-Coulomb	22
Figura 4.1 Sistema TSI (Terratek Strenght Index)	30
Figura 4.2 Estructura original del equipo TSI	31
Figura 4.3 Cuchilla afilada	32
Figura 4.4 Cuchilla no afilada	32
Figura 4.5 Diferenciación entre los tipos de corte dúctil y frágil	34
Figura 4.6 Transición entre los tipos de corte	35
Figura 4.7 Distribución de las fuerzas	37
Figura 5.1 Recipiente diseñado	41
Figura 5.2 Esquema dela pieza A (soporte de muestras)	45
Figura 5.3 Distribución de las Fuerzas. Caso A	46
Figura 5.4 Distribución de las Fuerzas. Caso B	48
Figura 5.5 Excentricidad de la fuerza normal (X en mm)	51
Figura 5.6 Recipiente de plexiglas fabricado	51
Figura 5.7 Recipiente adaptado al equipo TSI	52
Figura 6.1 Caracterización mineralógica de la fracción roca total y de la fracción menor a 2 micras	54
Figura 6.2 Valores promedios de la caracterización mineralógica de la fracción roca total	55
Figura 6.3 Valores promedios de la caracterización mineralógica de la fracción menor a 2 micras	55
Figura 6.4 Comportamiento reológico del lodo	58
Figura 7.1 Metodología de realización de ensayos tipo scratch	60

Figura 7.2	Diagrama E-S	67
Figura 7.3	Muestra de lutita sumergida en aceite mineral	69
Figura 7.4	Muestra de lutita sumergida en lodo base agua	69
Figura 7.5	Variación de las fuerzas verticales con la profundidad de corte	71
Figura 7.6	Variación de las fuerzas horizontales con la profundidad de corte	71
Figura 7.7	Diagrama E-S obtenido de los ensayos con cuchilla afilada	72
Figura 7.8	Diagrama E-S obtenido de los ensayos con cuchilla no afilada	73
Figura 7.9	Variación de las fuerzas verticales con la profundidad de corte	74
Figura 7.10	Variación de las fuerzas horizontales con la profundidad de corte	75
Figura 7.11	Diagrama E-S obtenido de los ensayos con cuchilla afilada	75
Figura 7.12	Diagrama E-S obtenido de los ensayos con cuchilla no afilada	76
Figura 8.1	Fractura generada durante el corte, a una profundidad de 0,3mm (Muestra A)	79
Figura 8.2	Diagrama Fuerza vs Longitud donde muestra las variaciones de las fuerzas durante el corte de una profundidad de 0,33mm (Muestra A)	79

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 2.1	Estructura y propiedades de los minerales de arcilla	15
Tabla 5.1	Propiedades mecánicas de algunos materiales	43
Tabla 5.2	Tabla de solubilidad de algunos polímeros	43
Tabla 6.1	Caracterización mineralógica de la fracción roca total y de la fracción menor de 2 micras	53
Tabla 6.2	Formulación lodo Baker Hughes	57
Tabla 6.3	Propiedades típicas del lodo Aqua-Drill	58
Tabla 7.1	Características a considerar para la planificación de un ensayo	61
Tabla 7.2	Características a considerar para la planificación de un ensayo	63
Tabla 7.3	Profundidades de corte y fuerzas promedios obtenidas con la cuchilla afilada	70
Tabla 7.4	Profundidades de corte y fuerzas promedios obtenidas con la cuchilla no afilada	72
Tabla 7.5	Profundidades de corte y fuerzas promedios obtenidas con la cuchilla afilada	74
Tabla 7.6	Profundidades de corte y fuerzas promedios obtenidas con la cuchilla no afilada	76
Tabla 8.1	Resultados de los parámetros mecánicos	77
Tabla 8.2	Resultados de TSI con la cuchilla afilada	80
Tabla 8.3a	Resultados de TSI con la cuchilla no afilada	81
Tabla 8.3b	Resultados de ensayos de compresión triaxial	81

NOMENCLATURA

$|\tau|$ = máxima resistencia al corte

C = esfuerzo normal

F^c = fuerza de corte

F_v^c = fuerza de corte vertical

F_h^c = fuerza de corte horizontal

F^f = fuerza de fricción

F_v^f = fuerza de fricción vertical

F_h^f = fuerza de fricción horizontal

F_A = fuerza normal en el punto A

F_B = fuerza normal en el punto B

F_{hA} = fuerza horizontal en el punto A

F_{hB} = fuerza horizontal en el punto B

F_{fA} = fuerza de fricción en el punto A

F_{fB} = fuerza de fricción en el punto B

F_{vC} = fuerza normal aplicada en el punto C

μ = coeficiente de fricción

r = radio de la muestra

X = excentricidad

α = ángulo de inclinación del soporte

w = ancho de la cuchilla

d = es la profundidad de corte

d_* = profundidad crítica

\mathcal{E} = energía intrínseca específica

ζ = coeficiente de inclinación de la fuerza actuando en la cara de la cuchilla

θ = ángulo de incidencia

α = ángulo de inclinación de la fuerza de corte

E = energía específica

S_v = pendiente de la recta obtenido de las componentes verticales de la fuerza de corte

S_h = pendiente de la recta obtenido de las componentes horizontales de la fuerza de corte

1.1. Introducción

En la industria petrolera más del 75% de las rocas perforadas son lutitas, y un alto porcentaje de los problemas de perforación están asociados a este tipo de roca. El principal problema de perforación asociado a lutitas es la inestabilidad de hoyo, que puede ser producto de tres factores: físico-químicos, mecánicos y externos. Los factores físico-químicos están relacionados a la interacción de la lutita con el fluido de perforación, los factores mecánicos están asociados a esfuerzos y deformaciones de las rocas y los externos son los factores operacionales que pueden ser controlados durante la perforación.

Para entender mejor los factores físicos-químicos es importante determinar los mecanismos de transporte de fluidos (advección, ósmosis, difusión química, capilaridad), alteración química de la lutita, hinchamiento/hidratación de los minerales y cambios de temperatura.

Para tener un conocimiento adecuado de los factores mecánicos se debe considerar la orientación y magnitud de los esfuerzos in situ, las propiedades mecánicas de la roca, los planos de estratificación, y las fracturas preexistentes en las rocas (Sánchez, 1999).

Entre los factores externos se incluyen las malas prácticas de perforación; entre ellas vibraciones de la sarta por selección inadecuada, fluctuaciones excesivas de presión en el anular: “suaveo” y “surgencia” (Tan, 1998; Durand, 1995; Gazaniol, 1995)

Un aspecto importante asociado a la inestabilidad de hoyo es la inadecuada o incompleta caracterización a escala de laboratorio de las formaciones lutíticas, lo que conlleva a una inapropiada estrategia de perforación, afectando incluso, la adopción o masificación de nuevas tecnologías como pozos horizontales, pozos de alto ángulo, pozos extendidos, uso de mechas de diamante policristalino, entre otros (Nawrocki, 1998, Sánchez, 1999).

En la actualidad existe un interés particular en resolver o minimizar los problemas de perforación asociados a formaciones que están constituidas por lutitas, especialmente los relacionados a la interacción de la lutita con el fluido de perforación y a los relacionados al comportamiento mecánico de las rocas. Para resolver estos problemas es necesario caracterizar muestras de lutitas a escala de laboratorio.

Este trabajo esta centrado en el desarrollo de una metodología que permita determinar dos (2) parámetros mecánicos en muestras de lutitas pertenecientes a la formación Carapita, mediante el uso del sistema TSI (Terratek Strength Index).

El sistema TSI es una solución para disminuir los elevados costos asociados a la caracterización geomecánica de núcleos de lutitas, ya que requiere poco tiempo para la ejecución y análisis de los ensayos, y lo más importante, se puede utilizar de nuevo las muestras para otros ensayos y determinar así otras propiedades (geoquímicas, petrofísicas, térmicas, acústicas y geomecánicas).

1.2. Formulación del Problema

La caracterización geomecánica de lutitas consiste en determinar información sobre la rigidez y resistencia de la roca para desarrollar modelos constitutivos realistas que permitan hacer diagnósticos apropiados sobre el desempeño de la roca bajo las

condiciones de esfuerzo que se desarrollan alrededor del hoyo. La caracterización geomecánica en lutitas es un proceso complejo que requiere de ensayos sobre el tapón de núcleo ó muestras, para obtener propiedades que permitan ajustarlo un modelo de comportamiento y de falla. Estos ensayos son costosos y consumen tiempo además requieren de equipos y procedimientos sofisticados así como personal altamente capacitados para la ejecución. Para la caracterización de lutitas se recomienda emplear principalmente núcleos preservados y no perturbados, con el fin de obtener resultados que se acerquen lo más posible al comportamiento real de las lutitas durante la perforación

Un método alternativo para determinar los valores de resistencia es el cálculo de índices de resistencia a través de pruebas sencillas. Para ello es posible utilizar el sistema TSI (Terratek Strength Index) que permite estimar los valores de una forma económica en comparación con los ensayos de compresión triaxial (estándares) de laboratorio.

En la literatura existen pocos estudios (Adachi,1998; Thomas,1998; Fjaer,1992; Almenara,1992; Suárez,2002) que han utilizado el equipo TSI como una herramienta para determinar los valores de resistencia en muestras de rocas consolidadas (en su mayoría arenisca y en menor grado lutitas).

Contando con muestras de lutitas provenientes del oriente de Venezuela, específicamente de la formación Carapita, se quiere desarrollar una metodología para la realización de ensayos del tipo *scratch* ó de *rayado* en estos tipos de rocas, a fin determinar valores de resistencia confiables, y económicos comparados con los ensayos de compresión triaxial estándares.

Por otro lado se quiere analizar la influencia de lodos de perforación en los valores de resistencia a fin de establecer criterios de comparación con trabajos previos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Investigar la factibilidad de utilizar medidas del tipo scratch como un método para determinar los valores de resistencia en muestras de lutitas, pertenecientes a la formación Carapita.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar, evaluar y ejecutar una metodología para la realización de ensayos del tipo scratch en muestras de lutitas.
- Adaptar el equipo TSI a la ejecución de ensayos del tipo scratch en muestras de lutitas, para lo cual es necesario sumergir las muestras en fluidos apropiados a fin de evitar perturbaciones, y analizar la influencia de diferentes fluidos en el comportamiento mecánico de este tipo de roca,
- Colocar las muestras de lutitas en contacto directo con el fluido seleccionado durante cierto tiempo en una celda o cámara de vacío, a fin de efectuar de manera más eficiente la máxima penetración del lodo en la lutita.
- Ejecutar e interpretar los resultados obtenidos.
- Correlacionar los resultados con datos disponibles de estudios anteriores.

1.4. Justificación

Las medidas estándares de laboratorio (ensayos de compresión triaxial), permiten conocer los valores de resistencia límites que puede soportar el material una vez

sometidos a esfuerzos. Sin embargo, dentro de una de las etapas previas a la realización del ensayo, como es el corte y la preparación de las muestras, el tiempo y costo asociado son muy elevados.

Los ensayos del tipo scratch son una solución para disminuir los elevados costos, ya que estos ensayos requieren de un equipo de fabricación sencilla, poco tiempo para la ejecución y análisis de los ensayos así como la reutilización del material de roca, lo cuales no son posibles de cumplir cuando se realizan ensayos de compresión triaxial (estándares de laboratorio) en muestras de lutitas.

Adicionalmente, el análisis de la influencia del lodo de perforación en los parámetros mecánicos de rocas lutíticas es necesario debido a la poca caracterización que existe a nivel nacional e internacional de este tipo de rocas y su comportamiento mecánico ante el factor tiempo y físico-químico.

Actualmente para resolver el problema de estabilidad de hoyo en lutitas se utiliza fluidos base aceite (fluidos inhibitorios), con los cuales se elimina el problema del flujo de agua e iones hacia el interior de las lutitas. Sin embargo, existen consideraciones ambientales que restringen el uso y aplicación de estos fluidos y en muchos casos se han utilizado fluidos base agua y salmueras para perforar las secciones lutíticas con relativo éxito. En tal sentido para la evaluación físico-química de la lutita se utilizará un fluido base agua a fin de evaluar cualquier cambio que pueda ocurrir en los valores de resistencia de la roca.

Por último, mediante la ejecución de este proyecto se enfrenta un problema fundamental en el área de comportamiento mecánico de las rocas más comunes a ser perforadas (lutitas), las cuales son la mayor fuente de problemas durante la perforación.

1.5. Limitaciones

El contexto del presente proyecto se enmarcará para 5 muestras de lutitas extraídas de la formación Carapita, campo Bosque-Piritál, ubicado al norte del Estado Monagas.

El fluido de perforación a utilizar será base agua tipo polimérico, con componentes que estén disponibles en el laboratorio de fluido de la empresa.

2.1. Antecedentes

En un proyecto de exploración y producción la selección del lodo juega un rol muy importante tanto técnicamente como económicamente.

Los problemas derivados de una selección inadecuada del peso o la composición del fluido de perforación son varios: inestabilidad de las paredes del hoyo (apertura o colapso del hoyo), pega de tubería, incremento del torque y arrastre, excesiva pérdida de tiempo en repasos, daño a la formación con reducción del desempeño del yacimiento y en el caso más crítico pérdida parcial o total del hoyo.

Con todos estos problemas la industria petrolera ha invertido esfuerzos y dinero en entender que fenómenos ocurren durante la perforación de un pozo. De esta forma se ha identificado una variedad de fenómenos que van desde la composición del material rocoso, el tiempo de exposición del material con el fluido, el régimen natural de esfuerzo y presión, el comportamiento mecánico de la roca y el mecanismo térmico.

Un revisión exhaustiva de la literatura muestra que en las secciones donde el material rocoso esta conformado por lutitas se han identificado el mayor porcentaje de problemas de perforación y que estos a su vez están asociados a la composición del fluido y su influencia sobre el material lutítico.

Utilizando como referencia la interacción que pueda ejercer el fluido de perforación y el comportamiento mecánico de las secciones lutíticas, recientemente se han realizado estudios que contemplan el efecto del debilitamiento que ejercen los fluidos sobre la resistencia de la lutita (Abass,1998; Da Fontura, et al,1999;

Rengifo,1999; Bermúdez, 2001; Suárez, 2002). Sin embargo solo uno de ellos ha utilizado el método alternativo que consiste en la medición de índices de resistencia a través de pruebas del tipo scratch o de rayado.

2.2. Bases teóricas

A continuación se presentan una variedad de conceptos fundamentales que se deben tener en cuenta para el desarrollo de este trabajo.

2.2.1. Fluidos de perforación

Los fluidos de perforación también conocidos comúnmente con el nombre de lodos de perforación, son aquellos encargados de garantizar la perforación rápida y segura de un pozo en cuanto a tiempo y sobre todo en cuanto a estabilidad de la formación, ya que poseen múltiples compuestos en su constitución destinados a realizar diversas funciones durante el proceso (Zamora, 1998). Dentro de la funciones que deben cumplir se encuentran:

- *Transporte de los recortes de perforación generados por la mecha y los derrumbes de las paredes del hoyo hasta la superficie.*
- *Control de las presiones en las secciones atravesadas*
- *Soporte, preservación y protección del hoyo cuando este esta desnudos (a la espera de la bajada y cementación del revestidor)*
- *Enfriamiento y lubricación del la mecha y la sarta de perforación*
- *Mantener en suspensión los ripios en el espacio anular, cuando se detiene la circulación*

2.2.2. Tipos de fluidos de perforación:

Tradicionalmente los lodos se clasifican, de acuerdo al fluido base o componente primario usado en su preparación, dentro de tres categorías: aire, agua y aceite (Ryen,1996).

Según (Zamora, 1998) en la actualidad se conocen cuatro tipos de fluidos de perforación.

- Base agua: varían en un rango que va desde el agua fresca hasta aquellos con alta concentración química. La fase líquida puede ser agua fresca, agua salada, agua de mar, etc
- Base aceite: en algunos casos se utiliza petróleo como fase continua, sin embargo éste ha sido reemplazado por diesel, y más recientemente han sido reemplazos por minerales de aceite de baja toxicidad.
- Neumático: la fase continua puede ser gas natural o aire, diseñados para ser usados en zonas de bajas presiones y pueden ser del tipo; gas o aire, neblina, espuma y fluido aireado
- Sintéticos: constituidos principalmente por fluido sintético del tipo esteres, eteres, polialfaoleofinas, y acetatos. Pero una segunda generación caracterizados por bajos costos y baja viscosidad cinemática están constituidos por oleofinas isomerizadas, alfaoleofinas lineales y alkilbencenos lineales.

2.2.3. Lutitas

Las lutitas son rocas sedimentarias de grano fino formadas por la consolidación de arcilla, limo o lodo, y se caracterizan por poseer una estructura laminar. Las lutitas están constituidas principalmente por minerales de arcilla, en una proporción que puede variar entre 15% y 100% de minerales accesorios como: el cuarzo, los

carbonatos y los feldespatos. De esto se deduce que las lutitas cumplen un amplio rango de composiciones y pueden tener propiedades mecánicas, petrofísicas y físico-químicas muy diferentes, dependiendo de dicha composición (Sánchez, 1999).

Las lutitas se caracterizan por poseer una baja permeabilidad y una alta sensibilidad al agua. Los pequeños radios de poro y la retención de agua por parte de las arcillas explican por qué las lutitas se consideran frecuentemente impermeables. La permeabilidad de las lutitas se encuentra por lo general en el orden de los nanodarcies (10^{-9} D). El tamaño promedio de poro de las lutitas oscila entre 1 y 10 nm. Como consecuencia, los mecanismos de transporte, tanto hacia adentro como hacia fuera de la formación, son muy lentos. La porosidad total de las lutitas disminuye con la compactación (profundidad), al igual que sucede con otras rocas.

2.2.4. Clasificación de las lutitas:

Las lutitas se pueden clasificar de distintas maneras: a) según su comportamiento durante la perforación (Walker, 1998), b) según el grado de compactación (O' Brien y Chenevert, 1973), y por último c) según su textura (Mondshine, 1966).

a) Según su comportamiento durante la perforación las lutitas se clasifican en cuatro grandes grupos:

- *Lutitas dispersables*: son arcillas que se hidratan y se dispersan en presencia de fluidos de perforación base agua, incrementando el peso y modificando las propiedades reológicas del fluido y creando cavernas (washout) en el pozo.

- *Lutitas hinchables*: son arcillas hidratadas y débilmente consolidadas. Durante la perforación estas lutitas disminuyen el diámetro del hoyo (colapso) y se adhieren a la mecha y/o sarta, lo cual puede conducir al atascamiento de la sarta. Adicionalmente, los recortes de estas lutitas se mezclan en el lodo, aumentando su viscosidad y creando toda clase de fenómenos de pega.
- *Lutitas dispersibles*: son lutitas moderadamente hidratables, que presentan un comportamiento dúctil. Durante la perforación los fragmentos se desprenden fácilmente del hoyo, pero no se hinchan ni se dispersan, permaneciendo intactos hasta llegar a la superficie. En ciertas secciones se pueden acumular produciendo altos torques y arrastres.
- *Lutitas frágiles*: durante la perforación el comportamiento de estas lutitas es tal que se produce desmoronamiento progresivo de las paredes del pozo. Sin embargo, estos desmoronamientos se presentan con ciertos retrasos que a largo plazo pueden originar grandes cavernas (washout) en el pozo.

b) Según el grado de compactación las lutitas se clasifican en cinco tipos:

- *Lutitas reactivas*: por lo general se encuentran a bajas profundidades (1500 m ó 4500 pie) por ello su falta de compactación y alto contenido de agua. Estas lutitas se caracterizan por poseer porosidades de 60%, densidades moderadas y son altamente reactivas al agua. Estas constituidas en su mayoría por esmectita (entre 20 y 40%) y agua.
- *Formaciones sub-compactadas*: son por lo general de origen reciente, pero pueden encontrarse en algunas ocasiones a profundidades de 8000

m (26000pie). Son de comportamiento plástico y se caracterizan por poseer altos contenidos de agua.

- *Formaciones compactadas*: bajo la acción combinada de la temperatura y la presión, el espacio interlaminar de las esmectitas tiende a disminuir y a formar enlaces más fuertes. Los cationes que poseen cierta movilidad relativa, como el sodio, son removidos de la estructura por otros cationes, como el calcio y el potasio. Asociado a este intercambio iónico, se produce una disminución de la porosidad, el contenido de agua, el área superficial y la reactividad, así como un aumento de la densidad. Aunque son menos reactivas, estas formaciones producen problemas que dependen del tiempo.
- *Formaciones sobre-compactadas*: debido a los movimientos tectónicos o a la erosión de los sedimentos superiores, estas formaciones ascendieron a la superficie, como consecuencia su contenido de agua es muy bajo a lo esperado a esas condiciones de esfuerzos, lo que favorecerá una rápida hidratación.
- *Formaciones sobre-presurizadas o topes de yacimientos*: estas lutitas se caracterizan por contener compuestos orgánicos (petróleo o gas) y agua de poro.

c) Según el grado de textura las lutitas se clasifican en cinco grupos diferentes:

- *Lutitas suaves*: constituidas por montmorillonita e illita, con porcentajes de agua en el rango de 25 -70 % y una densidad entre 1,2-1,5 g/cm³.

- *Lutitas firmes*: constituidas por illita, capas mixtas y montmorillonita, con porcentajes de agua entre 15-25% y densidades entre 1,5 y 2,2 g/cm³
- *Lutitas firme-dura*: tienen el mismo contenido de arcilla que las lutitas firmes, con la diferencia del porcentaje de agua (2-5%) y de densidad (2,3-2,7 g/cm³)
- *Lutitas duras*: presentan alta cantidades de illita con trazos de montmorillonita. EL porcentaje de agua oscila entre 3-10% con densidades entre 2,2 y 2,5 g/cm³
- *Lutitas frágiles*: están constituidas por illita, caolinita y clorita, con porcentajes de agua entre 2 y 5% y densidades entre 2,5 y 2,7 g/cm³)

2.2.5. Arcillas

Desde el punto de vista granulométricos las arcillas se definen como sólidos coloidales, cuyo tamaño es menor a 2µm. Sin embargo, esta definición se contradice al definir las desde el punto de vista mineralógico, ya que los minerales de arcilla pueden poseer partículas mayores a 2µm. Los minerales de arcilla forman parte del grupo de los filosilicatos, que se caracterizan por poseer láminas alternadas de tetraedros y octaedros (Sánchez, 1999).

Los minerales de arcilla son de naturaleza cristalina, y la estructura atómica de sus cristales es el principal factor que determina sus propiedades. La mayoría de las arcillas tienen una estructura tipo mica, esto es, placas delgadas de cristales apiladas cara a cara. Una placa sencilla es llamada estructura unitaria, y está compuesta de átomos en un empaquetamiento cerrado de configuración octaédrica o tetraédrica (Rengifo, 1999).

En la configuración octaédrica (Ver Figura 2.1), los iones oxígeno o hidróxilo forman dos planos coordinados con iones aluminio, hierro o magnesio localizados en el centro del octaedro.



Figura 2.1. Capa octaédrica.

En la configuración tetraédrica (Ver Figura 2.2), un átomo de silicio se ubica equidistante de los cuatro átomos de oxígeno o hidróxilo para balancear eléctricamente la estructura. Los oxígenos o hidróxilos se encuentran en los vértices del tetraedro.

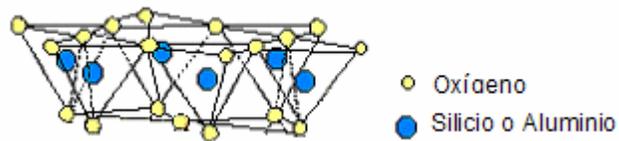


Figura 2.2. Capa tetraédrica.

Las diferentes combinaciones y modificaciones pueden conformar 26 distintos minerales de arcilla. Los minerales de arcilla se pueden construir a partir de diferentes relaciones de capas tetraédricas a capas octaédricas. El grupo más amplio es el mineral del tipo 2:1 (2 capas tetraédricas/1 capa octaédrica); también existen minerales de tipo 2:1:1 y 1:1. En la Tabla 2.1 se muestra las propiedades y las estructuras de algunos tipos de arcillas.

Tabla 2.1. Estructura y propiedades de los minerales de arcillas.

Propiedad	Caolinita	Mica	Montmorilonita	Atapulgita	Clorita
Tipo de capa	1:1	2:1	2:1	2:1	2:1:1

Estructura del cristal	Lámina	Lámina	Lámina	Lámina	Lámina
Forma de partícula	Láminas hexagonales	Láminas extensas	Hojuelas	Agujas	Láminas
Tamaño de partícula, μm	5 - 0,5	Láminas largas hta. 0,5	2 - 0,1	1 - 0,1	5 - 0,1
Área Superf. BET-N ₂ -m ² /g BET-H ₂ O-m ² /g	15 - 25 -----	50 - 110 -----	30 - 80 200 - 800	200 -----	140 -----
CEC, meq/100g	3 - 15	10 - 40	80 - 150	15 - 25	10 - 40
Visc. en agua	Baja	Baja	Alta	Alta	Baja
Efecto de Sales	Flocula	Flocula	Flocula	Ligera	Flocula

2.2.6. Grupo de minerales de arcilla

Los grupos de minerales de arcilla que a continuación se presentan son los más comunes y de mayor interés en la tecnología de fluidos de perforación.

Caolinita

La caolinita está compuesta por una capa tetraédrica sencilla y una capa de alúmina dioctaédrica sencilla. La capa tetraédrica está unida a la capa octaédrica de modo tal que los hidróxilos en la cara del octaedro se ubican junto a los oxígenos en la cara del tetraedro. (Ver Figura 2.3)

Las cargas dentro de la estructura están balanceadas, y existen muy pocas sustituciones superficiales. Existen hidrógenos fuertemente unidos entre las capas sucesivas de la unidad básica, lo cual previene la expansión superficial.

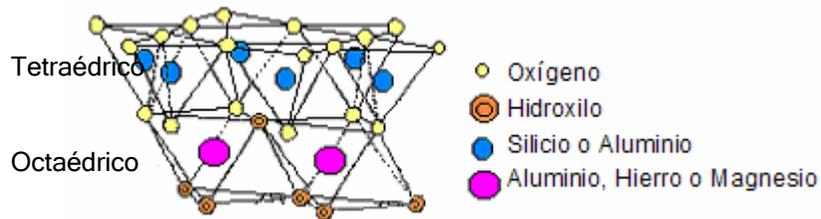


Figura. 2.3. Estructura de la caolinita.

Esta arcilla se encuentra ampliamente en lutitas y depósitos marinos. Existe una tendencia a la transformación de la caolinita a illita y clorita a grandes profundidades.

Illita

La illita pertenece a la clase de minerales llamados micas. La mica es un mineral del tipo 2:1, en el cual dos capas tetraédricas empaquetan una capa octaédrica, tal como muestra la Figura 2.4; la cual ilustra la estructura de la illita.

Las dos características más importantes de las micas son: a) que la sustitución isomorfa ocurre principalmente en la capa tetraédrica, donde el silicio es reemplazado por aluminio o hierro, y b) que la deficiencia de carga entonces producida se balancea por iones potasio.

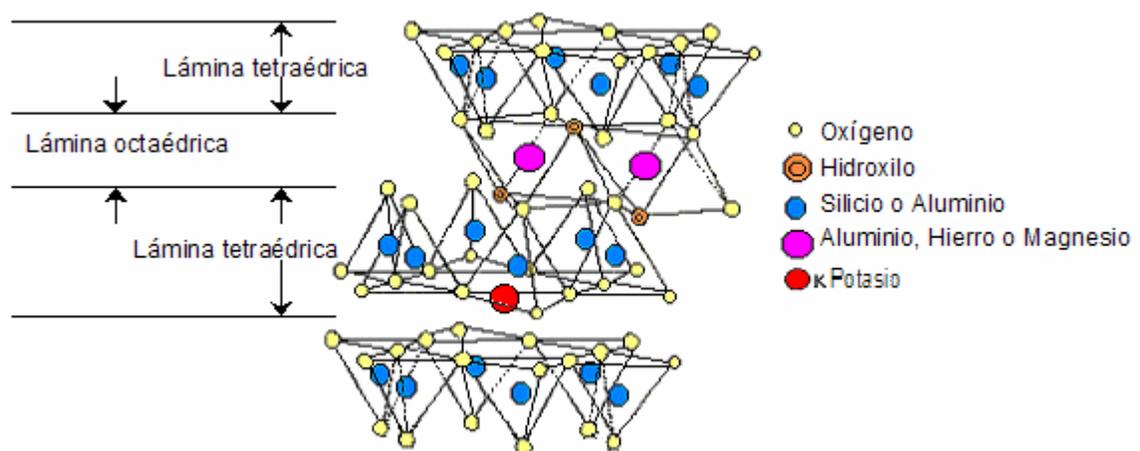


Figura 2.4. Estructura de la mica (Illita).

Montmorilonita

La montmorilonita es el principal mineral de arcilla en la bentonita. Es el mineral más conocido dentro del grupo de minerales llamados esmectitas. La Figura 2.5 muestra un diagrama de su estructura.

La expansión de la esmectita, al entrar en contacto con el agua, se debe a las sustituciones iónicas que ocurren principalmente en la capa octaédrica. La carga se encuentra en el centro de la capa; los cationes que están asociados con el mineral para balancear la carga iónica (cationes intercambiables) son incapaces de acercarse lo suficientemente al sitio de carga negativa como para neutralizar completamente el carácter iónico del catión o la superficie del mineral. Este carácter iónico residual provee la fuerza atractiva para la adsorción de moléculas polares, tales como el agua, entre las láminas unitarias.

La montmorilonita expansible puede existir en cantidades apreciables en las lutitas como resultado de la caída de ceniza volcánica en un ambiente marino.

Clorita

La estructura de la clorita consiste en láminas alternadas del tipo brucita/mica, en las cuales las deficiencias de carga en la superficie de la mica son balanceadas por una capa de brucita. (Ver Figura 2.6)

La clorita tiende a ser asociada con sedimentos más antiguos, por lo que la caolinita y esmectita tienden a ser reemplazadas por cloritas e ilitas.

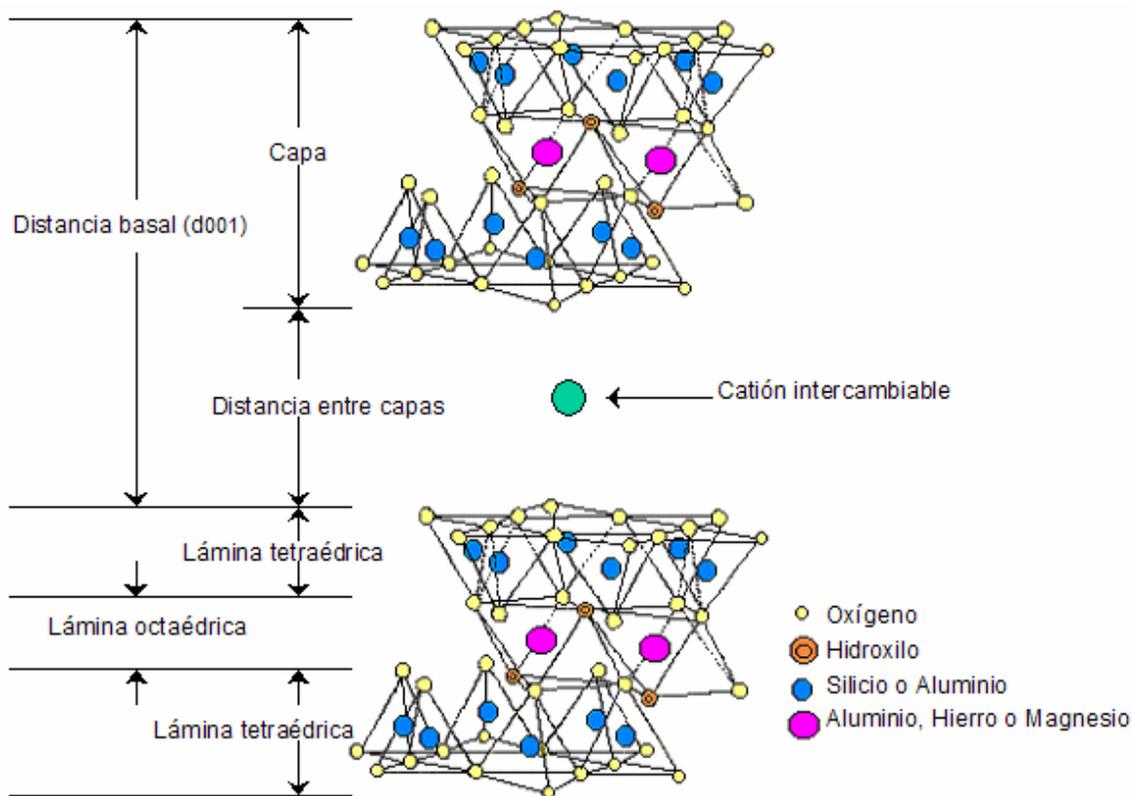


Figura 2.5. Estructura de la montmorilonita-esmectita. (Sánchez, 1999).

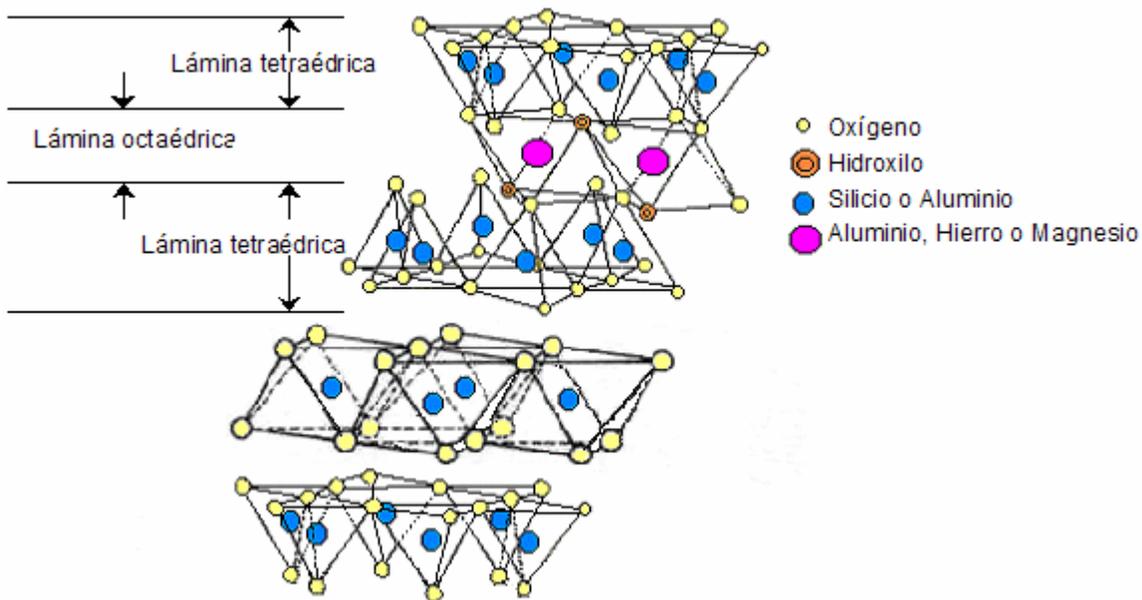


Figura 2.6. Estructura de la clorita.

2.2.7. Análisis de secciones finas

El análisis de secciones delgadas o finas de muestras de lutitas por microscopía óptica permite apreciar la naturaleza de la microestructura de la roca. Mediante un análisis detallado de las fotografías se puede identificar los tipos de minerales y de arcillas presentes en la lutita; igualmente se puede identificarse la presencia de fósiles de microorganismos marinos. También se puede estimar semicuantitativamente el porcentaje de los minerales que conforman la lutita. Por último es posible visualizar los posibles mecanismos responsables de los cambios en la resistencia mecánica de la lutita.

2.2.8. Propiedades mecánicas de la roca

Las propiedades mecánicas son requeridas para la fijación de estrategias de perforación, completación y producción, además de ser imprescindibles para los estudios de estabilidad de hoyo y perforaciones cañoneadas, diseño de fracturamiento hidráulico, etc.

El conocimiento de las propiedades mecánicas de la roca de una formación, constituye el primer paso en un análisis geomecánico. Aunque se pueden hacer algunas pruebas de campo para determinar ciertos parámetros geomecánicos, la mayoría de los resultados requieren de la utilización de núcleos y ensayos especializados de laboratorio.

Los parámetros mecánicos provenientes de formaciones geológicas pueden ser divididos en tres grupos:

Parámetros Elásticos: para un medio poroso, la teoría de elasticidad les permite establecer relaciones lineales entre la aplicación de esfuerzos y las deformaciones resultantes.

Parámetros Poroelásticos: juegan un rol importante en el acoplamiento entre el fluido y el medio sólido. Los parámetros poroelásticos son: coeficiente de Biot (α), compresibilidad total (roca+ poro), y compresibilidad del poro.

Parámetros de Resistencia: son dependientes del nivel de carga y pueden ser de dos tipos: de compresión o de tensión.

2.2.9. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión uniaxial o c_{UCS} como también se le conoce por sus siglas en inglés (Unconfined Compression Strength), es un parámetro geomecánico que se utiliza para caracterizar el comportamiento mecánico de las rocas.

Se debe tener cuidado a la hora de caracterizar la resistencia en una roca intacta ya que este valor depende de varios factores que lo afectan. Estos factores incluyen el tamaño y la forma, el contenido de humedad, entre otros.

La resistencia a la compresión uniaxial (c_{UCS}) se obtiene al someter una muestra de roca a cargas compresivas hasta alcanzar su resistencia máxima.

$$c_{UCS} = c_{m\acute{a}x} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

El c_{UCS} no debe ser considerado como un criterio de falla pero si como un índice que proporciona información sobre la característica de la resistencia. Este valor es muy útil cuando se quiere comparar y clasificar las rocas según su comportamiento.

2.2.10. Fricción

La fricción se define como una fuerza resistente que actúa sobre un cuerpo, la cual impide o retarda su deslizamiento respecto a otro cuerpo o a una superficie que

este en contacto. Esta fuerza es siempre tangencial a la superficie en los puntos de contacto, y tiene un sentido tal que se opone al movimiento posible o existente del cuerpo respecto a esos puntos.

Cuando dos superficies están en contacto siempre se presentan fuerzas tangenciales o fuerzas de fricción las cuales están limitadas en magnitud.

2.2.11. Criterio de falla Mohr-Coulomb

Este criterio considera que la resistencia de un material puede medirse por el esfuerzo cortante máximo que soporta ese material y que éste es función del esfuerzo normal actuante en el plano de falla. El estudio del comportamiento de los estados de esfuerzos se realiza bidimensionalmente mediante la ecuación de Coulomb, el círculo de Mohr y su teoría conjunta. El criterio *de falla Mohr-Coulomb* es una combinación de dos ideas que fueron desarrolladas por separado, Coulomb (1733) y Otto Mohr.

La teoría de Coulomb se usó en los comienzos de los estudios modernos de la mecánica de suelo. En 1733 Coulomb estableció que un material falla cuando el esfuerzo cortante alcanza un valor máximo.

La teoría de Mohr, establece que la falla por deslizamiento de un material ocurre a lo largo de la superficie particular en la que la relación esfuerzo tangencial y normal alcance un valor máximo.

El *criterio de falla Mohr-Coulomb* puede ser representado en el espacio de los esfuerzos principales o en el plano π (plano cuya normal es el eje hidrostático $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$) bajo la forma hexagonal (Ver Figura 2.7).

Ecuación de falla de Coulomb.

Esta ecuación fue postulada en el año 1776, donde la máxima resistencia al corte esta dada por:

$$|\tau| = C_0 + \sigma \tan \phi \quad (\text{Ec. 2.2})$$

La pendiente de la recta se llama coeficiente de rozamiento interno.

Envolvente de falla de Mohr

Mohr propuso que durante la falla por corte a lo largo de un plano, los esfuerzos normales y cortantes están relacionados por una función característica del material expresada como:

$$|\tau| = f(\sigma) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

La envolvente de falla tiene como función dividir los estados de esfuerzos que implican fallas de los estados de esfuerzos estables.

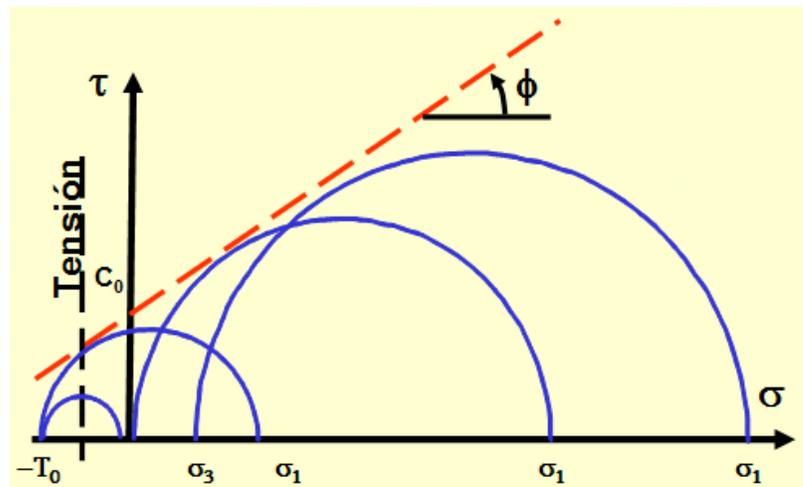


Figura 2.7. Envolvente de falla Mohr-Coulomb

2.2.12. Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio permiten estimar las propiedades mecánicas a partir de la deformación de la roca sometida a diferentes condiciones de esfuerzos. Dependiendo del tipo de ensayo, se pueden investigar efectos como: la dilatación, compactación, la resistencia del material, el colapso del poro, etc. Las propiedades determinadas, a partir de ensayos de laboratorio, alimentan los diferentes modelos analíticos y numéricos usados en la solución de problemas asociados al comportamiento mecánico de la roca.

2.2.13. Ensayos de compresión

Existe una variedad de ensayos de compresión pero dos de los más importantes se mencionan a continuación:

Ensayo de compresión sin confinar. en este ensayo se coloca la muestra en un marco de carga sin presión de confinamiento, aumentando el esfuerzo axial compresivo desde cero hasta la falla del material. Durante el ensayo se adquieren las deformaciones para establecer la curva esfuerzo-deformación y con ello determinar los parámetros elásticos (E , ν) y la resistencia máxima a la compresión uniaxial (C_{UCS}).

Ensayos de compresión triaxial: se comprime un cilindro de roca bajo una presión de confinamiento constante, hasta llegar a su resistencia máxima. En este ensayo también se miden los parámetros elásticos (E , ν) en la curva esfuerzo-deformación. Utilizando varios ensayos triaxiales con diferentes presiones de confinamiento se puede generar la envolvente de falla Mohr-Coulomb.

2.2.14. Ensayos índices

Estos ensayos se caracterizan por la no aplicación de presión de confinamiento. Actualmente existe una variedad de ensayos entre los que se encuentran: a) el ensayo de tensión indirecta, b) el ensayo de carga puntual, c) el ensayo del tipo scratch o de rayado. Todos estos ensayos determinan parámetros índices tales como: la resistencia a la tensión (T_0 , I_s), la energía intrínseca específica (ϵ), el ángulo de fricción (ϕ), la dureza del material (K_{IC}), etc.

2.2.15. Ensayos del tipo scratch o de rayado

Es una técnica que se utiliza para determinar la resistencia mecánica de la roca así como su ángulo de fricción, y consiste en someter una muestra al corte de una cuchilla del tipo de diamante policristalino a lo largo de su superficie (aprox. 1mm profundidad y 10 mm ancho) con una velocidad constante, permitiendo la reutilización del material.

2.2.16. Estabilidad de hoyo

El estudio de la estabilidad de hoyo puede realizarse durante la etapa de perforación o durante la producción. En ambos casos se trata de analizar y comparar los esfuerzos inducidos alrededor del hoyo con la resistencia de la roca. Los esfuerzos inducidos alrededor del hoyo están controlados fundamentalmente por la magnitud de las diferentes componentes de esfuerzos en sitio, por la orientación del pozo, las propiedades de la roca, la presión del fluido de yacimiento, el peso de lodo y la temperatura.

2.2.17. Sistema TSI "Terratek Strenght Index"

Es un equipo utilizado para realizar ensayos del tipo scratch patentado por Terratek, compuesto por las siguientes partes; una base con sujetadores (bisagras), un motor

de pasos, dos mecanismos de movimiento (horizontal y vertical), una celda de carga, un elemento de corte, y un sistema de adquisición de datos.

2.2.18. Sistema MTS "Rock Testing System"

Es un equipo gobernado por servomecanismos que pueden controlar la deformación axial o radial de la muestra durante la ejecución del ensayo. Además tiene la capacidad de aplicar una carga axial de 1.000.000 lb, una presión de confinamiento de 20.000 psi y una presión de poros de 20.000 psi. La carga axial, la presión de poros y la presión de confinamiento son aplicadas por actuadores controlados por servomecanismos. Las deformaciones axiales y radiales son medidas durante la ejecución del ensayo por transductores lineales.

3.1. Tipo de investigación

La base de investigación de este trabajo es del tipo *exploratoria*, ya que el tema que se desarrolla es poco conocido a nivel nacional y de sus resultados se espera la integración del comportamiento mecánico de las rocas lutíticas a los problemas de perforación. Por otra parte esta investigación es también del tipo *explicativa* ya que mediante la misma se busca las relaciones causa-efecto que pueda existir entre el lodo de perforación base agua y los parámetros mecánicos de la roca. Por último, esta investigación es del tipo *correlativa* ya que se quiere evaluar el grado de relación entre los resultados obtenidos con los ensayos del tipo scratch y los resultados obtenidos de estudios anteriores, principalmente ensayos de compresión triaxial.

3.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En primer lugar es necesario acudir a la *revisión bibliográfica* de documentos o referencias técnicas que planteen la misma problemática tanto en el ámbito nacional como internacional. Posteriormente se hace necesario la técnica de la *observación directa* de las muestras de núcleos a utilizar en los ensayos, ya que este procedimiento ha sido ejecutado y evaluado en el extranjero como un procedimiento de ensayo y error. Por otra parte, un *análisis de contenido* para el estudio de la influencia de fluido de perforación en los parámetros mecánicos de las lutitas. Por último, un *análisis correlativo* con el fin de entender mejor los resultados provenientes de un ensayo tipo índice (ensayo del tipo scratch).

Se utilizará como único instrumento de recolección de datos el formato Excel de Microsoft Office XP.

3.3. Método de investigación

Para este trabajo se prevee utilizar un método de análisis sistemático de problemas de la realidad, al que se le denomina *investigación experimental de campo*. El propósito de este método es describir, interpretar, explicar las causas y efectos o predecir las ocurrencias del problema planteado.

En este estudio se plantea una investigación realista en la que una o más variables independientes (núcleos de lutitas a determinadas condiciones o estímulos) son manipuladas en condiciones tan cuidadosamente controladas como lo permite la situación a fin de observar los efectos que se producen en las variables dependientes.

3.3.1. Procedimiento seguido

El procedimiento seguido para el desarrollo de este proyecto, se describe a continuación:

- Estudio y análisis de la bibliografía con relación a la problemática planteada.
- Caracterización mineralógica de las muestras de lutitas seleccionadas para el estudio
- Diseño de un recipiente contenedor de fluido que sea adaptable al equipo TSI y que pueda soportar un elemento (muestra de roca) de forma tal que no sufra rotación durante la aplicación de las fuerzas de corte.
- Preparación del fluido de perforación (base agua).
- Realización de ensayos en muestra patrón utilizando el equipo TSI.

- Ejecución de los ensayos en las muestras de lutitas seleccionadas.
- Análisis de los resultados obtenidos.

4.1. Descripción del sistema

El sistema TSITM es un equipo utilizado para realizar ensayos del tipo scratch patentado por Terratek, compañía con experiencia en mecánica de roca y considerada como uno de los mejores centros tecnológicos en mecánica de rocas.

El sistema TSITM tiene un interés particular en la industria petrolera porque: a) a escala de núcleo provee medidas continuas de la resistencia de una roca, b) en un núcleo se puede medir variabilidad de los valores de resistencia en función de la profundidad, c) permite la adecuada conceptualización del yacimiento en función de unidades mecánicas, y d) las propiedades mecánicas son determinadas con mayor resolución que las propiedades provenientes de registros.

Como se muestra en la Figura 4.1 el sistema TSI “Terratek Strenght Index”, está constituido por las siguientes partes; una base con sujetadores (bisagras), un motor de pasos, dos mecanismos de movimiento (horizontal y vertical), un elemento de corte, y un sistema de adquisición de datos.

4.1.1. Estructura del equipo

La estructura original del equipo TSI, tal como se muestra en la Figura 4.2, está diseñada para realizar ensayos del tipo scratch en muestras consolidadas del tipo arenisca, calizas etc, sin embargo para realizar ensayos en lutitas se requiere realizar una adaptación al equipo, la cual será detallada en el capítulo siguiente.

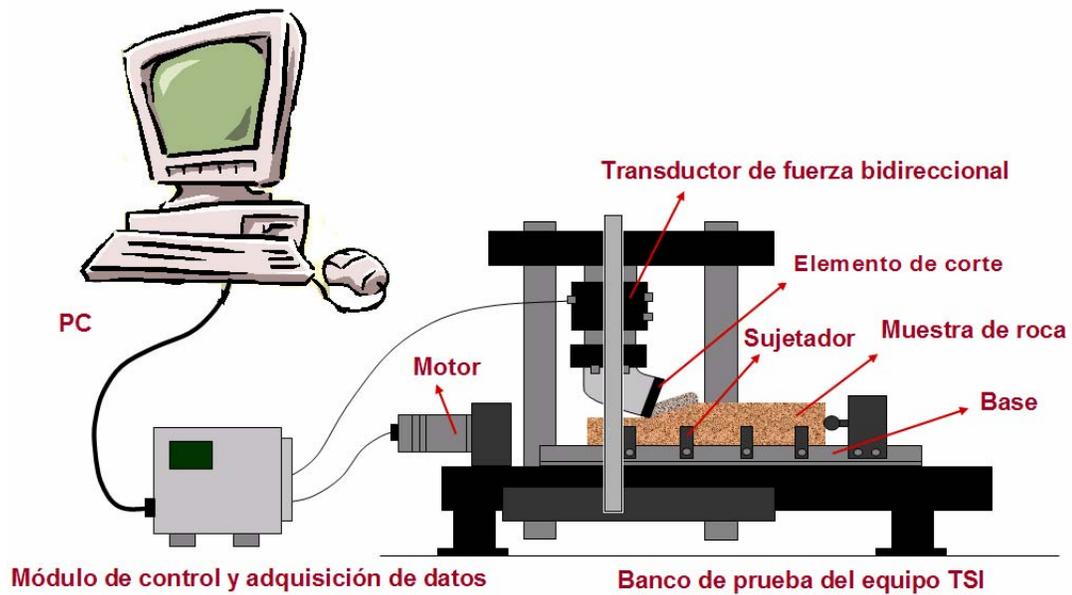


Figura 4.1. Sistema TSI (Terratek Strength Index).

Fuente: presentación de Franquet, J.

La *estructura original* esta compuesta principalmente por una base con suficiente rigidez para mantener constante la profundidad del corte a lo largo del mismo. En la base se encuentra dos piezas (una horizontal y otra vertical) que sirven como guía. La pieza horizontal cuenta con 3 barras cilíndricas, que la atraviesan, y estas a su vez cuentan con bisagras que se ajustan a las dimensiones de la muestra y son usadas para bloquear los movimientos (lateral o de rotación) de la muestra durante el ensayo. La pieza vertical cuenta con un tornillo que puede ser ajustado a las dimensión de la muestra, este tornillo tiene la función de bloquear el movimiento horizontal de la muestra cuando es sometida a la aplicación de fuerzas de corte tangenciales. La longitud del mecanismo de viaje horizontal puede variar desde 20 cm - 100cm.

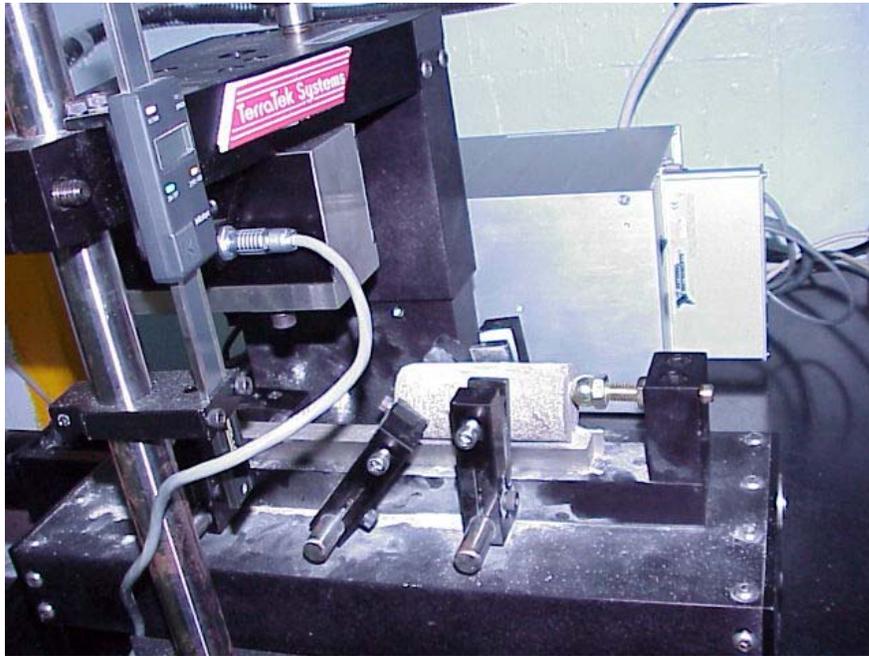


Figura 4.2. Estructura original del equipo TSI.

4.1.2. Mecanismos de movimiento

El movimiento horizontal del equipo es generado por un motor de paso que esta conectado al eje de un tornillo sinfín por medio de una caja de engranaje. Esta configuración permite mover la cuchilla a una velocidad constante en contra de una fuerza horizontal de 3000N. La velocidad de corte es definida por el operador antes de comenzar el ensayo. El control del motor de pasos esta regulado a través de un software denominado IMS (Intelligent Motion Systems), el cual dirige, en respuesta a un comando externo, la marcha del motor en un orden de secuencia apropiada.

El motor de paso impone el movimiento lineal relativo entre la muestra de roca a ensayar y el elemento de corte.

El movimiento vertical es generado manualmente a través de un micrómetro digital, con una resolución de 0,01mm, que sirve para ajustar la profundidad de corte.

4.1.3. Elemento de corte

El elemento de corte utiliza dos cuchillas de diamante policristalino, que son reemplazables, y cuya configuración corresponde a dos tipos: afiladas y no afiladas.

En la Figura 4.3 y 4.4 se muestra la representación de las cuchillas afilada (sharp) y no afilada (blunt) .

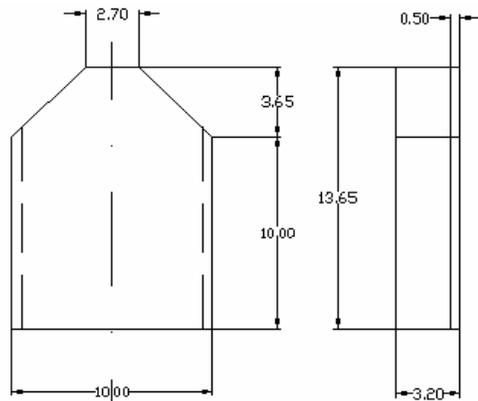


Figura 4.3. Cuchilla Afilada (mm)

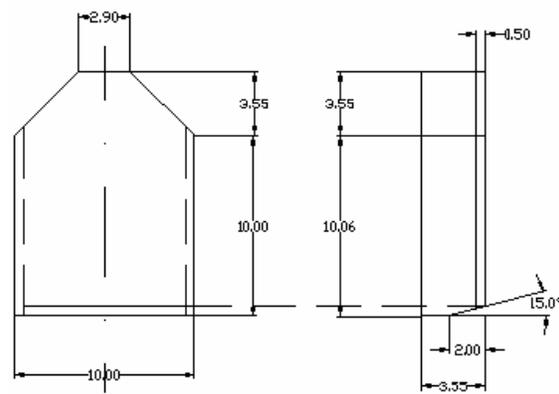


Figura 4.4. Cuchilla No Afilada (mm)

En el Anexo A, se puede observar en detalle las características de las cuchillas.

4.1.4. Traductor de fuerzas

La medición se realiza utilizando un sensor de carga manufacturado por NK Biothechnical, cuyas características son:

- Medición con sensores independientes (de la componente vertical y horizontal de la fuerza).
- Alta precisión y resolución en la medición de las fuerzas (cercana a 1N).
- Alta rigidez vertical y horizontal que limita el error en la profundidad de corte.

- Para una velocidad de corte de 4mm/s, hay una frecuencia de adquisición de 100 Hz equivalente a una resolución espacial de 25 mediciones de fuerza en un milímetro.

El rango de fuerza utilizada por el equipo puede variar desde 10N hasta 4000N con una precisión de 1N, la velocidad de corte puede estar establecida entre 0,1 mm/s y 0,4 mm/s.

4.1.5. Adquisición de datos

El sistema esta controlado y sincronizado siguiendo un procedimiento que se sigue bajo un programa llamado Labview.

La adquisición de datos se realiza bajo plataforma Window (Window 95 y 98) el cual permite el almacenamiento de las fuerzas adquiridas durante el ensayo.

4.2. Principio del ensayo tipo Scratch

Consiste en someter una muestra de roca al corte de una cuchilla a lo largo de su superficie con una velocidad constante. La fuerza de corte generada por la cuchilla tendrá dos componentes (horizontal y vertical). La profundidad de corte "d" de la cuchilla puede ser ajustada y puede variar desde 0,1 mm hasta 0,4 mm.

Para realizar el ensayo se utilizan dos tipos de cuchillas una *afilada* "Sharp" que permite determinar la energía intrínseca específica (equivalente a la resistencia del material) y una *no afilada* "Blunt" que permite determinar la energía específica (que relaciona la fricción) para determinar el ángulo de fricción de la roca.

4.3. Corte dúctil y frágil

Durante el procedimiento se pueden presentar dos tipos de corte: dúctil y frágil (Ver Figura 4.5). Estos tipos de corte dependerán de cuan profundo se realiza el corte, por ejemplo: para cortes pocos profundos el modo de corte es dúctil y para corte de mayores profundidades el modo de corte es frágil. Adicionalmente, la conformación del material también se debe considerar a la hora de diferenciar los tipos de corte, por ejemplo: si el grano es grueso o fino, con poca cohesión o suelto.

Un estudio realizado por Thomas (1998) indica que cuando se tiene modo de corte dúctil (asociado a flujo plástico porque el mecanismo de falla puede ser descrito como un flujo de material continuo) nos encontramos en la zona donde la fuerza es proporcional al área transversal de corte. En el modo de corte frágil (asociado a propagación de fractura lo que causa desconchamiento, porque el flujo del material es por bloque) se espera que el promedio de la fuerza es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad de corte.

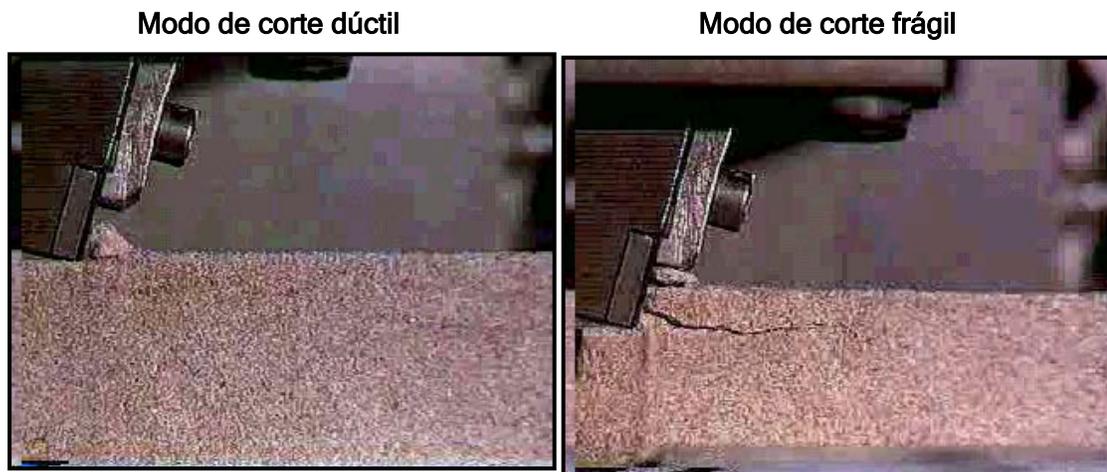


Figura 4.5. Diferenciación entre los tipos de corte dúctil y frágil

4.3.1. Transición entre modo de falla dúctil y frágil

En la Figura 4.6 se muestra la transición entre el comportamiento lineal (corte dúctil) y no lineal (corte frágil) con la profundidad de corte.

Estos regímenes de falla no solo corresponden a la variación de las profundidades de corte “ d ” sino también a la diferencia de respuesta de la fuerza. Usando el principio de mínima energía, la transición de un modo a otro puede ocurrir a una profundidad denominada profundidad crítica d_* , que se expresa como sigue:

$$d_* \propto \frac{K_{Ic}^2}{\sigma_{UCS}} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

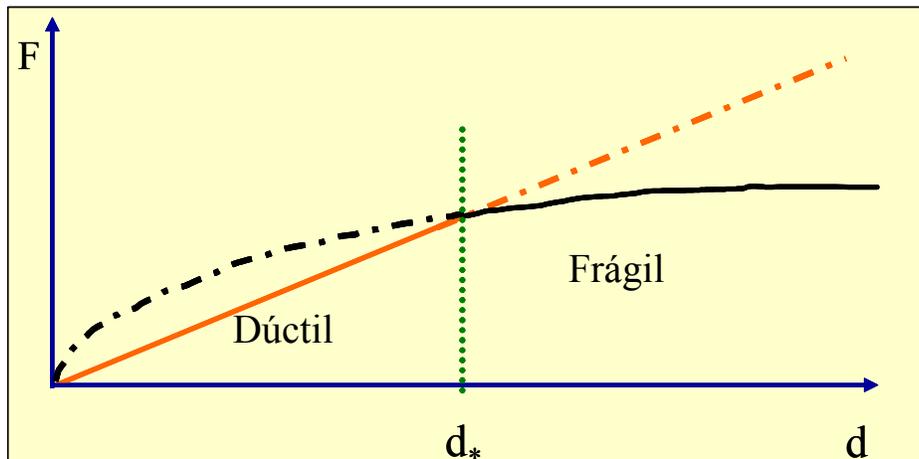


Figura 4.6. Transición entre los tipos de corte

Para $d < d_*$, la energía de disipación está asociada a falla dúctil. Esta energía es proporcional al volumen del material que falla, por lo tanto la resistencia a la compresión máxima es la propiedad característica de este mecanismo de falla.

$$F^c \propto \sigma_{UCS} w d \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Para $d > d_*$ la energía de disipación esta asociada a falla frágil. Para este mecanismo de falla la dureza del material es la propiedad que lo caracteriza. De este modo se espera que la fuerza es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad de corte.

$$F^c \propto K_{lc} w \sqrt{d} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Debido a que la energía en el modo de falla dúctil es disipada en el volumen de roca cortado y que la energía en el modo de falla frágil es disipada a lo largo de la superficie de la fractura, el concepto de energía intrínseca específica esta limitada solamente para el modo de falla dúctil y es por ello que la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial c_{UCS} no es apropiada en el modo de falla frágil.

4.4. Distribución de las fuerzas

Este equipo obtiene los parámetros de corte fundamentales para la caracterización mecánica de las energías disipadas durante los diferentes tipos de corte. Tanto la fuerza vertical como la horizontal son monitoreadas independientemente durante el recorrido del ensayo. La fuerza vertical corresponde a la componente normal de la fuerza de corte, F_v^c mientras que la fuerza horizontal corresponde a la componente de la fuerza de corte F_h^c en la dirección del recorrido de la cuchilla.

La descomposición de las fuerzas en el *corte afilado* es simple ya que el corte se realiza con una cuchilla de ángulo recto permitiendo una sola superficie de corte, lo cual genera dos componentes de fuerzas (F_v^c, F_h^c). Con este tipo de cuchilla, la superficie se desplaza perpendicularmente a la dirección del corte con una ángulo, θ . Por otro lado, la descomposición de las fuerzas durante el *corte no afilado* es

más compleja debido a la intervención de una fuerza de fricción F^f producto de una superficie adicional de contacto. Esta fuerza de fricción se produce durante el corte ya que se utiliza una cuchilla con dos superficies de contacto. La Figura 4.7 muestra un diagrama con los dos tipos de cuchilla y la descomposición de las fuerzas actuante en una muestra de roca.

4.4.1 Fuerzas de corte (cuchilla afilada y no afilada)

Para el caso de *cuchilla afilada* la fuerza de corte total viene expresada como la suma de las componentes (horizontal y vertical) como se muestra en las siguientes ecuaciones:

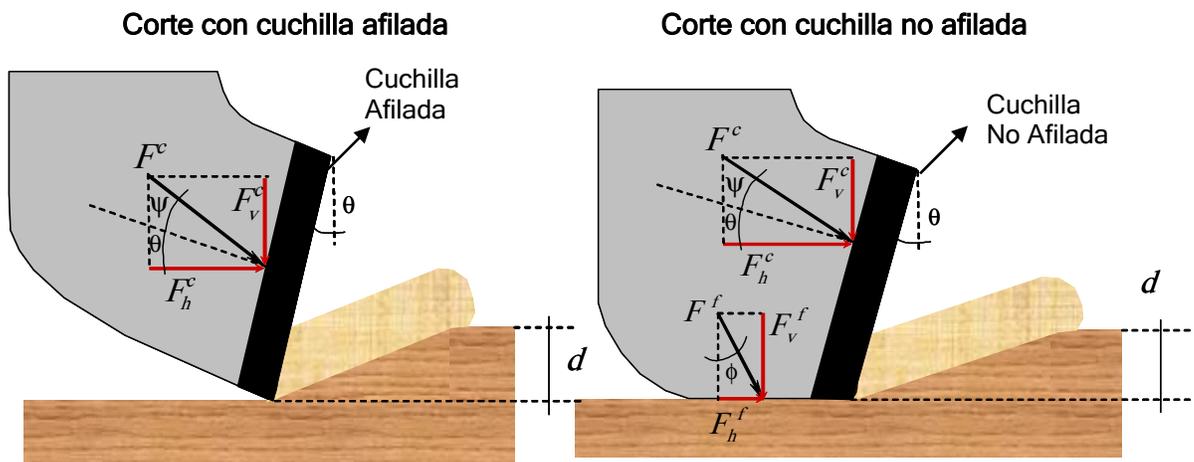


Figura 4.7. Distribución de las fuerzas (Adachi, 1996)

$$F^c = F_h^c + F_v^c \quad (\text{Ec 4.4})$$

$$F_h^c = \epsilon wd \quad (\text{Ec.4.5})$$

$$F_v^c = \zeta \epsilon wd \quad (\text{Ec. 4.6})$$

$$\zeta = \tan \alpha \quad \alpha = \theta + \psi$$

Para el caso de *cuchilla no afilada* se genera una fuerza adicional que es la fuerza de fricción por lo tanto las ecuaciones para determinar las fuerzas de corte total (horizontal y vertical) se muestran a continuación:

$$F = F^c + F^f \quad (\text{Ec.4.7})$$

$$F^c = F_h^c + F_v^c \Rightarrow F^c = \varepsilon wd(1 + \zeta) \quad (\text{Ec.4.8})$$

$$F^f = F_h^f + F_v^f \Rightarrow F_h^f = \mu F_v^f \quad (\text{Ec.4.9})$$

$$\therefore F^f = F_v^f(1 + \mu) \quad (\text{Ec.4.10})$$

DISEÑO Y ADAPTACIÓN DE UN RECIPIENTE AL EQUIPO TSI PARA REALIZAR ENSAYOS DE LUTITAS

Para cumplir con el objetivo principal de este trabajo se hizo necesario diseñar y adaptar un recipiente al equipo TSI. Este recipiente tiene dos funciones principales: a) mantener una muestra de lutita sumergida en aceite mineral durante la realización de los ensayos del tipo scratch, a fin de evitar la menor perturbación de la muestra y b) soportar la muestra de lutita de tal forma que no ocurra ningún movimiento lateral cuando este siendo sometida a fuerzas de corte.

5.1. Consideraciones del diseño del recipiente

Para el diseño del recipiente se tomó en cuenta ciertos factores donde el más importante de ellos fue mantener inalterable las funciones del equipo TSI.

En las consideraciones del diseño se hizo necesario cumplir con tres restricciones, las cuales se mencionan a continuación: a) que las dimensiones del recipiente se ajustaran al espacio disponible b) que el recipiente fuese de fácil remoción y c) que el banco de prueba del equipo no sufriera alteración en su forma y estructura.

A continuación se listan los factores utilizados en el diseño del recipiente:

- | | |
|------------------|-------------|
| a) Tamaño | d) Costo |
| b) Forma y Peso | e) Rigidez |
| c) Mantenimiento | f) Utilidad |

Los factores arriba mencionados están directamente relacionados a las dimensiones, al material, al proceso de fabricación, al ensamblaje de los elementos del sistema, etc.

A continuación se especifican los factores de diseño considerados:

- Consideraciones de tamaño: este factor debio ajustarse a un volumen aproximado de $40.5 \times 15.2 \times 10.7 \text{ cm}^3$ (Largo x Ancho x Alto).
- Consideraciones de forma y peso: estos factores debían cumplir dos objetivos: a) que su adaptación fuese cómoda y práctica para acoplarse al banco de prueba y b) que se permitiese el ensamblaje utilizando solo las manos.
- Consideraciones de mantenimiento: debido a las diferentes características de fluidos a utilizar dentro del recipiente (aceite, agua, etc). En las consideraciones de este factor se buscó un recipiente que fuese fácil de limpiar.
- Consideraciones de costo de fabricación y material: este factor es muy importante en el proceso de decisión de un diseño, sin embargo para este caso lo más importante fue utilizar los equipos del taller de la empresa para la fabricación del recipiente.
- Consideraciones de rigidez: tiene que ver con el material (ver selección del material) y el ajuste del recipiente al equipo original para evitar todo tipo de vibración que pueda producirse durante los ensayos.

- Consideraciones de utilidad: para ello se seleccionó un material que soportara diferentes composiciones químicas (sales o salmueras, alcoholes, etc).

En la Figura 5.1 se muestra el diseño del recipiente junto con las piezas que lo conforman.

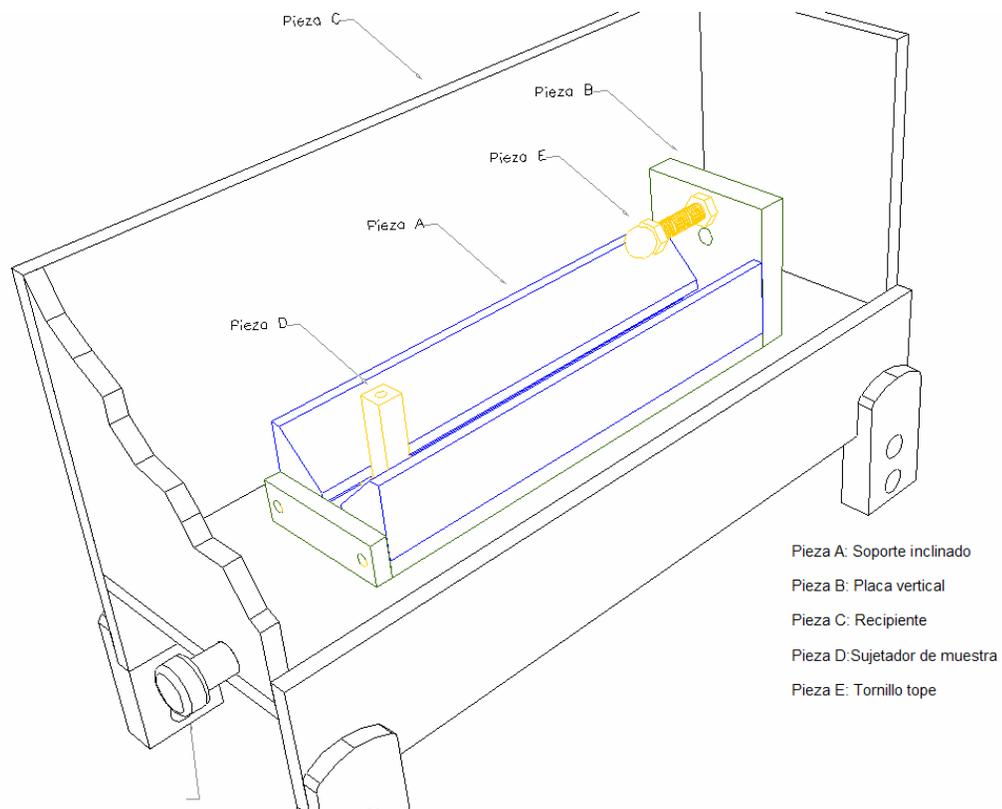


Figura 5.1. Recipiente diseñado.

Internamente el recipiente de plexiglas cuenta con cuatro piezas. Una pieza de soporte que posee dos placas inclinadas a 45° , una placa vertical y un tornillo tope, que tiene la función de bloquear el movimiento horizontal de la muestra en el proceso de corte, y un sujetador de muestra que está entre la zona de separación de las placas inclinadas, el cual sirve para ajustar la muestra en la parte posterior.

Conociendo este primer bosquejo, vale mencionar que la pieza diseñada ofrece la practicidad y rigidez que se esperaba. Todas las piezas están desglosadas por láminas en Anexo B.

5.1.1. Selección del material

Para seleccionar el material adecuado no fue necesario realizar un análisis de factor de seguridad, ya que las fuerzas aplicadas no son soportadas por la estructura del recipiente, estas fuerzas son soportadas por la muestra de roca.

En la selección del material se hizo hincapié en uno que fuese de fácil adquisición y económico, obteniéndose una pieza con bajo costo de fabricación. El material utilizado para la fabricación del recipiente es un polímero termoplástico, denominado comercialmente *plexiglas* (Polimetílico Metacrilato), que presenta una resistencia a la tensión entre 7.000 y 11.000 psi, una densidad de 1,17-1,20 g/cm³ y un módulo de elasticidad de 0,4x10 psi.

Los polímeros termoplásticos presentan las siguientes características: son de baja densidad, bajo costo, tenacidad, claridad óptica, facilidad para darles forma complejas, baja conductividad térmica, resistencia a los productos químicos, y flexibilidad.

En la Tablas 5.1 se presentan las propiedades mecánicas de algunos materiales y en la Tabla 5.2 se describen los elementos a los cuales ciertos polímeros son solubles, estos elementos están conformados principalmente por ácidos, lo cuales no serán en ningún momento componentes de fluidos de perforación.

Tabla 5.1. Propiedades mecánicas de algunos materiales.

Material	Punto de Fusión (° F)	Resistencia (psi)	Resistencia a la compresión (psi)	Peso (lb/ft ³)	Coefficiente de expansión térmica (plg/plg por °F)	Módulo de elasticidad (psi)
Acero	2700	70.000	70.000	490	6,5 x 10	30 x 10
Hierro forjado	2600	40.000	40.000	484	6,5 x 10	28 x 10
Acero inoxidable	2500	95.000	95.000	494	9,6 x 10	28 x 10
Fundición gris	2400	35.000	110.000	482	6,0 x 10	15 x 10
Latón	1720	55.000	55.000	529	10,3 x 10	15 x 10
Bronce	1700	60.000	60.000	548	10,0 x 10	16 x 10
Aluminio	1220	40.000	40.000	170	12,8 x 10	10 x 10
Plexiglas	320	7.000	13.000	72	39 x 10	0,40 x 10
Nylon	300	11.000	10.000	70	50 x 10	0,35 x 10
PVC	260	8.000	13.000	88	20 x 10	0,80 x 10
Poliestireno	250	5.000	11.500	60	100 x 10	0,05 x 10

Fuente: Sperry, Bill. Properties of Common Materials Volume 5, Number 10. Journal of the Home Metal Shop Club of Houston. October 2000

Tabla 5.2. Tabla de solubilidad de algunos polímeros.

Polímero	Soluble en:	Insoluble a:
Poli (metacrilato de etilo)	benceno, toluene, xileno, tetralina, cloroformo, cloruro de metilo, dicloroetileno, éter etílico, acetona, metil etil cetona, dioxano, ácido acético, acetato de etilo	Hexano, ciclohexano, metanol, etilenglicol
Poli (metacrilato de metilo)	benceno, tolueno, xileno (caliente), cloroformo, cloruro de metileno, clorobenceno, dioxano, acetona ciclohexanona, metil etil acetona, ácido fórmico, acético, isobutírico, acetato de etilo	Hexano, ciclohexano, metanol, tetracluro de carbono, etanol, éter, etílico
Poli (acrilato de etilo)	benceno, toluene, hidrocarburos, clorados, tetrahidrofurano, cetonas, ésteres,	hidrocarburos alifáticos, ciclohexanol, alcoholes de más de 5 carbonos
Poli (acrilato de metilo)	benceno, toluene, hidrocarburos, clorados, ésteres, tetrahidrofurano,	hidrocarburos alifáticos, alcoholes, éter

Fuente: Revista de plásticos modernos, Número 448 (Octubre 1993).

5.2. Cálculos para el diseño del soporte de muestra (Pieza A)

Esta pieza consiste en una placa de plexiglas la cual va unida a la base del recipiente mediante soldadura (Acrifix 92) y debe soportar la muestra de tal forma que no ocurra ningún movimiento lateral cuando este siendo sometida a fuerzas normales y tangenciales de corte, (Ver Figura 5.2).

Para demostrar que la muestra permanece rígida se plantearon dos casos: a) la aplicación de la fuerza vertical se realiza en el eje medio de la muestra a ensayar, b) la aplicación de la fuerza se encuentra a cierta distancia del eje de la muestra a ensayar.

El primer caso (caso A) corresponde el estado ideal de realización de ensayos, ya que la colocación de la cuchilla permite una aplicación exacta de la fuerza vertical o normal. El segundo caso (caso B) corresponde a la cuchilla colocada fuera del eje de la muestra.

A continuación se plantean para ambos casos (caso A y B) las ecuaciones utilizadas para definir la inclinación óptima del soporte para un asentamiento seguro de la muestra. Para ello se realizó un análisis de sensibilidad entre diferentes diámetros de muestras “ $2r$ ” (1.5 plg, 2 plg y 2.5plg), diferentes valores de coeficiente de fricción “ μ ” (entre la roca y el plexiglas), así como diferentes valores de fuerza o carga normal “ F_v ”.

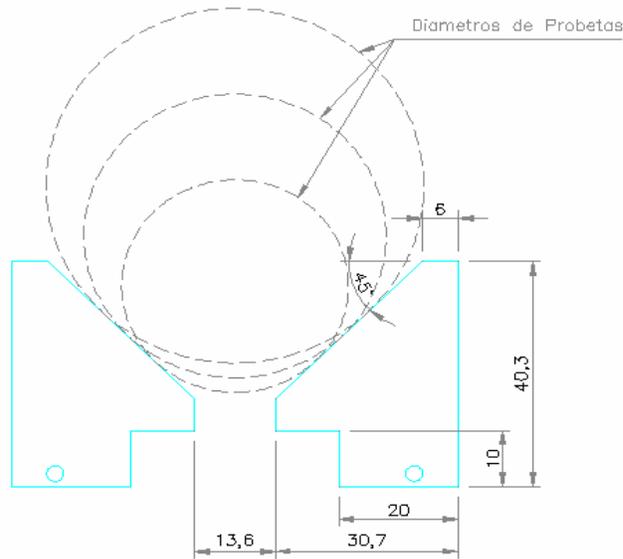


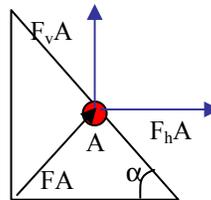
Figura 5.2. Esquema de la pieza A (soporte de muestras).

CASO A:

Suponiendo a) simetría en el *punto C*, b) aplicación de la fuerza vertical en el eje de simetría y c) sumatoria de momento en el punto O (Ver Figura 5.3).

La descomposición de la fuerza normal en los puntos A y B viene dada por las siguientes ecuaciones:

Punto A:



$$\cos(\alpha) = \frac{F_{vA}}{F_A} \quad \sin(\alpha) = \frac{F_{hA}}{F_A} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Igual para el punto B

Punto B:

$$\cos(\alpha) = \frac{F_{vB}}{F_B} \quad \sin(\alpha) = \frac{F_{hB}}{F_B} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

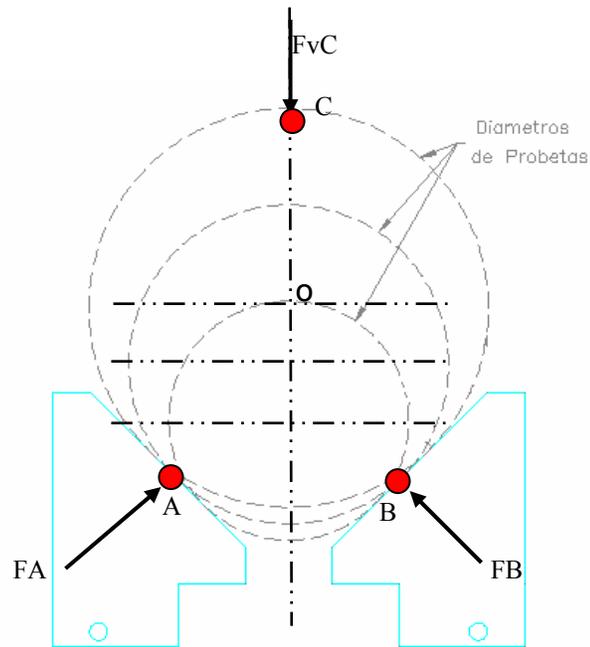


Figura 5.3. Distribución de las fuerzas, caso A.

Las ecuaciones de equilibrio son:

$$\sum F_h = 0 \quad F_{hA} - F_{hB} = 0 \quad (\text{Ec. 5.3})$$

$$\sum F_v = 0 \quad - F_{vC} + F_{vA} + F_{vB} = 0 \quad (\text{Ec. 5.4})$$

$$\sum M_o = 0 \quad F_A * 0 + F_B * 0 + F_{vC} * 0 = 0 \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Sustituyendo Ec. 5.1 y 5.2 en Ec. 5.3 y 5.4 se obtiene que:

$$\sum F_h = 0 \quad F_A \text{Sen}(\alpha) - F_B \text{Sen}(\alpha) = 0 \quad (\text{Ec. 5.6})$$

$$\sum F_v = 0 \quad - F_{vC} + F_A \text{Cos}(\alpha) + F_B \text{Cos}(\alpha) = 0 \quad (\text{Ec. 5.7})$$

$$\sum M_o = 0 \quad (\text{Ec. 5.8})$$

Para

este caso queda demostrado que la muestra permanece en equilibrio estático.

Por último

$$\sum F_h = 0 \quad F_A \text{Sen}(\alpha) = F_B \text{Sen}(\alpha) \quad (\text{Ec. 5.9})$$

$$\sum F_v = 0 \quad F_{vC} = \text{Cos}(\alpha)(F_A + F_B) \quad (\text{Ec. 5.10})$$

Caso B:

Suponiendo

- a) La aplicación de la fuerza vertical (Fv) desplazada del eje de simetría (Ver Figura 5.4).
- b) Sumatoria de momento en el *punto 0*.
- c) Desplazamiento de la muestra cuando se superan las fuerzas friccionales (F_{fA} y F_{fB}) en los puntos de contacto entre el núcleo y el soporte inclinado.

Donde: $F_{fA} = \mu F_A$ (Ec. 5.11) y $F_{fB} = \mu F_B$ (Ec. 5.12)

Planteando las ecuaciones de equilibrio se tiene:

$$\sum F_h = 0$$

$$F_{fhA} + F_{fhB} + F_{hA} - F_{hB} = 0 \quad (\text{Ec. 5.13})$$

$$\sum F_v = 0$$

$$- F_{vC} - F_{fvA} + F_{fvB} + F_{vA} + F_{vB} = 0 \quad (\text{Ec. 5.14})$$

$$\sum M_o = 0$$

$$F_A * 0 + F_B * 0 + F_{vC} * X + F_{fA} * r + F_{fB} * r = 0 \quad (\text{Ec. 5.15})$$

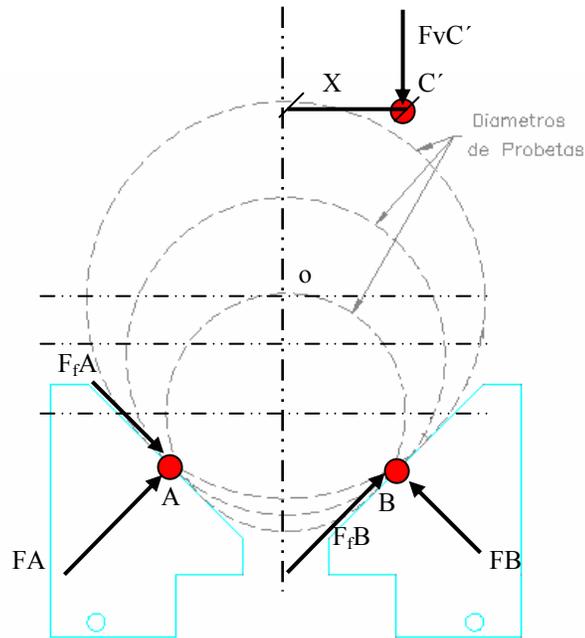
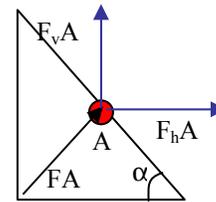
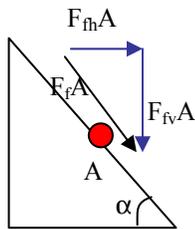


Figura 5.4. Distribución de las fuerzas, caso B .



La descomposición de las fuerzas friccional y normal en A y B viene dada por las siguientes ecuaciones:

Punto A:

$$\text{Sen}(\alpha) = \frac{F_{fvA}}{F_{fA}} \quad \text{Cos}(\alpha) = \frac{F_{fnA}}{F_{fA}} \quad (\text{Ec. 5.16})$$

$$\text{Cos}(\alpha) = \frac{F_{vA}}{F_A} \quad \text{Sen}(\alpha) = \frac{F_{hA}}{F_A} \quad (\text{Ec. 5.17})$$

Igual para el punto B

Punto B:

$$\text{Sen}(\alpha) = \frac{F_{fvB}}{F_{fB}} \quad \text{Cos}(\alpha) = \frac{F_{fnB}}{F_{fB}} \quad (\text{Ec. 5.18})$$

$$\cos(\alpha) = \frac{F_{vB}}{F_B} \quad \sin(\alpha) = \frac{F_{hB}}{F_B} \quad (\text{Ec. 5.19})$$

Sustituyendo

$$\sum F_h = 0$$

$$F_{fA} \cos(\alpha) + F_{fB} \cos(\alpha) + F_A \sin(\alpha) - F_B \sin(\alpha) = 0 \quad (\text{Ec. 5.20})$$

$$\sum F_v = 0$$

$$- F_{vC} - F_{fA} \sin(\alpha) + F_{fB} \sin(\alpha) + F_A \cos(\alpha) + F_B \cos(\alpha) = 0 \quad (\text{Ec. 5.21})$$

$$\sum M_o = 0$$

$$- F_{vC} * X + F_{fA} * r + F_{fB} * r = 0 \quad (\text{Ec. 5.22})$$

Sustituyendo $F_{fA} = \mu F_A$ y $F_{fB} = \mu F_B$

$$\sum F_h = 0$$

$$\mu * F_A \cos(\alpha) + \mu * F_B \cos(\alpha) + F_A \sin(\alpha) - F_B \sin(\alpha) = 0 \quad (\text{Ec. 5.23})$$

$$\sum F_v = 0$$

$$- F_{vC} - \mu * F_A \sin(\alpha) + \mu * F_B \sin(\alpha) + F_A \cos(\alpha) + F_B \cos(\alpha) = 0 \quad (\text{Ec. 5.17})$$

$$\sum M_o = 0$$

$$- F_{vC} * X + \mu * F_A * r + \mu * F_B * r = 0 \quad (\text{Ec. 5.25})$$

Despejando F_A , F_B y X tenemos:

$$\sum F_h = 0 \quad F_A = \frac{F_B (\sin(\alpha) - \mu * \cos(\alpha))}{(\mu * \cos(\alpha) + \sin(\alpha))} \quad (\text{Ec. 5.26})$$

$$\sum F_v = 0 \quad F_B = \frac{F_{vC} (\mu * \cos(\alpha) + \sin(\alpha))}{2 * \sin(\alpha) * \cos(\alpha) * (1 + \mu^2)} \quad (\text{Ec. 5.27})$$

$$\sum M_o = 0 \quad X = \frac{\mu * r * (F_A + F_B)}{F_{VC}} \quad (\text{Ec. 5.28})$$

Luego se construye una tabla para diferentes valores de r , F_{VC} , μ , y α , con estos valores se determina F_B y F_A , por último se determina el valor de la excentricidad X . En el Anexo C, se encuentra el estudio de sensibilidad y la solución de los valores determinados.

Tomando en consideración los cálculos realizados, se puede concluir que el deslizamiento de la muestra será posible solo cuando se superen los valores de excentricidad X , el cual está directamente relacionado al coeficiente de fricción (entre la muestra y el soporte de plexigas), al ángulo de inclinación del soporte, a la fuerza vertical y al radio de la muestra, (Ver Figura 5.5).

Si se considera el caso particular de un soporte de 45° de inclinación, un coeficiente de fricción entre 0,15 - 0,20, una muestra de 31,7 mm de radio (2,5 plg de diámetro) y la aplicación de la fuerza vertical utilizando una cuchilla de 10 mm de ancho, es poco probable que se cometa errores de desvíos (excentricidades) mayores al 50% del ancho de la cuchilla, ya que estos son fáciles de detectar antes de realizar un ensayo.

5.3. Recipiente fabricado

Utilizando el software AutoCAD se realizó el diseño preliminar del recipiente, luego este fue enviado al taller mecánico de la empresa para su fabricación. En las Figuras 5.6 y 5.7 se muestra el recipiente fabricado y el recipiente adaptado al equipo TSI.

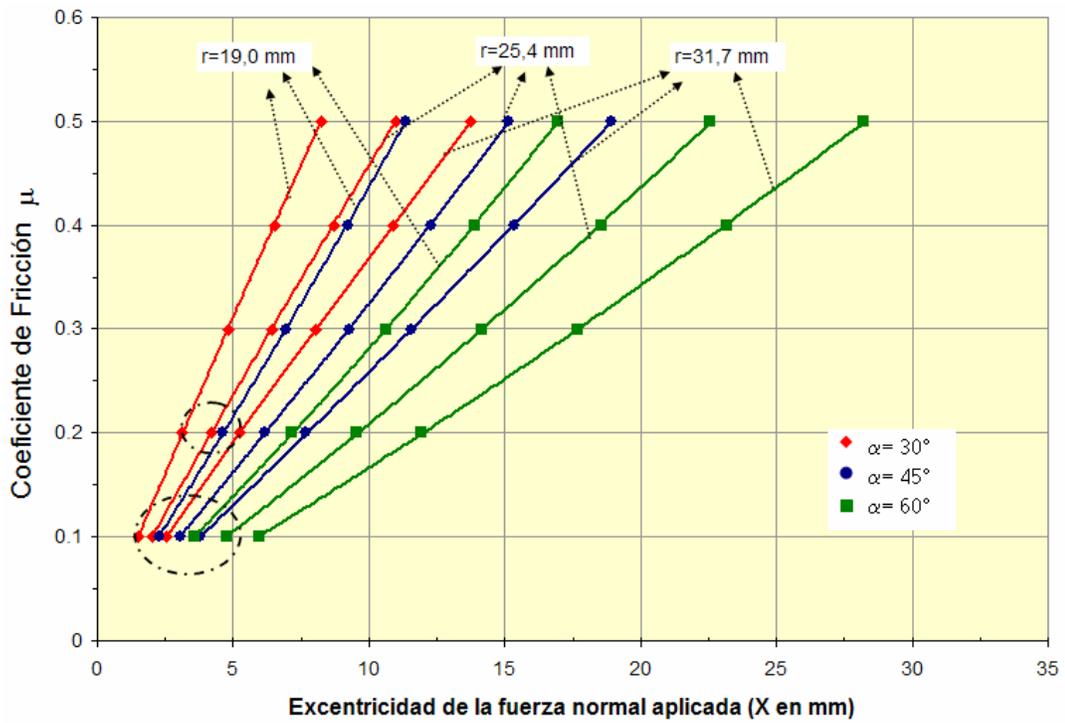


Figura 5.5. Excentricidad “X” de la fuerza normal para diferentes valores de fricción, radio de la muestra, y ángulo de inclinación del soporte.

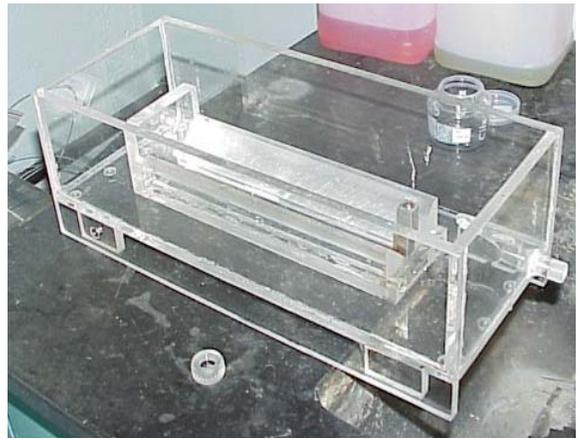
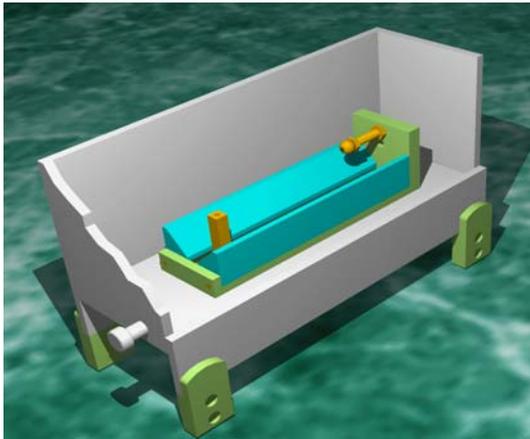


Figura 5.6. Recipiente de plexiglas fabricado.

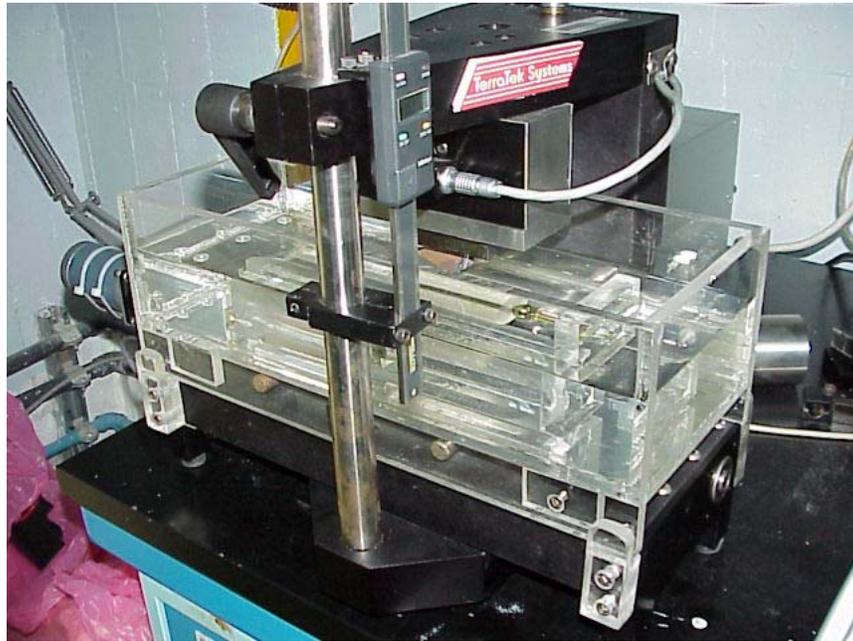


Figura 5.7. Recipiente adaptado al equipo TSI.

CARACTERIZACIÓN ROCA-FLUIDO

6.1. Roca (Lutitas)

Las lutitas de la formación Carapita son del Oligomioceno y constituyen el sello regional del oriente de Venezuela. Estas rocas provienen del distrito norte del estado Monagas, campo Bosque. Las muestras de rocas objeto de este estudio cumplen con el estándar ASTM de relación longitud:diámetro (2:1).

6.1.1 Composición mineralógica

El estudio mineralógico permite identificar la naturaleza de los minerales presentes en una muestra de roca. Mediante el ensayo de difracción de rayos X (XRD) se caracterizó mineralógicamente las muestras de lutitas. Estos ensayos proporcionan valores semicuantitativos de las cantidades de cada mineral presente en la lutita y los diversos tipos de minerales de arcillas.

En la Tabla 6.1 se ilustra la composición mineralógica de la fracción roca total y la fracción menor a dos micras, estimadas por XRD (difracción de rayos X).

TABLA 6.1. Caracterización mineralógica de la fracción roca total y de la fracción menor de 2 micras

MUESTRA	CUARZO (%)	ARCILLAS (%)					FELD-Na (%)	PIRITA (%)	SIDERITA (%)	CALCITA (%)	DOLOMITA (%)
		CAOLINITA	CLORITA	ILITA	I/S	CAOL+CLO					
A	19	42,16	0	19,84	0	0	4	10	0	5	0
B	18	0	33,6	26,40	0	0	4	9	5	4	0
C	17	0	24	26,00	0	0	5	12	6	10	0
D	16	0	29,76	32,24	0	0	4	9	5	4	0
E	14	39,68	0	16,74	0	5,58	4	14	0	6	0

Fuente: Laboratorio de difracción de rayos X.

En las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se puede apreciar gráficamente los resultados de la composición mineralógica.

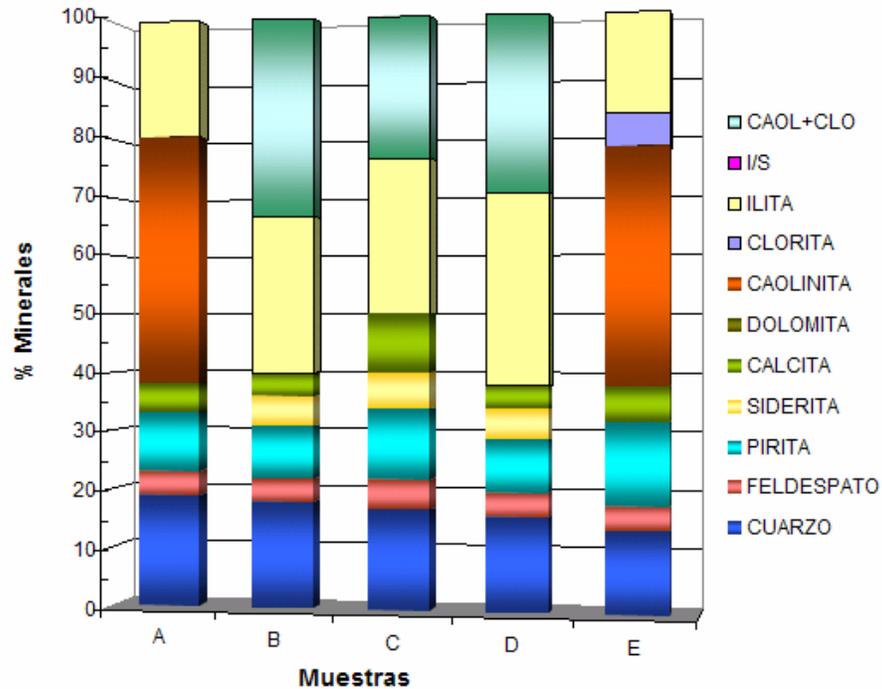


Figura 6.1. Caracterización mineralógica de la fracción roca total y de la fracción menor de 2 micras

En las Figuras 6.2 y 6.3 se ilustra la composición promedio de las muestras evaluadas. Se observa que las muestras están compuestas principalmente por minerales de arcillas, las cuales constituyen aproximadamente el 59% de la muestra. Los minerales de arcilla presentes dentro de esta fracción de arcillas son principalmente caolinita, ilita y clorita. El mineral presente en segunda proporción es el cuarzo, conformando un 17% de la composición total, y le siguen otros minerales en proporciones menores, tales como feldespato (4%), pirita (11%), siderita (3%) y calcita (6%).

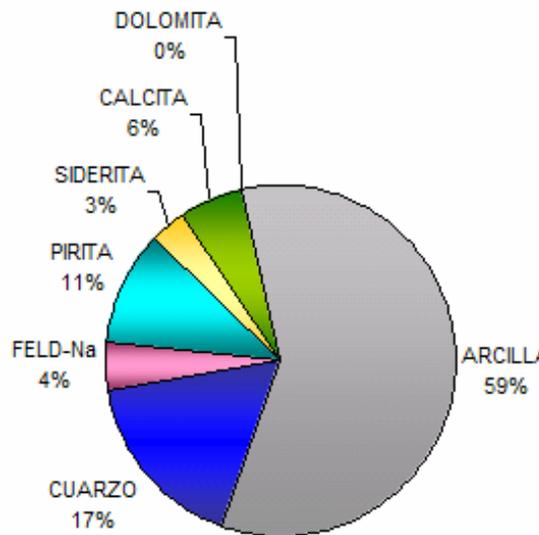


Figura 6.2. Valores promedio de la caracterización mineralógica de fracción roca total

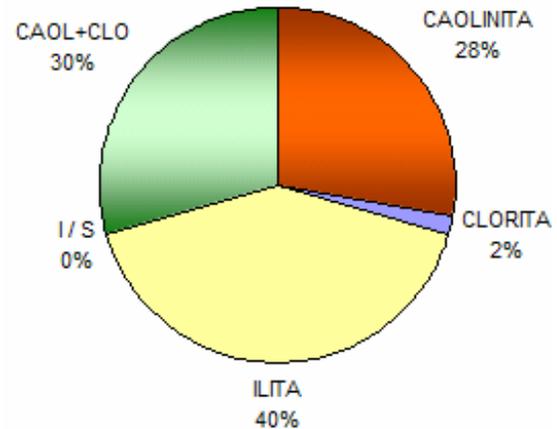


Figura 6.3. Valores promedio de la caracterización mineralógica de fracción menor a 2 micras

6.2. Fluido (Base agua)

El fluido de perforación utilizado para este estudio es un fluido base agua tipo polimérico, cuya composición es parecida a un lodo comercial de nombre AQUA DRILL. Este sistema de fluido utilizado emplea aditivos de lodo de poliglicol de bajo peso molecular y está diseñado para dar un rendimiento superior (en inhibición de lutitas) al compararse con otros fluidos base agua.

6.2.1. Características de rendimiento del sistema AQUA DRILL

- Buen inhibidor de lutitas
- No daña la formaciones productoras
- Alto índice de penetración
- Buen reductor del embolamiento de la mecha
- Excelente aplicación ambiental

-Temperatura de estabilidad de 163° C

6.2.2. Composición del sistema AQUA-DRILL

El sistema AQUA-DRILL (Baker, 1998) esta compuesto por:

a) Una fase primaria que puede contener agua o cualquiera de estas salmueras:

- Bromuro de Calcio y de Sodio.
- Cloruro de Calcio, de Potasio y de Sodio.
- Nitrato de Calcio.
- Acetato de Potasio y de Sodio.
- Formiato de Potasio (CLEAR-DRILL™ K) y de Sodio (CLEAR-DRILL™ N).

b) El tipo y la concentración de la salmuera seleccionada pueden ser usados para ajustar el punto de nube, bajar la actividad de la fase de agua y además proveer estabilidad en la lutita.

c) Uno o una combinación de varios glicoles (AQUA-COL™, AQUA-COL B, AQUA-COL D, AQUA-COL S, AQUA-COL XS) seleccionados a partir del punto de nube que se desea y la compatibilidad con la salmuera.

d) Inhibidores de polímeros para lutitas (AQUA-SEAL™, NEW DRILL® PLUS).

e) Biopolímeros para el control reológico (XANPLEX® D de INTEQ, Xanvis).

- f) Productos PAC u otros para el control de filtración (PERMA-LOSE™ HT, BIO-LOSE™, BIO-PAQ™, MILSTARCH®).
- g) Agentes mejoradores de la tasa de penetración (PENETREX®).
- h) Componentes adicionales para permitir la posterior reducción de la transmisión de presión de poros a través de mecanismos de precipitación cercanos a las paredes del hoyo (ALPLEX™).

La formulación del fluido de perforación que se planteó para este estudio es la que se muestra en la Tabla 6.2 y las propiedades teóricas para este fluido son las que se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6.2. Formulación lodo baker hughes

Producto	Concentración
KCl, lpb	37.60
MIL-PAC™ REG, lpb	0.87
MIL-PAC™ LV, lpb	2.01
NEW-DRILL® L, lpb	1.99
XANPLEX® D, lpb	0.31
AQUA-COL™, % en volumen	0
Soda Caustica, lpb	0.94
MIL-BAR®, lpb	223.90

Fuente: Fluid Facts Engineering Handbook de Baker Hughes, 1998.

A pesar de que se tienen una serie de propiedades teóricas para este tipo de lodo, se hizo necesario hacer un estudio práctico de reología y densidad (peso) del lodo, a fin de asegurar de manera comparativa el valor de la propiedad real del fluido de perforación diseñado. La densidad resultante para este lodo es 12,30 lpg.

Tabla 6.3. Propiedades típicas del lodo Aqua-Drill

Propiedad	Valores
Peso del lodo, lpg	12.5 - 13.2
Viscosidad Plástica, cP	30 - 35
Punto de cedencia, lbs/100 pie ²	25 - 30
Resistencia del gel, lbs/100 pie ²	4 - 7 / 5 - 14
KCl, lpb	33 - 36
Cloruros, g/L	45 - 57
Filtrado API, cc	3.0 - 5.6
pH	9.0 - 9.5

Fuente: Fluid Facts Engineering Handbook de Baker Hughes, 1998.

6.2.3. Comportamiento reológico del lodo.

A través de una prueba que describe el comportamiento reológico del lodo base agua, se determinó la resistencia al corte que posee el fluido a medida que transcurre el tiempo. La curva característica del comportamiento reológico para el lodo base agua se puede observar en la Figura 6.4. En esta figura se puede observar que el fluido muestra un comportamiento viscoelástico.

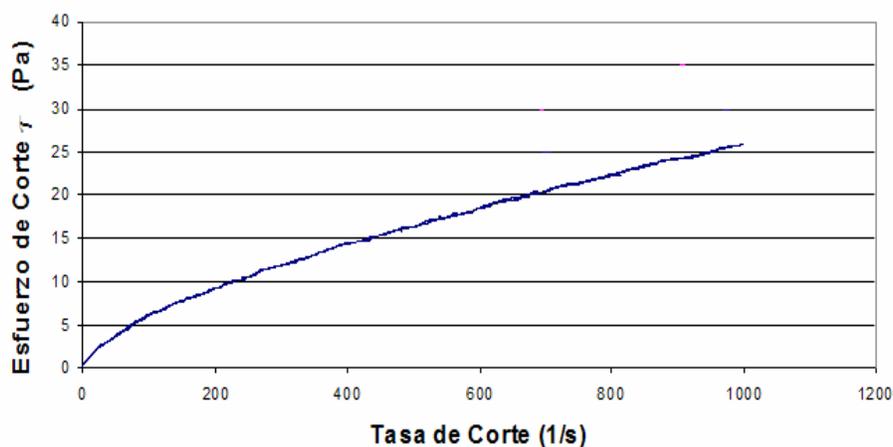


Figura 6.4. Comportamiento reológico del lodo

Fuente: laboratorio de fluidos

METODOLOGÍA, PROCEDIMIENTOS Y RESULTADOS

Es de suma importancia para la industria petrolera nacional desarrollar una metodología para realizar los ensayos del tipo scratch en formaciones lutíticas que permitan disminuir los elevados costos asociados a la caracterización de núcleos en el laboratorio.

En este capítulo se mostrará la metodología de realización de ensayos tipo scratch y el procedimiento a seguir para determinar, de manera adecuada, la energía intrínseca específica “ ε ”, el coeficiente de fricción “ μ ” y el coeficiente de inclinación “ ζ ” en formaciones lutíticas, parámetros esenciales para desarrollar modelos constitutivos realistas que permitan hacer diagnósticos apropiados sobre el desempeño de la roca bajo las condiciones de esfuerzo que se desarrollan alrededor del hoyo. Adicionalmente en este capítulo se mostrará los resultados de fuerza corte (vertical y horizontal), profundidad de corte, energía específica y resistencia a la perforabilidad de cada una de las muestras con los fluidos de trabajo (aceite mineral y base agua) .

7.1. Metodología de realización de ensayos tipo scratch

Para definir la metodología objeto de este estudio se establecieron una serie de pasos a fin de encontrar las condiciones óptimas de realización de ensayos del tipo scratch en muestras de lutitas. Para ello se realizarón varios ensayos preliminares tendientes a definir de manera rápida y como primera aproximación, los parámetros y métodos de preparación que afectan la realización de los ensayos tipo scratch.

Dicha metodología se divide en tres (3) etapas principales, las cuales se esquematizan en la Figura 7.1 y se detallan seguidamente.

1. La planificación de la secuencia de ensayos
2. La preparación de las muestras
3. La ejecución de los ensayos

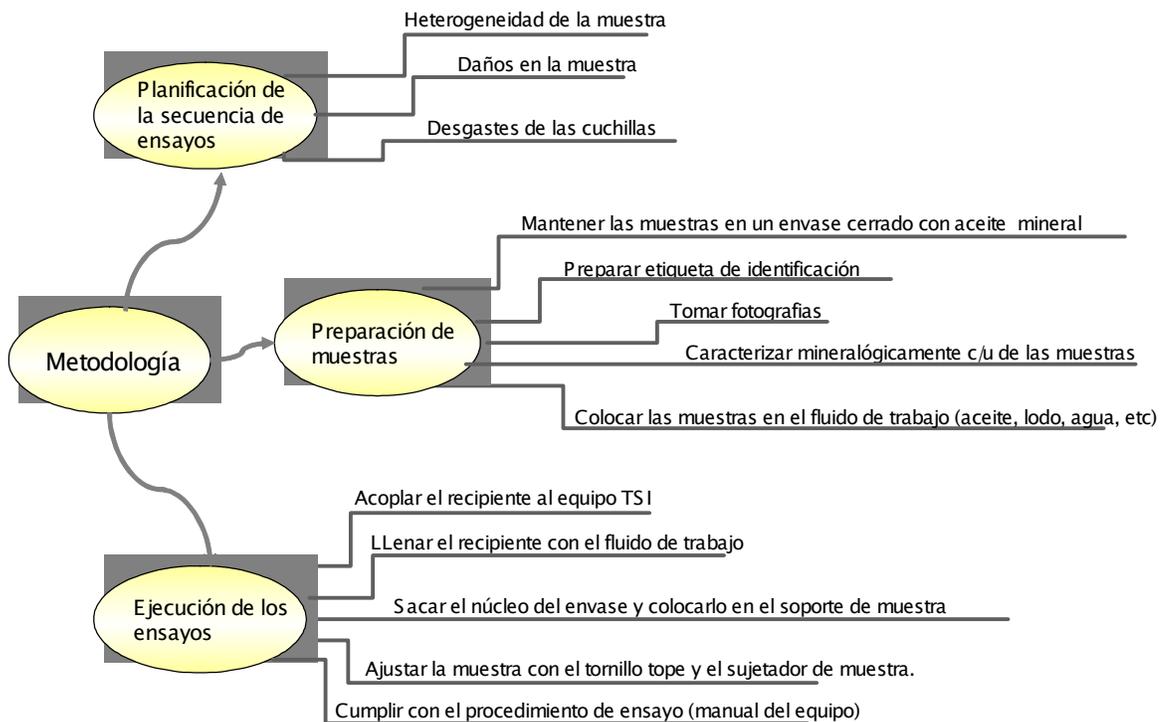


Figura 7.1 Metodología de realización de ensayos tipo scratch.

7.1.1. Planificación de la secuencia de ensayos.

Antes de comenzar a realizar un ensayo el operador debe verificar el estado de las muestras y cuchillas. A continuación se listan las características que deben ser revisadas antes de realizar un ensayo.

- Nivel de heterogeneidad de la muestra
- Daños en la muestra (producto de irregularidades en la superficie, muescas, etc.)

- Desgaste de la cuchilla

En la Tabla 7.1 se resume las características típicas a considerar antes de comenzar un ensayo.

Tabla 7.1. Características a considerar para la planificación de un ensayo.

Heterogeneidad	Daños en la muestra	Degaste de la cuchilla
-Estimar el nivel de heterogeneidad de las muestra, caracterizado principalmente por contrastes en el color, la textura (tamaño de grano, nodulos, etc.), ya que pueden implicar diferencias en la medición de la resistencia. Se requiere muestras lo más homogeneas posibles.	-Examinar la extension de la superficie dañada, en caso de que exista. Estas zonas pueden ser debidas a la penetración del fluido de perforación o por la mecha de perforación. -Identificar si la muestra presenta indicios de fracturas o separaciones de capa ya que las fracturas o las juntas debiles pueden originar desconchamiento de la muestra, especialmente si el corte se realiza perpendicular a la dirección de las fracturas o capas. Adicionalmente, cuando la cuchillas se encuentran con las zonas debiles la fuerza de corte automaticamente disminuye.	- Estimar el estado de desgaste de las cuchillas. Para ello se debe generar una base de datos que contenga información de: a) longitudes recorridas, y b) tipos de materiales ensayados

7.1.2. Preparación de las muestras de lutitas

Una de las ventajas de determinar los parámetros de resistencia a partir de ensayos del tipo scratch es la preparación de las muestras. La preparación de las muestras de lutitas para este ensayo es más sencilla en comparación a la que se requiere para los ensayos de compresión triaxial, debido a que no es necesario extraer tapones de muestras cilíndricas del núcleo, refrentar las caras de los tapones, colocar chaquetas termocongelables y colocar fibras de vidrios (Ver Berrmúdez, R. 2001).

El procedimiento de preparación de las muestras para realizar un ensayo del tipo scratch es el siguiente:

- Mantener las muestras en un envase cerrado con aceite mineral.

- Preparar etiquetas de identificación con el nombre del pozo, el tipo de muestra y la profundidad.
- Tomar fotografías, evitando tiempo de exposiciones largos (lutita y aire).
- Caracterizar mineralógicamente c/u de las muestras.
- Colocar las muestras en el fluido de trabajo (aceite, lodo, agua, etc).

7.1.3. Ejecución de los ensayos

Al igual que la preparación de la muestras, la ejecución de los ensayos del tipo scratch es sencilla en comparación a la de los ensayos de compresión triaxial. Para ejecutar un ensayo triaxial se debe realizar a condiciones no drenadas, con fibras de vidrios que permitan acelerar el proceso de retrosaturación y consolidación de la presión de poro durante la carga axial. Este procedimiento se describe en Wu, B. (1997).

El procedimiento para ejecutar los ensayos del tipo scratch en muestras de lutitas son los siguientes:

1. Acoplar el recipiente de plexiglas al equipo TSI. Previamente se remueven las bisagras sujetadoras de la base del equipo y el tornillo tope.
2. Llenar el recipiente con el fluido de trabajo (aceite, lodo, agua, etc).
3. Sacar el núcleo del envase y colocarlo en el soporte de muestra.
4. Ajustar la muestra con el tornillo tope y el sujetador de muestra.
5. Por último cumplir con el procedimiento técnico de ejecución de ensayo (manual del equipo). En el Anexo E se ilustra en forma detallada el

procedimiento de ejecución de ensayos para muestras de rocas (lutitas, bereas, areniscas, etc.) cuando se utilice el equipo TSI.

Adicionalmente se debe revisar el estado de asentamiento y la identificación de los niveles de profundidad de corte a ser aplicados durante el ensayo. En la Tabla 7.2 se resume las consecuencias que traen, tanto en el equipo como en la muestra de roca, estos factores.

Tabla 7.2. Características a considerar para la planificación de un ensayo.

Sujeción	Nivel de profundidad
<p>Sujetar apropiadamente la muestra para evitar cualquier daño o rompimiento, por caída, durante el ensayo. Sin la sujetación apropiada de la muestra se puede ocasionar daños en la celda de carga o en algún elemento del equipo. En caso de que la muestra no se sujete apropiadamente, esta puede sufrir rotación o traslación durante el ensayo.</p>	<p>Determinar, por observación, las profundidades de corte a realizar durante el ensayo a fin de evitar realizar profundidades de corte tan altas que luego traen como consecuencia daños en la muestra (astillamiento, fisuramiento) o en el el sensor de carga</p>

Durante la ejecución de los ensayos se pueden presentar ciertos riesgos que deben ser tomados en cuenta para no alterar los resultados y por ende la determinación de los parámetros de resistencia. A continuación se mencionan como se identifican estos riesgos:

- Tomar en cuenta el ruido producido por la cuchilla mientras se produce el corte del material: si hay variación, ésta puede ser producto de la ductilidad, fragilidad, abrasividad y la resistencia.
- Si hay vibraciones del banco de prueba, estos indica la presencia de un proceso de corte frágil.
- Observar las señales grabadas mientras se produce el corte, esto ayuda a identificar las zonas que tienen diferentes valores de resistencia.

- Observar la amplitudes generadas durante el corte y el comportamiento del corte (dúctil, o astillamiento). Esto permite tener una idea del rango de la profundidad de corte, que garantice un buen resultado de la energía intrínseca. Para esto se debe asegurar que el comportamiento del corte sea dúctil y que los niveles de fuerzas estén por debajo de las limitaciones de la celda de carga.

7.2. Procedimiento para la determinación de los parámetros mecánicos

En el modo de corte dúctil (asociado a flujo plástico porque el mecanismo de falla puede ser descrito como un flujo de material continuo) nos encontramos en la zona donde la fuerza de corte F^C es proporcional al área transversal. De esta forma se introducen tres parámetros; la energía intrínseca específica “ ε ”, el coeficiente de inclinación “ ζ ” y el coeficiente de fricción “ μ ” que fueron determinados en el modelo Detornay y Defourny (1992).

La energía intrínseca específica “ ε ” viene expresada como un esfuerzo (MPa), aunque puede ser expresada en J/cm^3 (lo cual es numéricamente equivalente a MPa).

El coeficiente de inclinación “ ζ ” caracteriza el ángulo de inclinación entre la fuerza de corte total y la dirección de corte. Típicamente este parámetro, para una cuchilla de diamante policristalino (PDC) con un ángulo de incidencia entre 15° - 20° , varía entre 0,5 y 0,7 para rocas suaves y medianas y entre 0,7 y 0,9 para rocas de alta resistencia.

El coeficiente de fricción “ μ ” se define como una fuerza resistente que actúa sobre un cuerpo, que impide o retarda el deslizamiento del cuerpo con respecto a otro.

Las predicciones introducidas por el modelo Detournay y Defourny (1992) resultaron de experimentos realizados en el Sandia National Laboratories (Glowka, 1987), en el Imperial College (Almenara, 1992; Almenara y Detournay, 1992; Samiselo, 1992) y en la Universidad de Minnesota (Laserre, 1994, Detournay et.al, 1995). Estos experimentos arrojaron como resultado que la energía intrínseca específica “ ε ” puede ser considerada como una medida directa de la resistencia a la compresión uniaxial “ c_{UCS} ”, el coeficiente de inclinación “ ζ ” es una característica del tipo de cuchilla y no de la roca, mientras que el parámetro de fricción “ μ ” puede ser considerado como el coeficiente de fricción interna de una roca determinado a partir de la envolvente de falla Mohr-Coulomb.

7.2.1. Determinación de la energía intrínseca específica

El método utilizado para determinar la energía intrínseca específica fue el del *coeficiente de proporcionalidad*, el cual utiliza los valores de las fuerzas de corte tangenciales (horizontales), medidas directamente en una celda de carga conectada a la *cuchilla afilada*, para determinar el valor de la energía intrínseca específica.

Inicialmente se graficaron los valores de las fuerzas horizontales y verticales a diferentes profundidades de corte, luego a cada una de ellas se le aplicó regresión lineal. Con la pendiente de recta aplicada a la componente horizontal de la fuerza se determinó el valor de la energía intrínseca específica.

A continuación se muestra la ecuación que determinó la energía intrínseca específica a partir de la pendiente de la recta obtenida de las componentes horizontales de las fuerzas:

$$\mathcal{E} = \frac{S_h}{W} \quad (\text{Ec. 7.1})$$

Donde $W = 10 \text{ mm}$ y representa el ancho de la cuchilla

S_h = Pendiente de la recta obtenida de las componentes horizontales de la fuerza de corte.

7.2.2. Determinación del coeficiente de inclinación

Utilizando el mismo método mencionado en la sección anterior, el coeficiente de inclinación se determinó graficando los valores resultantes de las fuerzas de corte vertical y horizontal. Luego con cada una de las pendientes resultantes de la regresión lineal, se determinó el valor del parámetro ζ , el cual caracteriza el ángulo de inclinación " α " entre la fuerza de corte total y la dirección de corte .

A continuación se muestra la ecuación que determina el coeficiente de inclinación:

$$\zeta = \frac{S_v}{S_h} \quad (\text{Ec. 7.2})$$

Donde S_v = Pendiente de la recta obtenida de las componentes verticales de la fuerza de corte.

S_h = Pendiente de la recta obtenida de las componentes horizontales de la fuerza de corte.

7.2.3. Determinación del ángulo de fricción

Para determinar experimentalmente el ángulo de fricción se requirió representar geoméricamente el modelo de corte de la roca mediante un diagrama denominado *diagrama E-S*, donde E es la energía específica y S es la resistencia a la

perforabilidad. En este diagrama se muestran tres elementos a) la línea de corte, b) el punto de corte, y c) la línea de fricción. La línea de corte se obtuvo de los ensayos con *cuchilla afilada*, el punto de corte, que depende del tipo de cuchilla, se obtuvo también de los ensayos con *cuchilla afilada* y la línea de fricción que representa la transformación de la respuesta de la cuchilla en 2D (E-S), se obtuvo de los ensayos con *cuchilla no afilada*

En la Figura 7.2 se puede observar la representación del diagrama E-S, el cual fue utilizado para determinar cada uno de los elementos

La energía específica y la resistencia a la perforabilidad están definidas de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$E = \frac{F_h}{wd} \quad (\text{Ec. 7.3})$$

$$S = \frac{F_v}{wd} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

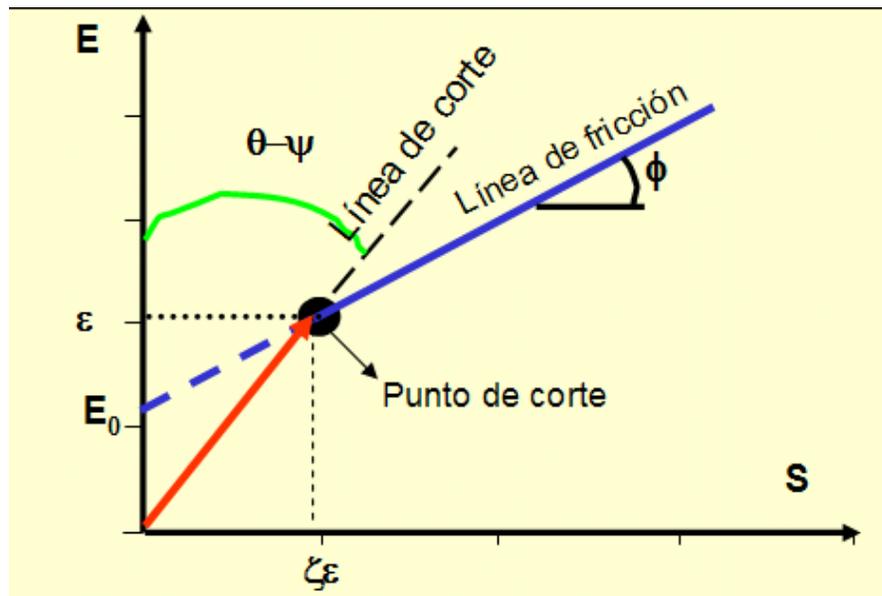


Figura 7.2. Diagrama E-S

Combinando Ec. 4.5, 4.6 y 4.9 y sumando las fuerzas que actúan sobre la cara de la cuchilla y sobre el plano de desgaste (plano horizontal) se origina la siguiente relación lineal:

$$E = E_0 + \mu S \quad (\text{Ec. 7.5})$$

Donde $E_0 =$ es una constante dada por $E_0 = (1 - \mu \zeta) \varepsilon$

7.3 Resultados de los parámetros mecánicos

Antes de realizar los ensayos se tomaron fotografías a cada una de las muestras (Ver Anexo D). Posteriormente se caracterizaron mineralógicamente c/u de las muestras (Capítulo 6). Luego se colocaron las muestras en el fluido de trabajo (aceite mineral y lodo base agua).

Para el estudio de la resistencia utilizando aceite mineral, las muestras se mantuvieron en envases plásticos cerrados con el mismo aceite (Muestras A, B y C). Para el estudio de la interacción lutita-lodo, la muestras D y E se mantuvieron dentro del fluido base agua durante 24 y 48 horas, respectivamente.

Posteriormente se sumergieron una a una las muestras con sus respectivos fluidos en el recipiente de Plexiglas para someterlas a los ensayos (Figura 7.3 y 7.4).



Figura 7.3. Muestra de lutita sumergida en aceite mineral

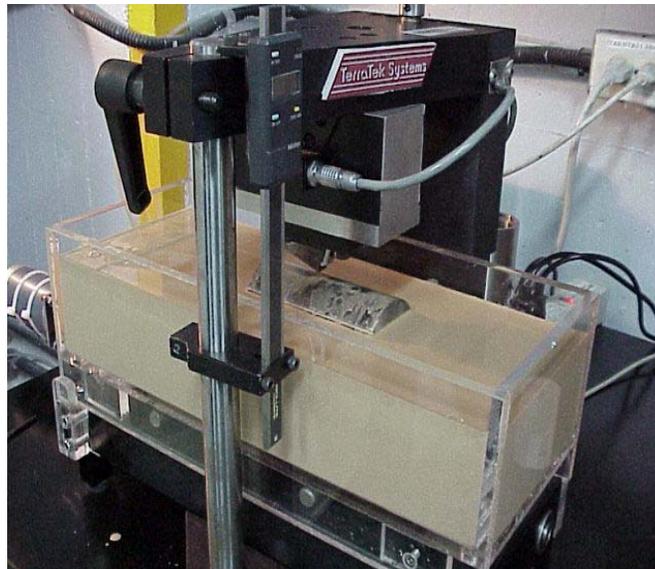


Figura 7.4. Muestra de lutita sumergida en lodo base agua.

7.3.1. Resultados aceite mineral

En la Tabla 7.3 se presentan los resultados de las fuerzas de corte obtenidas a partir de los ensayos realizados en las muestras de lutitas utilizando *cuchilla afilada*. Estos resultados son valores promedios, en el Anexo F se presentan todos los resultados puntuales.

Los resultados de corte con el equipo utilizando la *cuchilla afilada* se presentan en dos gráficas (Figura 7.5 y Figura 7.6). La primera gráfica representa el promedio de las fuerzas verticales (F_v) y la segunda gráfica representa las fuerzas horizontales (F_h), ambas en función de la profundidad de corte d .

Adicionalmente en la Figura 7.7, se ilustra el diagrama E-S para un ensayo con *cuchilla afilada*, donde se presenta la pendiente de la línea de corte, la cual es proporcional al coeficiente de inclinación entre la fuerza total y la dirección de corte.

Tabla 7.3. Profundidades de corte y fuerzas promedios obtenidas con la cuchilla afilada.

Muestra A			Muestra B			Muestra C		
d [mm]	Fuerza vertical [KN]	Fuerza horizontal [KN]	d [mm]	Fuerza vertical [KN]	Fuerza horizontal [KN]	d [mm]	Fuerza vertical [KN]	Fuerza horizontal [KN]
0,11	144,6	91,7	0,10	109,8	63,3	0,10	140,5	86,8
0,14	150,8	101,9	0,17	120,3	89,2	0,15	167,4	131,5
0,18	161,4	118,2	0,20	121,7	94,5	0,20	173,4	137,0
0,22	167,3	137,4	0,25	121,2	107,7	0,25	176,4	140,9
0,26	164,2	139,9						
0,30	171,5	154,4						
0,33	190,7	180,1						

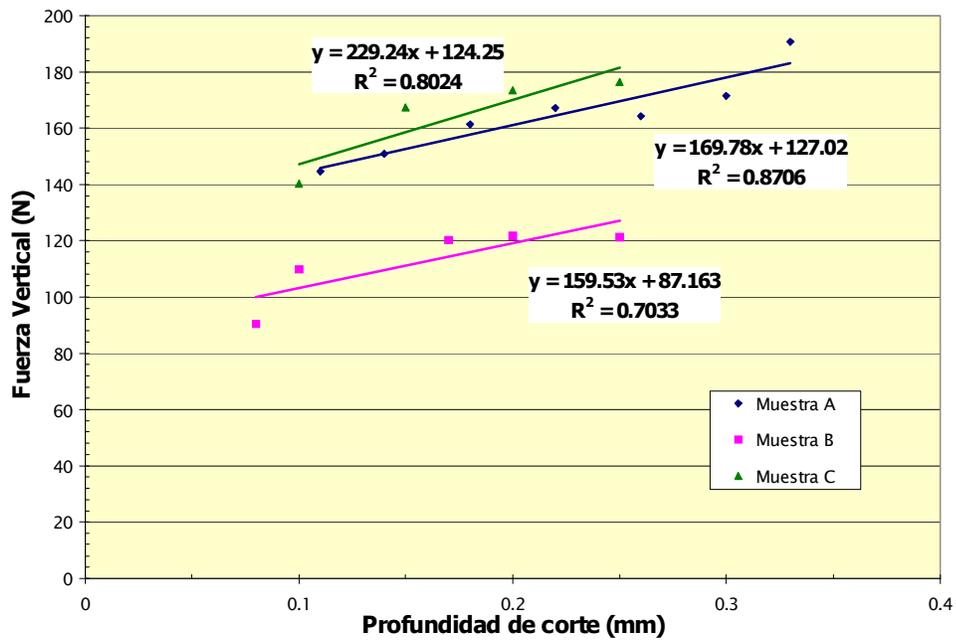


Figura 7.5. Variación de las fuerzas verticales con la profundidad de corte.

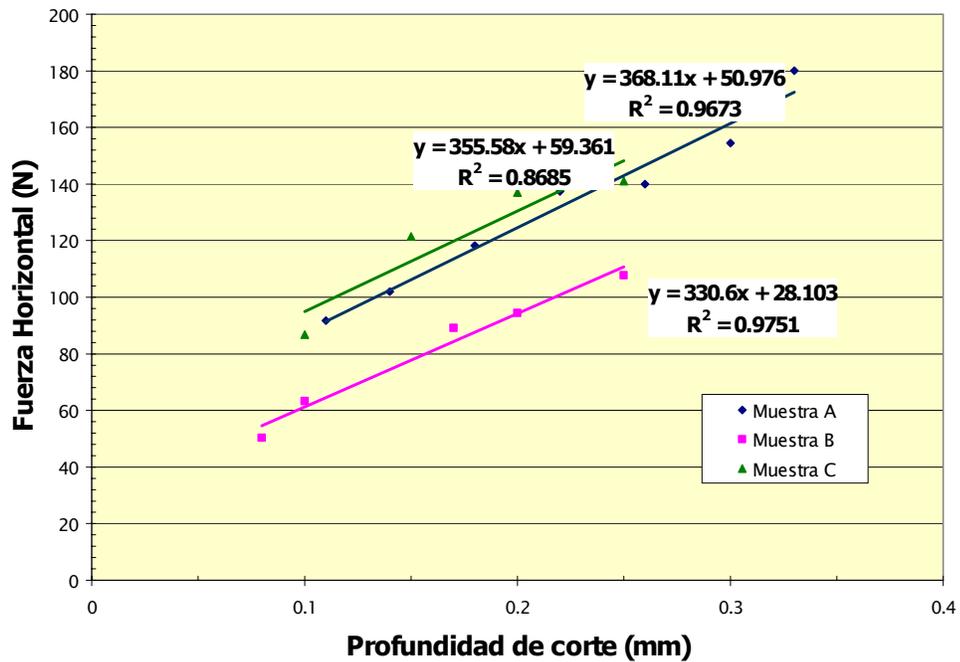


Figura 7.6. Variación de las fuerzas horizontales con la profundidad de corte.

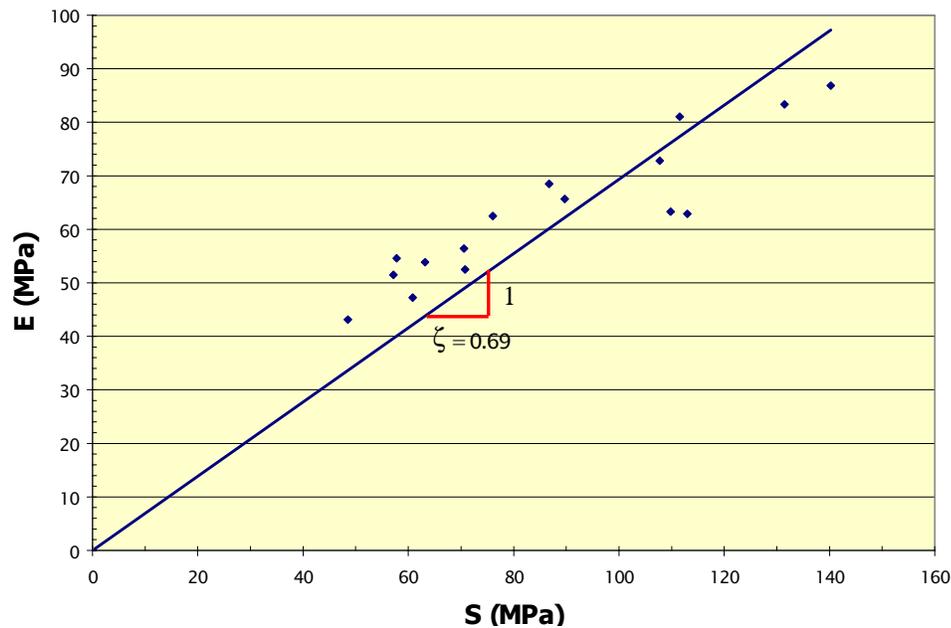


Figura 7.7. Diagrama E-S obtenido de los ensayos con cuchilla afilada.

En la Tabla 7.4, se muestran los resultados de las fuerzas de corte obtenidas a partir de los ensayos realizados en las muestras de lutitas utilizando *cuchilla no afilada*.

Tabla 7.4. Profundidades de corte y fuerzas promedio obtenidas con la cuchilla no afilada.

Muestra A			Muestra B Ranura 2			Muestra B Ranura 3			Muestra C		
D [mm]	Fuerza vertical [KN]	Fuerza horizontal [KN]	d [mm]	Fuerza vertical [KN]	Fuerza horizontal [KN]	d [mm]	Fuerza vertical [KN]	Fuerza horizontal [KN]	d [mm]	Fuerza vertical [KN]	Fuerza horizontal [KN]
0,10	524,7	242,0	0,10	462,8	209,6	0,13	381,5	169,8	0,10	359,8	172,8
0,10	617,8	274,6	0,10	543,2	245,5	0,15	489,4	219,1	0,15	539,8	277,4
0,16	695,7	320,7	0,15	606,5	256,3	0,20	596,6	286,3	0,20	619,3	332,9
0,20	754,1	360,4	0,20	542,0	250,3	0,25	550,6	274,4	0,25	660,1	388,4
0,25	768,3	386,4	0,20	543,3	238,0	0,25	494,2	252,8	0,28	652,9	415,4
0,30	771,7	394,2									

Adicionalmente en la Figura 7.8, se ilustra el diagrama E-S donde se presentan dos elementos: a) el punto de corte (*cuchilla afilada*) y b) la pendiente de la línea de fricción (*cuchilla no afilada*), la cual esta directamente relacionada al ángulo de fricción del material de roca lutítico.

7.3.2. Resultados fluido de perforación (base agua)

En la Tabla 7.5 se muestra el resultado de las fuerzas de corte con el equipo utilizando la *cuchilla afilada*, posteriormente en las Figuras 7.9 y 7.10 presentan en forma gráfica el promedio de las fuerzas verticales (F_v) y el promedio de las fuerzas horizontales (F_h), ambas en función de la profundidad de corte d .

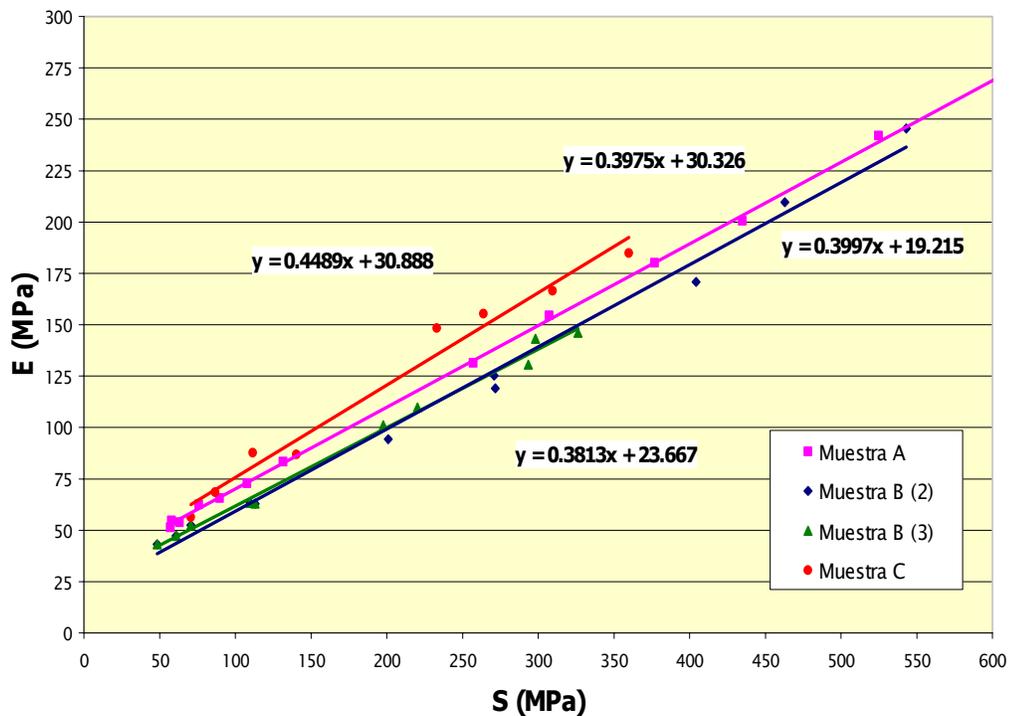


Figura 7.8. Diagrama E-S obtenido de los ensayos con cuchilla no afilada.

Por último en la Figura 7.11 se observa el diagrama E-S obtenido a partir de los resultados de fuerzas de corte para la *cuchilla afilada*.

Tabla 7.5. Profundidades de corte y fuerzas promedio obtenidas con la cuchilla afilada.

Muestra D			Muestra E		
d [mm]	Fuerza vertical [KN]	Fuerza horizontal [KN]	d [mm]	Fuerza vertical [KN]	Fuerza horizontal [KN]
0,10	90,9	52,5	0,10	95,2	54,8
0,10	97,8	67,2	0,28	126,8	106,7
0,13	98,8	70,7	0,25	136,0	110,3
0,15	98,1	64,9	0,15	92,2	59,5
0,17	105,1	74,3	0,17	120,6	85,8
0,20	111,5	73,8	0,15	118,9	82,9
0,23	117,2	92,6	0,20	117,3	89,0
0,26	123,9	109,5			

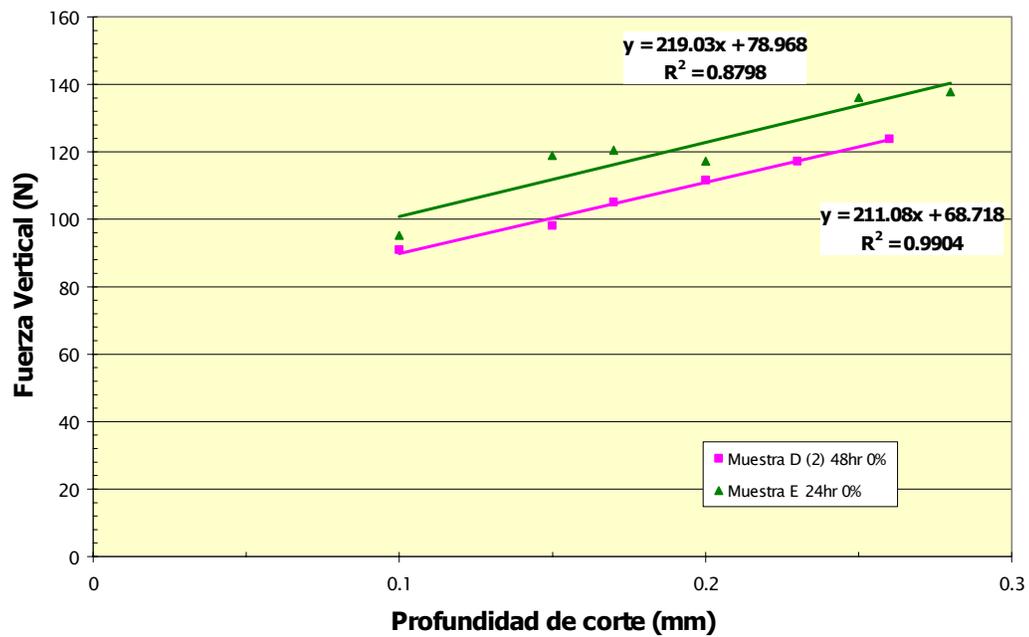


Figura 7.9. Variación de las fuerzas verticales con la profundidad de corte

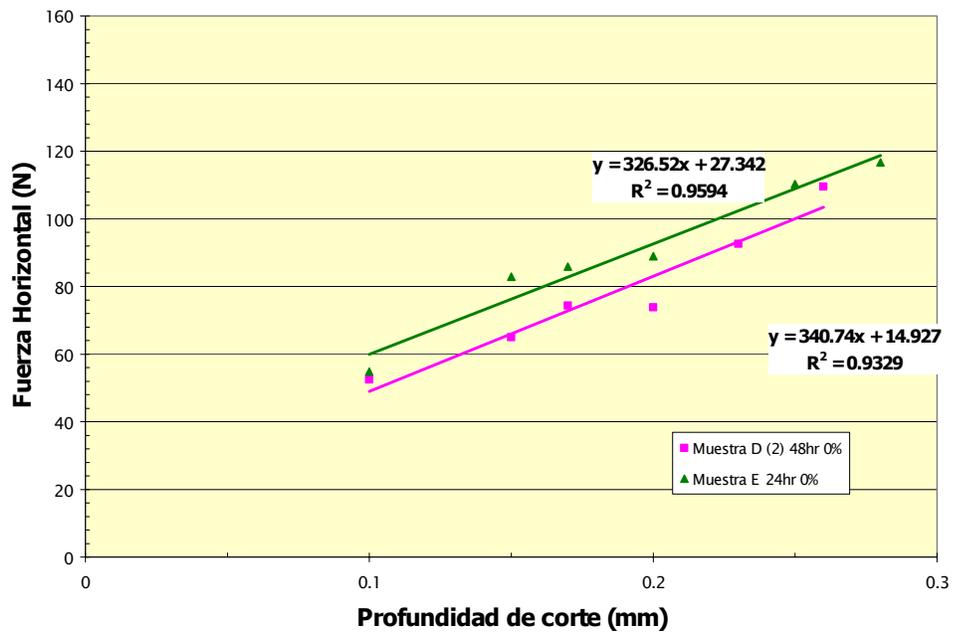


Figura 7.10. Variación de las fuerzas horizontales con la profundidad de corte

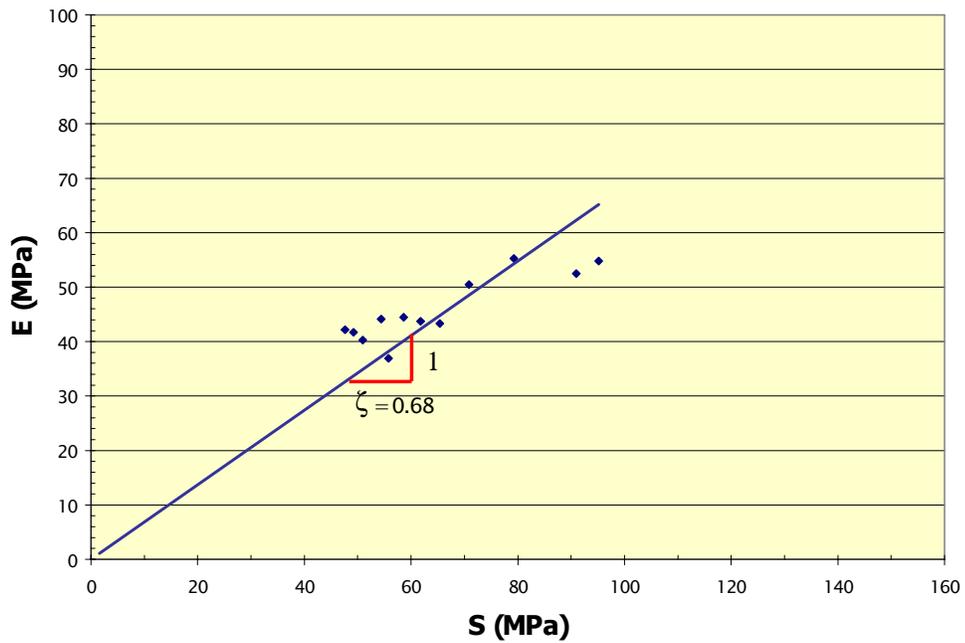


Figura 7.11. Diagrama E-S obtenido de los ensayos con *cuchilla afilada*.

En la Tabla 7.6 se muestran los resultados de las fuerzas de corte obtenidas a partir de los ensayos realizados en las muestras de lutitas utilizando *cuchilla no afilada*.

Tabla 7.6. Profundidades de corte y fuerzas promedios obtenidas con la cuchilla no afilada.

Muestra D			Muestra E		
d [mm]	Fuerza vertical [KN]	Fuerza horizontal [KN]	d [mm]	Fuerza vertical [KN]	Fuerza horizontal [KN]
0,10	526,6	214,3	0,10	634,7	233,6
0,15	583,0	278,4	0,13	569,6	179,5
0,20	571,2	288,2	0,15	619,2	279,6
0,25	534,8	278,2	0,20	648,2	290,6
0,30	528,5	261,7	0,25	613,1	303,1

Adicionalmente en la Figura 7.12 se ilustra el diagrama E-S donde se presentan dos elementos: a) el punto de corte (*cuchilla afilada*) y b) la pendiente de la línea de de fricción (*cuchilla no afilada*), la cual está directamente relacionada al ángulo de fricción del material de roca lutítico.

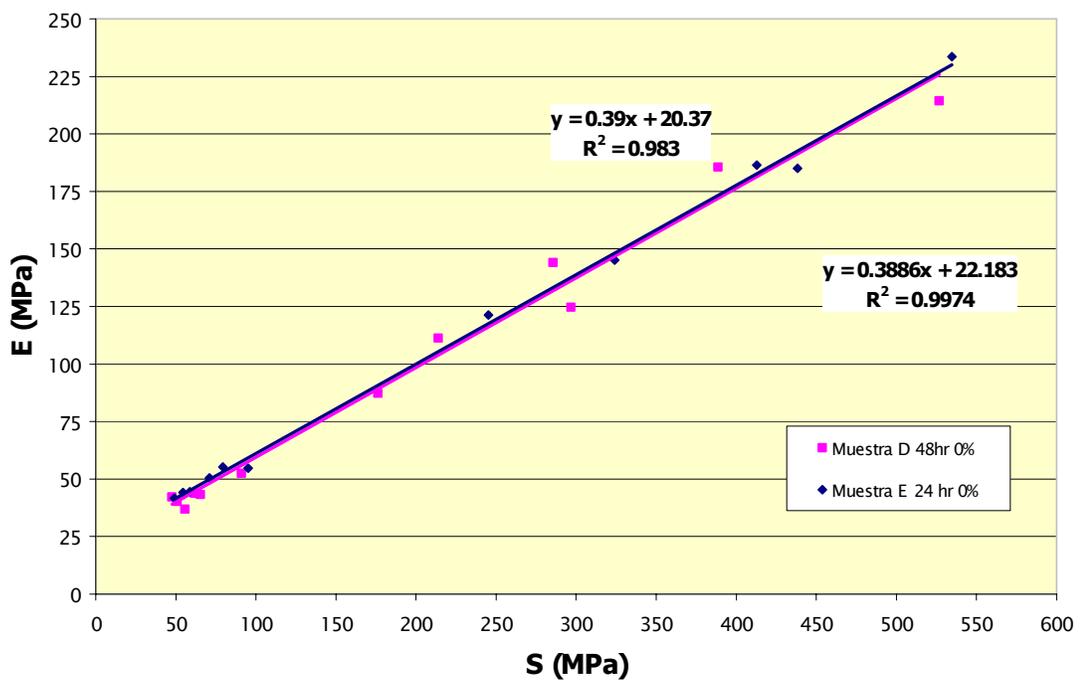


Figura 7.12. Diagrama E-S obtenido de los ensayos con cuchilla no afilada.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Figura 1

8.1 Ensayos del tipo Scratch

En la siguiente tabla, se ilustran los parámetros mecánicos obtenidos de los ensayos del tipo scratch.

Tabla 8.1. Resultados de los parámetros mecánicos.

Fluido	Muestra	Energía intrínseca específica=Resistencia mecánica $\mathcal{E} = c_{UCS}$ [MPa]	Ángulo de fricción [°]	Coficiente de inclinación [ζ]
Aceite	A	36,8	21,67°	0,69
	B1	33,0	21,73°	
	B2	-	20,87°	
	C	35,5	22,10°	
Base agua	D (48hr)	34,0	21,56°	0,68
	E (24 hr)	32,6	21,23°	

Colocando la muestra A, B y C en contacto directo con aceite mineral durante los ensayos, se obtuvieron valores de energía intrínseca específica entre 33,0 y 36,8 MPa y valores de ángulo de fricción entre 20,87° y 22,10°. Calculando un valor promedio entre cada uno de los resultados se obtuvo una energía específica de 35,1 MPa aproximadamente y un ángulo de fricción aproximado de 21,48°.

Colocando las muestras D y E en contacto directo con el fluido de perforación base agua durante 48 h y 24 hr de exposición, se obtuvieron valores de energía intrínseca específica muy cercanos a los valores obtenidos en las muestras C y B, mientras que el ángulo de fricción se mantuvo constante. Estos resultados se pueden traducir en que la interacción de este fluido de perforación con la lutita

evaluada redujo las propiedades de rigidez y de resistencia de la roca, sin embargo considerando que la variación solo fue del 5%, no se puede atribuir este pequeño cambio solamente a la interacción de la lutita con el tipo de lodo, ya que la energía intrínseca se ve también afectada por la heterogeneidad de las muestras. Para determinar esta heterogeneidad es necesario realizar más ensayos para hacer una evaluación estadística. Adicionalmente, es posible atribuir estos pequeños cambios a la presencia de caolinita (39%) en las muestras D y E ya que en la estructura de este tipo de mineral las cargas eléctricas se encuentran balanceadas, además existen muy pocas sustituciones y fuertes enlaces de hidrógeno entre las capas de la celda unitaria, lo que evita el hinchamiento de esta arcilla y por ende la disminución en gran medida de la resistencia (Theng, Mouchet, 1989).

Del análisis de la *cuchilla afilada* se determinó el coeficiente de inclinación “ ζ ”, el cual fue obtenido considerando un ángulo de inclinación de 15° . El valor promedio para ambos casos (aceite y base agua) resulto ser 0,685, lo que coincide con el coeficiente ζ obtenido por Thomas, 1998. Con este resultado las lutitas de la formación Carapita se pueden clasificar como rocas de mediana resistencia.

Otro parámetro que se determinó experimentalmente fue la profundidad de corte crítica (d_*). Cuando este valor fue mayor a 0,30 mm las muestras de lutitas utilizadas en este estudio se fracturaron una vez finalizado el ensayo de rayado (Ver figura 8.1). Esto se debe a que los planos de sedimentación de las muestras (producto del proceso de deposición) se encuentran perpendiculares al eje central del núcleo, ocasionando que estos planos, los cuales son planos de debilidad, cedan a la aplicación de fuerzas de corte en la muestra, originando la pérdida de material (Ver Bermúdez, R. 2001). Adicionalmente a una profundidad de corte de

0,33 mm el material removido durante el proceso de corte o rayado con la cuchilla PDC no era continuo (Ver Figura 8.2). Con esta profundidad se presentaron cambios en la lectura de las fuerzas de corte lo que puede ser traducido a la presencia de modo de falla frágil. Según Chaput, E. J. (1992). El modo de falla frágil se genera una vez alcanzada la profundidad crítica (d_*), sin embargo este valor no se pudo obtener matemáticamente ya que no se determinó la dureza (K_{IC}) de las lutitas de Carapita.

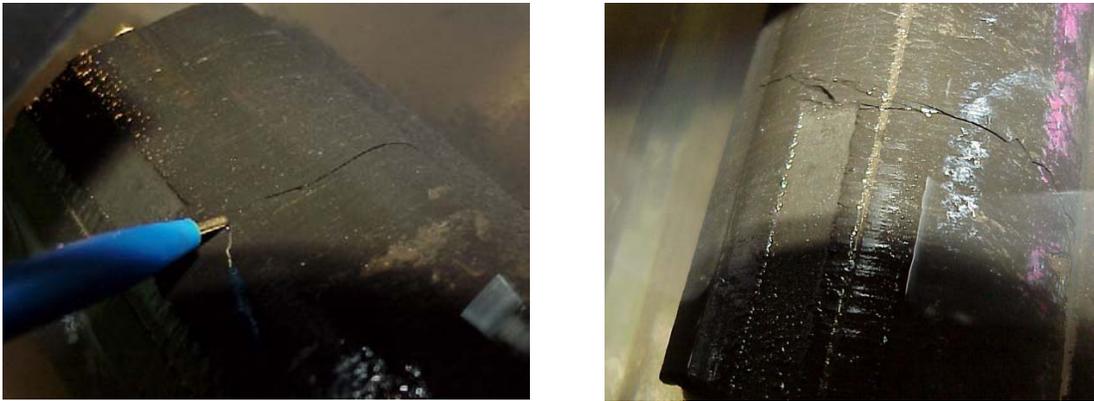


Figura 8.1. Fractura generada durante el corte a una profundidad de 0,33 mm (Muestra A)

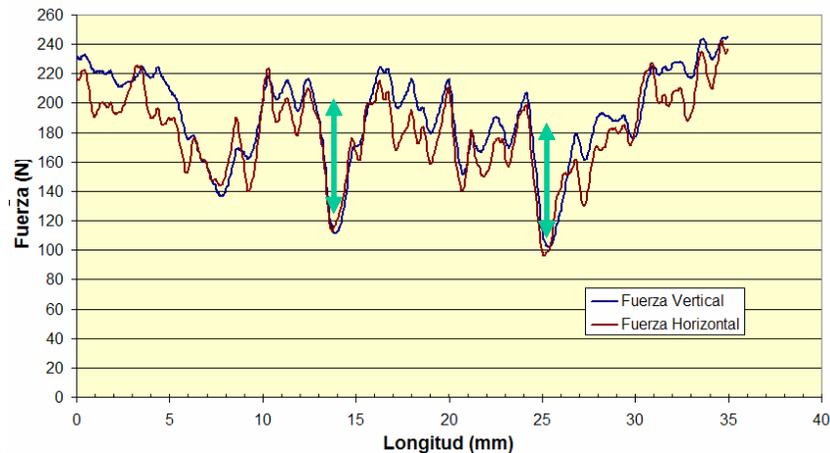


Figura 8.2. Diagrama Fuerza vs. Longitud donde muestra las variaciones de las fuerzas durante el corte a una profundidad de 0,33 mm (Muestra A)

8.2. Correlación de resultados

Los resultados obtenidos de los ensayos de carga axial se correlacionaron con los obtenidos de los ensayos del tipo scratch. Tal como se muestra en la Tabla 8.2, la comparación entre la resistencia a la compresión sin confinar “ c_{UCS} ” obtenida del sistema MTS y la energía intrínseca específica “ ε ” obtenida del sistema TSI arroja como resultado una variación de 16% aproximadamente. Con estas correlaciones se aprecia la gran similitud existente entre la resistencia mecánica obtenida de ensayos de compresión uniaxial y los ensayos del tipo Scratch.

En las muestras caracterizadas con el equipo MTS el valor de la resistencia a la compresión (c_{UCS}) generó un valor promedio de 39,5 MPa mientras que la energía intrínseca específica (ε) se encuentra entre 33,0 y 36,8 MPa, lo cual representa una variación entre 16% y 7% aproximadamente.

Tabla 8.2. Resultados del TSI con la cuchilla afilada.

Muestra	Profundidad (pies)	% Arcilla				Resistencia σ_{UCS} equipo MTS [MPa]	Energía intrínseca equipo TSI, [MPa]
		Caolinita	Cao+Clo	Ilita	Clorita		
31-A1	19295'	96		4		39,2	
31-A1	19295'	96		4		39,7	
A	19310'	68		32			36,8
B	19311'			44	56		33,0
C	19328'		48	52			35,5

Figura 2

En la Tabla 8.3a y 8.3b se muestran los resultados del ángulo de fricción obtenido de los ensayos de corte con el equipo TSI y el valor obtenido de la envolvente de falla Morh-Coulomb proveniente del análisis de dos ensayos de compresión triaxial no drenados, realizados con aceite mineral como fluido inhibitorio de lutita.

Tabla 8.3a. Resultados del TSI con la cuchilla no afilada.

Muestra	% Arcilla				Ángulo de fricción Equipo TSI (promedio)
	Caolinita	Caol+Clo	Ilita	Clorita	
A	68		32		21,67°
B1			44	56	21,73°
B2		48	52		20,87°
C	68		32		22,10°

Tabla 8.3b. Resultados de ensayos de compresión triaxial.

Muestra	Ángulo de fricción Equipo de Compresión Triaxial (promedio)
Pierre II (Wu, 1997)	14,00°
Merecure (Rodríguez, 2000)	22,14°

Los resultados de resistencia a compresión sin confinar “ c_{UCS} ” obtenido del equipo MTS se correlacionaron con los resultados de energía intrínseca específica “ ε ” con cuchilla no afilada utilizando el equipo TSI.

El ángulo de fricción obtenidos de las muestras de Merecure se asemejan mucho a los obtenidos del corte con cuchilla con chaflán; sin embargo, el coeficiente de fricción obtenido en las muestras Pierre II no muestran una aceptable correlación. Es posible que la heterogeneidad presentada en estas muestras de yacimiento sea la causal del bajo nivel de correlación entre los ángulos de fricción. En todo caso, se requiere profundizar en estos ensayos y aumentar el número de ellos como para validar el equipo TSI en la estimación del ángulo de fricción en rocas consolidadas de yacimiento.

CONCLUSIONES

- El desarrollo de la metodología para la realización de ensayos del tipo scratch en muestras de lutitas, le da a la empresa la capacidad de desarrollar relaciones constitutivas realistas que permitan hacer diagnósticos apropiados para resolver o reducir los problemas durante la perforación.
- Con la adaptación del sistema TSI se ejecutaron los ensayos del tipo scratch en muestras de lutitas, constituyendo el primer grupo de muestras caracterizadas en el laboratorio de la empresa.
- Por limitaciones de carácter externo, solo fue posible colocar dos (2) muestras de lutitas en contacto directo con el fluido seleccionado.
- De igual manera se observó que las muestras de lutitas sometidas a la presencia de un fluido de perforación base agua, arrojaron valores de energía intrínseca muy cercanos a los valores de resistencia obtenidos en las muestras sometidas a la presencia de aceite mineral, mientras que el ángulo de fricción se mantuvo constante.
- Se obtuvieron dos (2) parámetros mecánicos (energía intrínseca específica " $\varepsilon = c_{UCS}$ " y ángulo de fricción " ϕ ").
- El valor promedio de energía intrínseca específica estimada de los ensayos tipo scratch, utilizando aceite mineral, resulto ser muy parecido (16%) a los resultados obtenidos de los ensayos de compresión triaxial.
- Las muestras de lutitas sometidas a la presencia del fluido base agua, arrojaron valores de energía intrínseca muy cercanos (5%) a los valores de energía intrínseca

específica obtenidas en las muestras sometidas a la presencia de aceite mineral, mientras que el ángulo de fricción se mantuvo constante.

- No fue posible encontrar una correlación empírica entre los datos obtenidos mediante el sistema TSI y los datos obtenidos mediante ensayos de compresión triaxial. Sin embargo por el comportamiento observado en arenas es posible que en lutitas se obtengan resultados muy parecidos.

- Para profundidades de corte cercanos a 0,3 mm las lutitas de Carapita generan fracturas, traduciéndose en pérdida de material (no reutilizable).

RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir la metodología de ensayo planteada en este estudio para trabajos posteriores que incluyan muestras de lutitas preservadas, para garantizar la obtención de resultados confiables.
- Realizar ensayos en lutitas con composiciones muy similares a las estudiadas en este trabajo utilizando el fluido base agua (polimérico) a tiempos de exposición mayores a 48 hr para constatar que cumplió con sus funciones inhibitorias.
- Estudiar la absorción de los componentes poliméricos en las muestras de lutitas por difracción de rayos X (XRD) y espectropía infrarroja (IR), para determinar el intercambio catiónico de los componentes minerales de las muestras una vez sometidas al contacto de fluidos de perforación base agua.
- Se recomienda determinar la dureza del material antes de realizar los ensayos del tipo scratch para obtener el valor teórico de la profundidad crítica (transición entre corte dúctil y frágil) y compararlo con el valor experimental obtenido en este trabajo.

Referencias

- [1] Adachi José, Detournay E., Drescher A. *Determination of Rock Strength Parameters from Cutting Tests*. Rock Mechanics Tools and Techniques, Proc. Off The 2nd North American Rock Mechanics Symposium. NARMS, 1996. Montreal.
- [2] Almenara J. and Detournay E. *Cutting Experiments in Sandstones With Blunt PDC Cutters*. Proc. EuRock'92., 1992. London.
- [3] Aston, M.S. y Elliot, G.P. *Water Based Glicol Drilling Muds: Shale Inhibition Mechanisms*. Octubre, 1994.
- [4] Avallone Eugene, Baumeister III, Theodore. *Manual Del Ingeniero Mecánico*. Tomo I y II. 9NA Edición, Mc. Graw Hill.1999.
- [5] Avner, Sydney H., *Introducción A La Metalurgia Física*. Mc. Graw-Hill. Segunda Edición. 1991.
- [6] Baker Huges INTEQ. *Fluid Facts*. Engineering Handbook. Marzo, 1998. Houston Texas.
- [7] Bermúdez, F. Raúl, *Desarrollo De Una Metodología Para La Preparación De Muestras De Lutitas De La Formación Carapita Para Ensayos De Resistencia En El Sistema MTS Y Análisis De La Influencia De Lodos De Perforación En La Resistencia Mecánica De Estas Rocas*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico, UNEFA, Pto Cabello. Abril, 2001.
- [8] Chaput E. J., *Observations and Analysis of Hard Rocks Cutting Failure Mechanisms Using PDC Cutters*, project at Imperial College, London. Report Published by EIF-Aquitaine, France, D. Fourmaintraux Ed.,1992.
- [9] Chenevert, M.E. *Shale Alteration By Water Absorption*. 1970.

- [10] Da Fontoura, S. *Joint Industry Project on Drilling Through Shales*. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Department of Civil Engineering. Rio de Janeiro, Brasil. September 8-9, 1999.
- [11] Detournay, E. and Defourny, A. *Phenomenological Model Of Drilling Action Of Drag Bits*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 29 (1):13-23, 1992.
- [12] Dowell Drilling Fluids Services. *Drilling Fluids Technical Manual. Part 1. Chapter 3. Clay Chemistry*. Dowell, 1994. 33-57. 292 p.
- [13] Durand, C.; Forsans, T. et al. *Influence Of Clays On Borehole Stability. Part One. Occurrence Of Drilling Problems Physics-Chemical Description Of Clays And Of Their Interaction With Fluids*. 1995.
- [14] Durand, C.; Forsans, T. et al. *Influence Of Clays On Borehole Stability. Part Two. Mechanical Description And Modeling Clays And Shales Drilling Practices Versus Laboratory Simulations*. 1995.
- [15] Durvan, S. A. *Gran Enciclopedia Del Mundo*. Octava edición. Tomo 13.
- [16] Fjaer E. Holt R. Horsrud P. Rauen A. Risnes R. *Petroleum related Rock Mechanics*. Elsevier Science Publishers. Amsterdam, 1992.
- [17] Gazanoil, D.; Forsans, T.; Boisson, M. J. F.; Piau, J-M. Wellbore Failure Mechanisms in Shales: Prediction and Prevention. JPT, 47(7): 589-595. 1995
- [18] Geertsma, J. *Some Rock Mechanical Aspects Of Oil and Gas Well Completions. SPEJ 25, p. 848-856*. 1985.
- [19] LAL, M. SPE 54356: *Shale Stability: Drilling Fluid Interaction and Shale Strength*. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, SPE (Ed.). Caracas, Venezuela; 1-10. April 21-23, 1999.
- [20] Mondshine, T.C. and Kercheville, J.C. *Successful Gumbo-Shale Drilling*. Oil and Gas. 1966.

- [21] Nawrocky P; Duseault M. *Extracting Constitutive Behavior Laws From Triaxial Test Programs In Shale*. The Geotechnics of Hard-soild-soft rock, Evangelista & Picarelli (eds) 1998 Balkema, Rotterdam, pp 725-737
- [22] Rengifo, R. *Estudio Experimental Del Efecto De La Interacción Fluido De Perforación-Roca Sobre La Estabilidad Mecánica En Formaciones De Lutitas*. Trabajo de grado para optar al título de Magister Scientiarum en Ingeniería de Perforación, Universidad del Zulia, Maracaibo.1999.
- [23] Ryen Caenn, George V. Chillingar, *Drilling Fluids: State Of The Art*. Petroleum Science & Engineering, 1996.
- [24] Sánchez, E. y Gabay, R., *Estado Del Arte-Estabilidad De Lutitas*. Documento Técnico N° INT-6261. PDVSA -Intevep. Los Teques, Diciembre 1999.
- [25] Schei, G. ; Fjaer, E. ; Detournay, et al. *The Scratch Test: An Attractive Techniques For Determining Strength And Elastics Properties Of Sedimentary Rocks*. 2000.
- [26] Shigley, J. E. y Mischke, C. R. *Diseño En Ingeniería Mecánica*. Quinta Edición. Mc. Graw Hill. Mexico, 1990.
- [27] Sperry, Bill. Properties of Common Materials Volume 5, Number 10. Journal of the Home Metal Shop Club of Houston. October 2000.
- [28] Steiger R., Leung P. *Consolidated Undrained Triaxial Test Procedure for Shales*. Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science. Roegiers (ed). Balkema, Rotterdam, 1991.
- [29] Suárez, R. R., Stenebraten J., Dagrain F. *Evaluation Of Shale-Drilling Fluid Compatibility Via Scratch Testing*. SPE/ISRM 78161. 2002.
- [30] Terratek. *Strength Index System Operations Manual*. Salt Lake Utah. July, 2001.
- [31] Thomas Richard, Detournay E., Drescher A. et al. *The Scratch Test As A Means To Measure Strength Of Sedimentary Rocks*. Paper SPE/ISRM

47196 presented at the SPE/ISRM Eurock'1998 held in Trondheim, Norway, 8-10 July 1998.

- [32] Theng B. K. G. *Formation And Properties of Clay-polimer Complexes*. Developments in Soils Science.3-31. 1979.
- [33] Universidad Pedagógica Experimental Libertador. *Manual de Trabajos De Grado De Especialización y Maestría Y Tesis Doctorales*. Caracas. Febrero, 2001.
- [34] Walker, C.O. *A Drilling Fluid for Shale Control*. Drilling DCW. April, 1979.
- [35] Wu, B. Tan, C. y Aoki T. *Specially Designed Techniques for Conducting Consolidates Undrained Triaxial Test on Low Permeability Shales*. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 34:3-4 paper N° 336, 1997.
- [36] Zamora, M y Stephens, M. *Drilling Fluids*. Petroleum Well Construction, Capítulo 5. John Wiley & Sons. Inglaterra 1998.

GLOSARIO

Dureza: es la resistencia que un cuerpo opone al dejarse penetrar por otro, debido a la cohesión de sus partículas. No es una propiedad fundamental de un material, sino que esta relacionada con las propiedades elásticas y plásticas. El valor de dureza obtenido en una prueba determinada sirve solo como comparación entre materiales o tratamientos.

Embolamiento de la mecha: es un problema que ocurre cuando los recortes arcillosos se adhieren a la mecha de perforación.

Mineralogía: Es una parte de la geología que trata de los minerales, su composición química, clasificación, propiedades y aplicaciones. La mayor parte de las rocas no están constituidas por un mineral aislado, sino que son mezclas heterogéneas de minerales diversos.

Núcleos geológicos: Están compuestos por un sistema multifásico de partículas minerales que crean una estructura porosa donde residen fluidos (agua, hidrocarburos y gas). Los núcleos geológicos permiten obtener información del yacimiento que no es posible adquirir de cualquier otra manera. En el campo experimental los núcleos se utilizan como pieza central para obtener información del comportamiento mecánico de los materiales rocosos.

Poliméros: Los polímeros son moléculas orgánicas gigantes, que tienen pesos moleculares de 10,000 a 1,000,000 g/g x mol. La mayoría de los materiales poliméricos están formados por varias cadenas de moléculas orgánicas o redes. Algunos de estos materiales son buenos aislantes de ahí su aplicación en

aislamiento eléctrico. En general los materiales poliméricos tienen bajas densidades y temperaturas de fluencia (ablandamiento) o descomposición relativamente bajas.

Algunos polímeros (los termoplásticos) presentan excelente ductilidad, conformabilidad y resistencia al impacto, mientras otros (los termoestables) tienen las propiedades opuestas. Los polímeros son ligeros y con frecuencia cuentan con excelente resistencia a la corrosión.

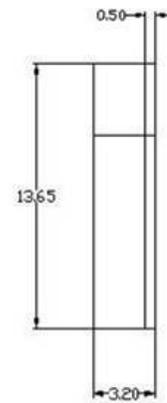
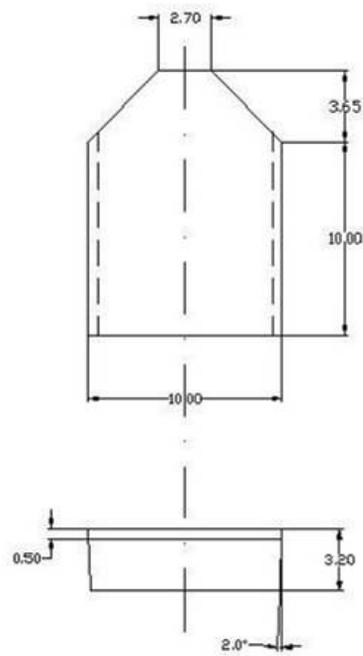
Punto de nube: es la temperatura a la cual el poliglicol sale de la fase acuosa, formando gotas dispersas. La existencia y el valor del punto de nube dependen del peso molecular del poliglicol, de su estructura química, de su concentración en el fluido de perforación y de la presencia de sales.

Reología: La reología es una de las ramas de la ciencia que trata sobre la deformación en todos sus aspectos, desde la formación de fracturas (deformación no continua) hasta el flujo de materiales viscosos (deformación continua).

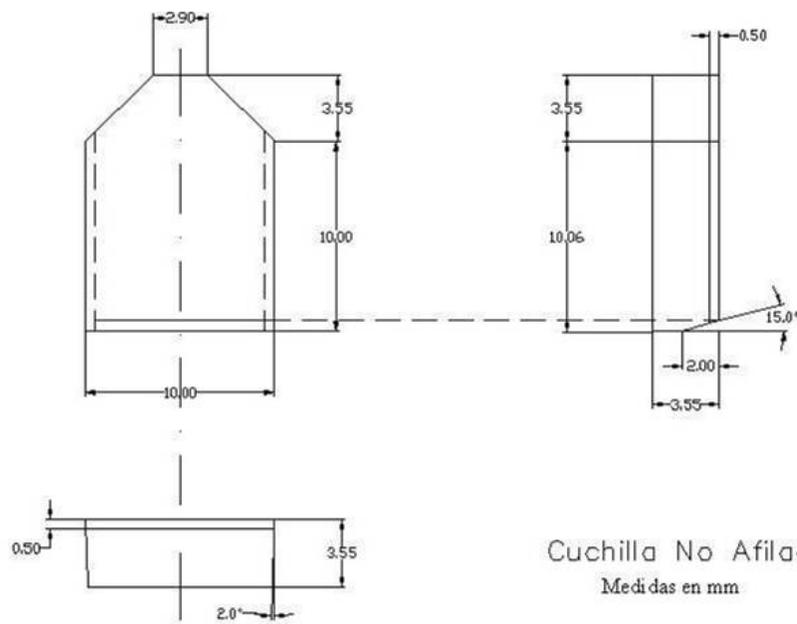
Anexos

Anexo A

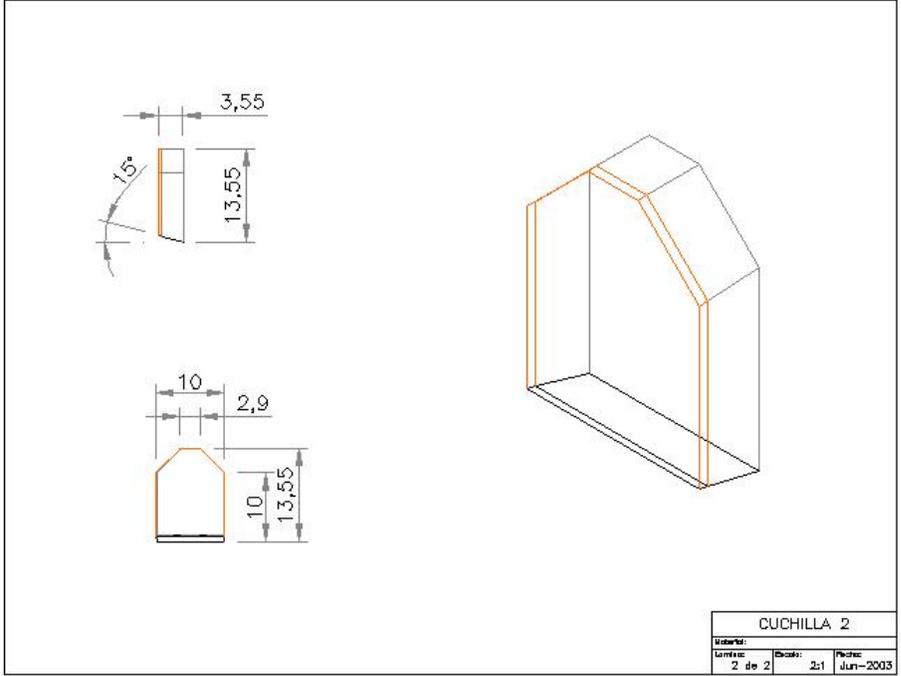
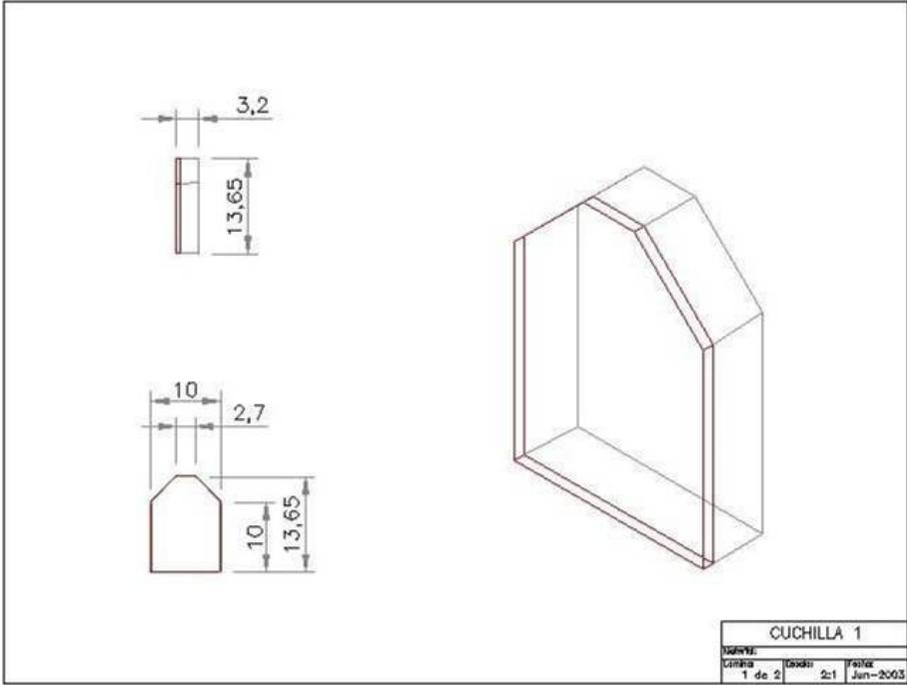
Características de las cuchillas



Cuchilla Afilada
Medidas en mm

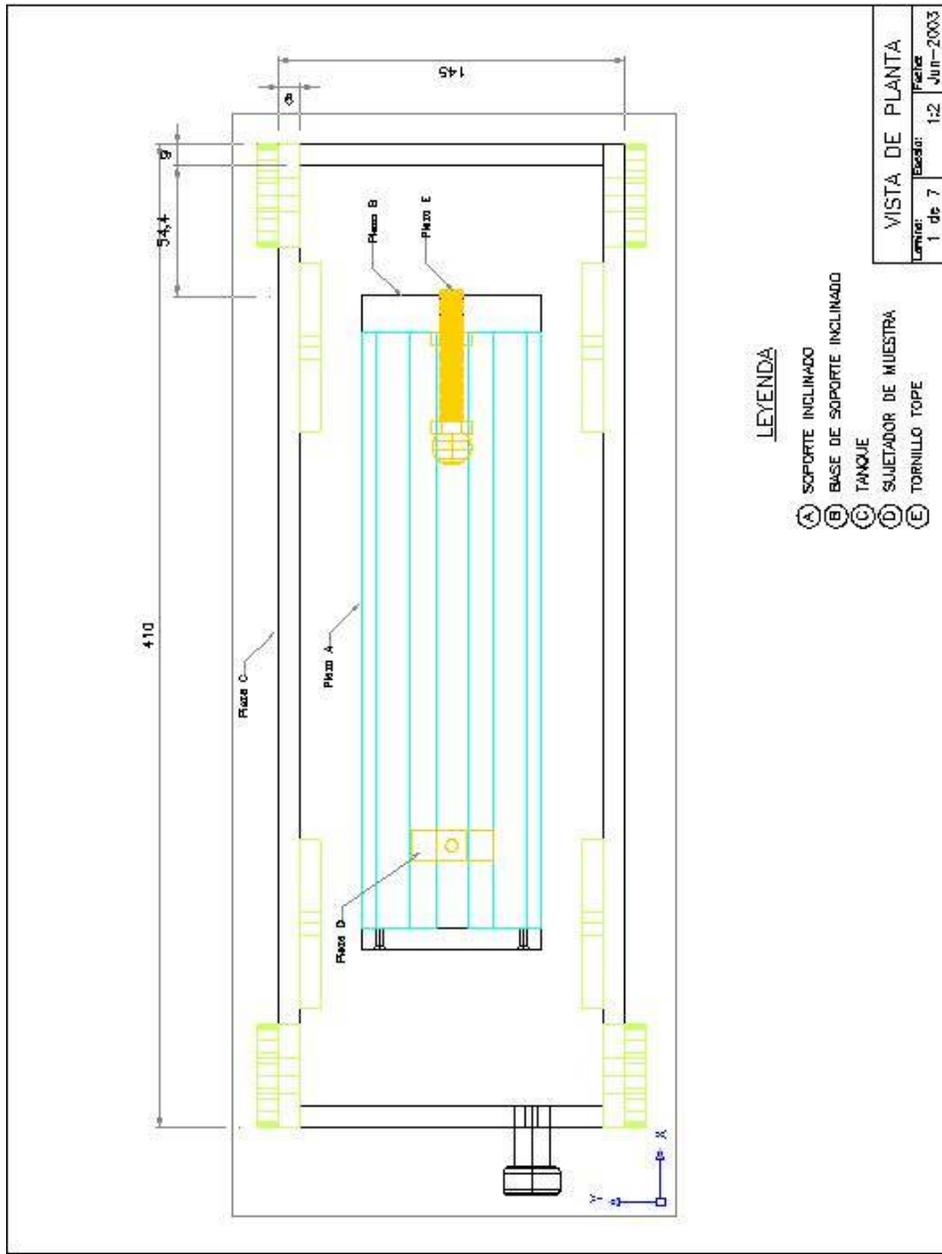


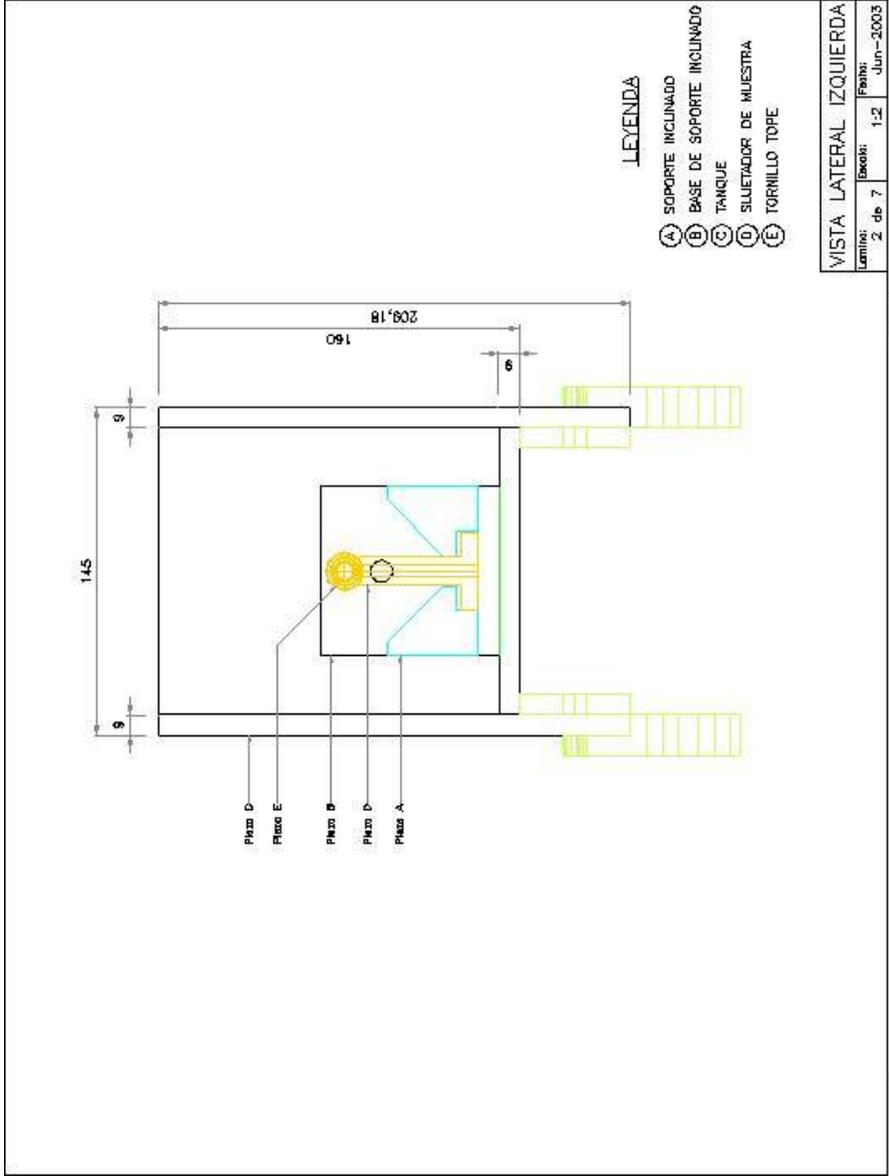
Cuchilla No Afilada
Medidas en mm

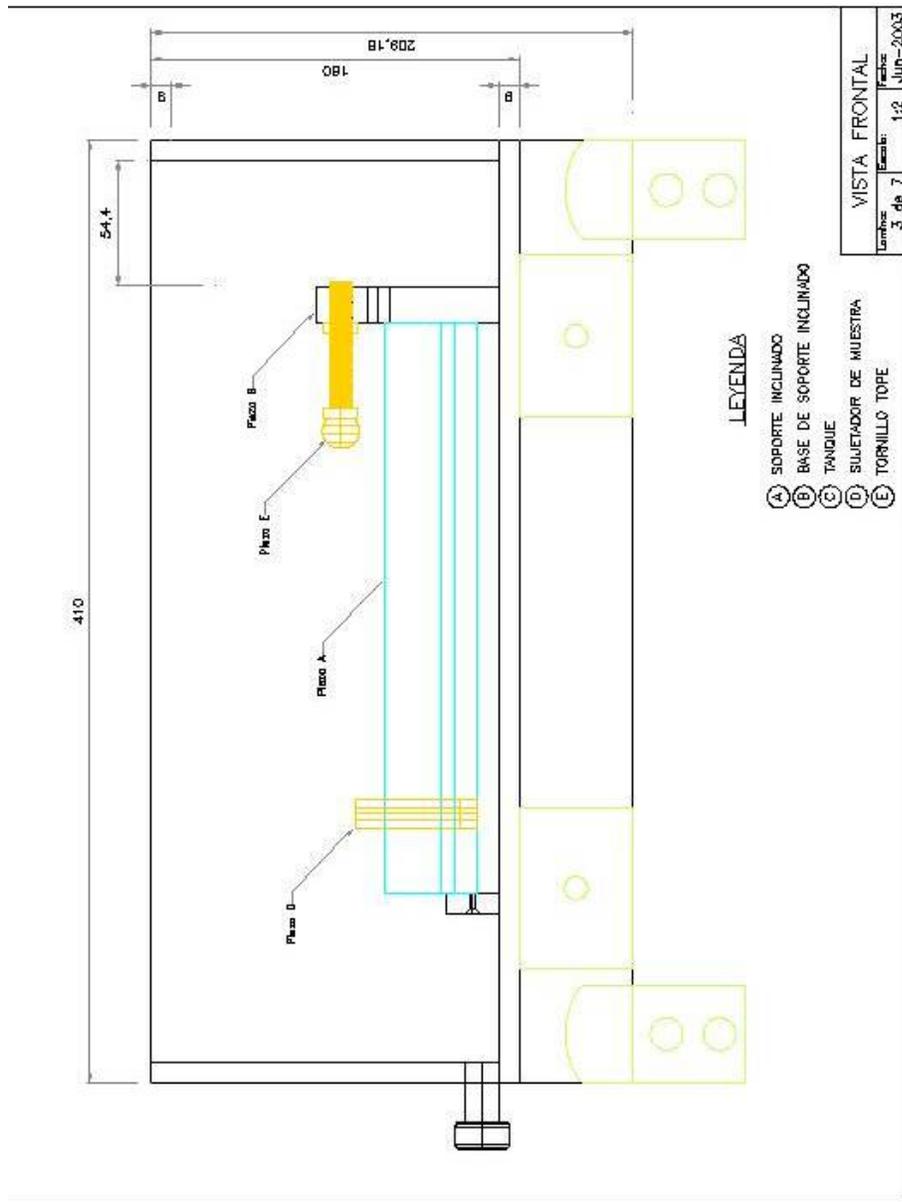


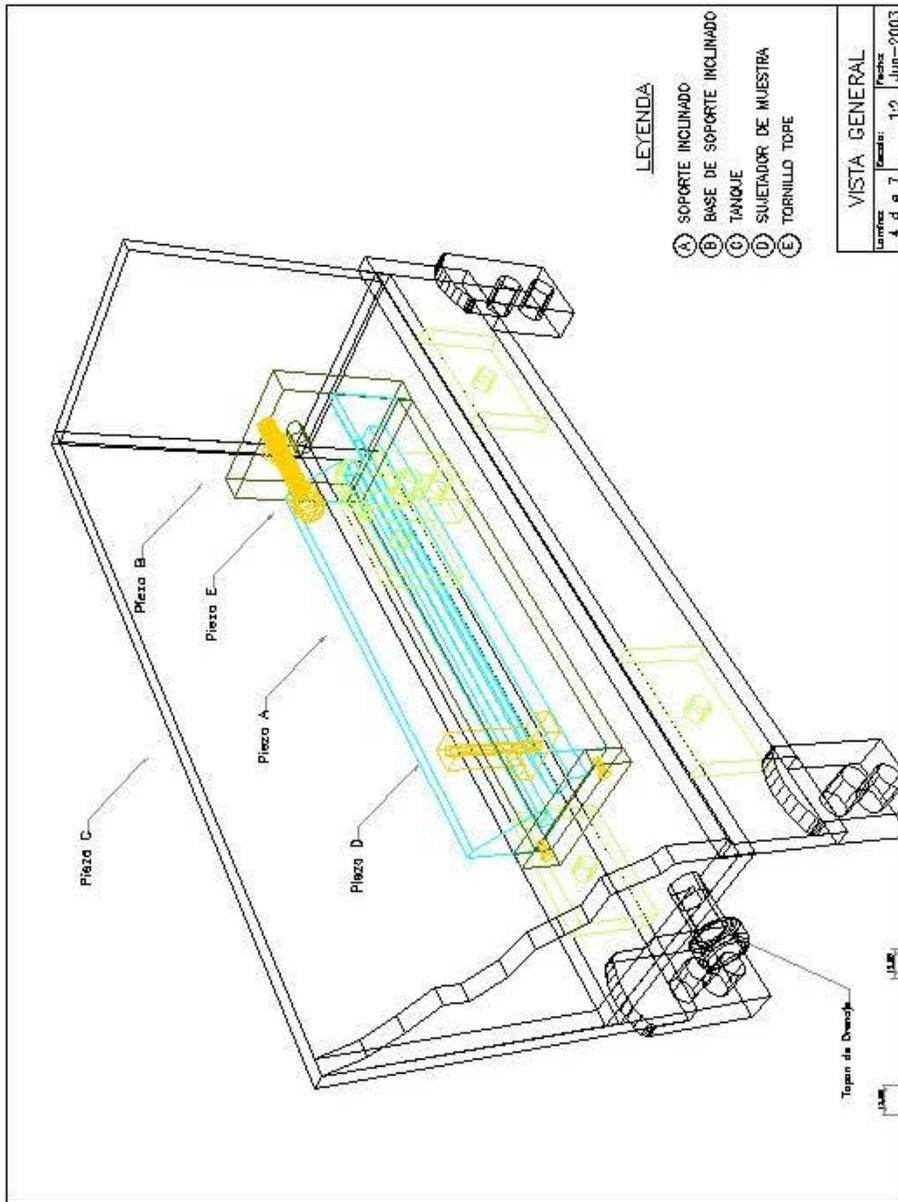
Anexo B

Recipiente diseñado (piezas)

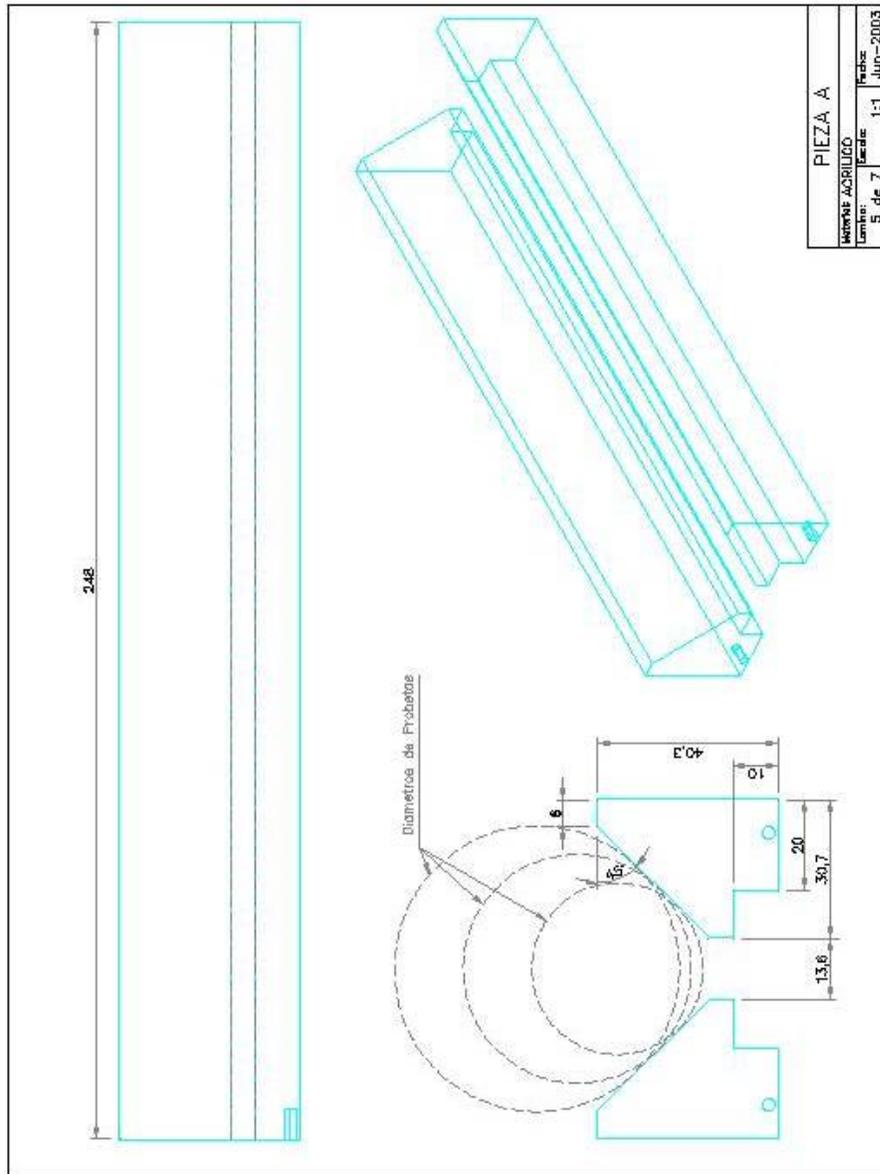


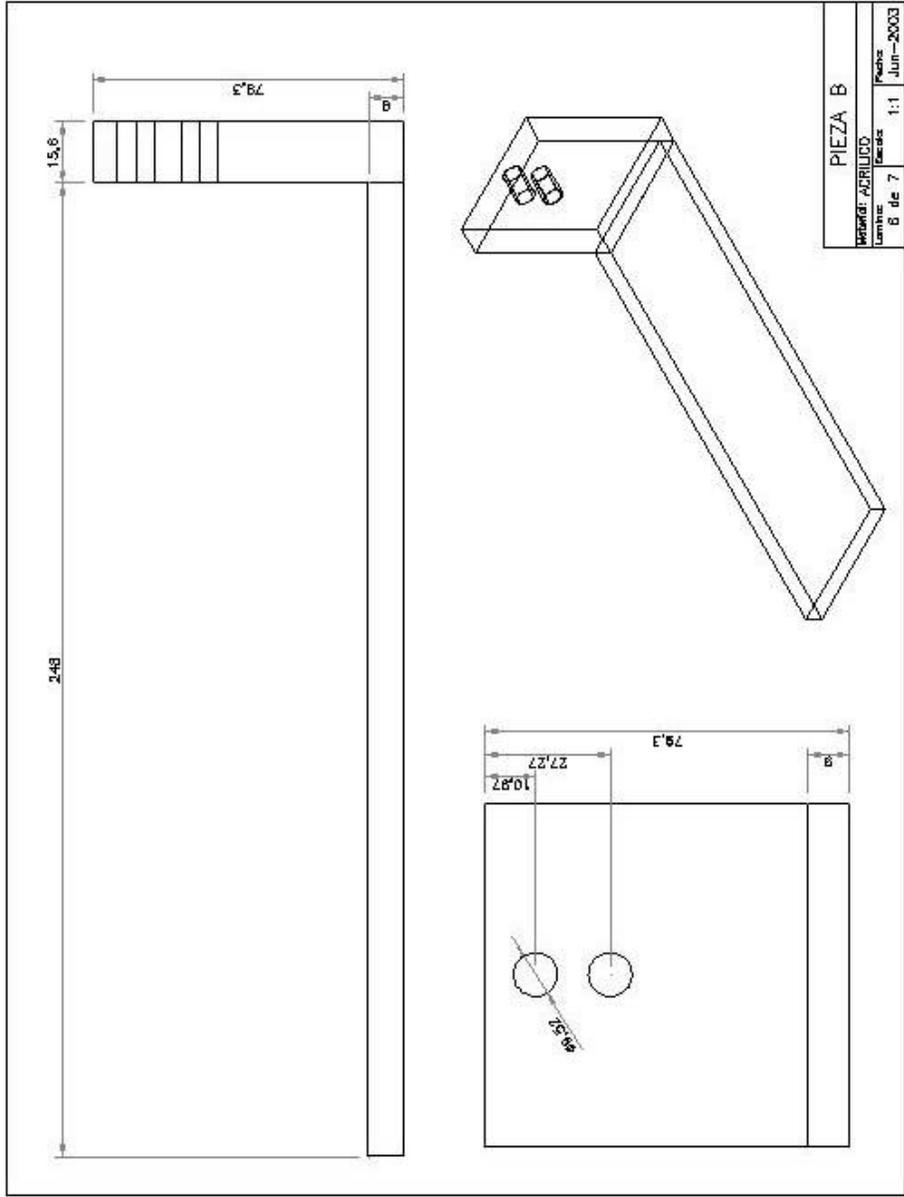


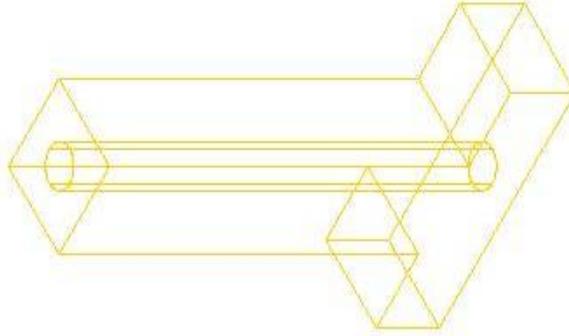
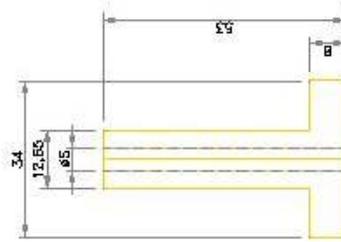
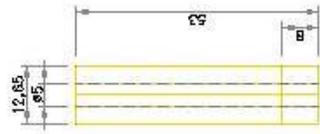




VISTA GENERAL	
Uniflex	Fecha: Jun-2003
4 d e 7	Escala: 1:2







PIEZA D		
Alumno:	ACRILICO	Fecha:
Labor:	7 de 7	1:1 Jun-2003

Anexo C

Análisis de sensibilidad

Análisis de Sensibilidad

Radio de la muestra (mm)	Angulo de Inclinación	Coefficiente de Fricción	Fvc' (N)	FB (N)	FA (N)	X (mm)
19.05	30	0.1	100	67.1	47.3	1.5
19.05	30	0.2	100	74.7	36.3	3.1
19.05	30	0.3	100	80.5	25.4	4.8
19.05	30	0.4	100	84.3	15.3	6.5
19.05	30	0.5	100	86.2	6.2	8.2
25.4	30	0.1	100	67.1	47.3	2.0
25.4	30	0.2	100	74.7	36.3	4.2
25.4	30	0.3	100	80.5	25.4	6.4
25.4	30	0.4	100	84.3	15.3	8.7
25.4	30	0.5	100	86.2	6.2	11.0
31.75	30	0.1	100	67.1	47.3	2.5
31.75	30	0.2	100	74.7	36.3	5.2
31.75	30	0.3	100	80.5	25.4	8.0
31.75	30	0.4	100	84.3	15.3	10.9
31.75	30	0.5	100	86.2	6.2	13.7
19.05	45	0.1	100	77.0	63.0	2.3
19.05	45	0.2	100	81.6	54.4	4.6
19.05	45	0.3	100	84.3	45.4	6.9
19.05	45	0.4	100	85.3	36.6	9.2
19.05	45	0.5	100	84.9	28.3	11.4
25.4	45	0.1	100	77.0	63.0	3.0
25.4	45	0.2	100	81.6	54.4	6.1
25.4	45	0.3	100	84.3	45.4	9.3
25.4	45	0.4	100	85.3	36.6	12.3
25.4	45	0.5	100	84.9	28.3	15.1
31.75	45	0.1	100	77.0	63.0	3.8
31.75	45	0.2	100	81.6	54.4	7.7
31.75	45	0.3	100	84.3	45.4	11.6
31.75	45	0.4	100	85.3	36.6	15.4
31.75	45	0.5	100	84.9	28.3	18.9
19.05	60	0.1	100	104.7	93.3	3.6
19.05	60	0.2	100	107.3	85.1	7.1
19.05	60	0.3	100	107.6	75.9	10.6
19.05	60	0.4	100	106.1	66.3	13.9
19.05	60	0.5	100	103.1	56.9	16.9
25.4	60	0.1	100	104.7	93.3	4.8
25.4	60	0.2	100	107.3	85.1	9.5
25.4	60	0.3	100	107.6	75.9	14.2
25.4	60	0.4	100	106.1	66.3	18.5
25.4	60	0.5	100	103.1	56.9	22.6

Cont..

Radio de la muestra (mm)	Angulo de Inclinación	Coefficiente de Fricción	Fvc' (N)	FB (N)	FA (N)	X (mm)
31.75	60	0.1	100	104.7	93.3	6.0
31.75	60	0.2	100	107.3	85.1	11.9
31.75	60	0.3	100	107.6	75.9	17.7
31.75	60	0.4	100	106.1	66.3	23.2
31.75	60	0.5	100	103.1	56.9	28.2

19.05	30	0.1	200	134.1	94.5	1.5
19.05	30	0.2	200	149.5	72.6	3.1
19.05	30	0.3	200	161.0	50.9	4.8
19.05	30	0.4	200	168.5	30.6	6.5
19.05	30	0.5	200	172.4	12.4	8.2
25.4	30	0.1	200	134.1	94.5	2.0
25.4	30	0.2	200	149.5	72.6	4.2
25.4	30	0.3	200	161.0	50.9	6.4
25.4	30	0.4	200	168.5	30.6	8.7
25.4	30	0.5	200	172.4	12.4	11.0
31.75	30	0.1	200	134.1	94.5	2.5
31.75	30	0.2	200	149.5	72.6	5.2
31.75	30	0.3	200	161.0	50.9	8.0
31.75	30	0.4	200	168.5	30.6	10.9
31.75	30	0.5	200	172.4	12.4	13.7

19.05	45	0.1	200	154.0	126.0	2.3
19.05	45	0.2	200	163.2	108.8	4.6
19.05	45	0.3	200	168.7	90.8	6.9
19.05	45	0.4	200	170.7	73.1	9.2
19.05	45	0.5	200	169.7	56.6	11.4
25.4	45	0.1	200	154.0	126.0	3.0
25.4	45	0.2	200	163.2	108.8	6.1
25.4	45	0.3	200	168.7	90.8	9.3
25.4	45	0.4	200	170.7	73.1	12.3
25.4	45	0.5	200	169.7	56.6	15.1
31.75	45	0.1	200	154.0	126.0	3.8
31.75	45	0.2	200	163.2	108.8	7.7
31.75	45	0.3	200	168.7	90.8	11.6
31.75	45	0.4	200	170.7	73.1	15.4
31.75	45	0.5	200	169.7	56.6	18.9

19.05	60	0.1	200	209.5	186.6	3.6
19.05	60	0.2	200	214.5	170.1	7.1
19.05	60	0.3	200	215.3	151.7	10.6
19.05	60	0.4	200	212.2	132.6	13.9
19.05	60	0.5	200	206.2	113.8	16.9

Cont.

Radio de la muestra (mm)	Angulo de Inclinación	Coefficiente de Fricción	Fvc' (N)	FB (N)	FA (N)	X (mm)
25.4	60	0.1	200	209.5	186.6	4.8
25.4	60	0.2	200	214.5	170.1	9.5
25.4	60	0.3	200	215.3	151.7	14.2
25.4	60	0.4	200	212.2	132.6	18.5
25.4	60	0.5	200	206.2	113.8	22.6
31.75	60	0.1	200	209.5	186.6	6.0
31.75	60	0.2	200	214.5	170.1	11.9
31.75	60	0.3	200	215.3	151.7	17.7
31.75	60	0.4	200	212.2	132.6	23.2
31.75	60	0.5	200	206.2	113.8	28.2
19.05	30	0.1	300	201.2	141.8	1.5
19.05	30	0.2	300	224.2	108.9	3.1
19.05	30	0.3	300	241.5	76.3	4.8
19.05	30	0.4	300	252.8	45.9	6.5
19.05	30	0.5	300	258.6	18.6	8.2
25.4	30	0.1	300	201.2	141.8	2.0
25.4	30	0.2	300	224.2	108.9	4.2
25.4	30	0.3	300	241.5	76.3	6.4
25.4	30	0.4	300	252.8	45.9	8.7
25.4	30	0.5	300	258.6	18.6	11.0
31.75	30	0.1	300	201.2	141.8	2.5
31.75	30	0.2	300	224.2	108.9	5.2
31.75	30	0.3	300	241.5	76.3	8.0
31.75	30	0.4	300	252.8	45.9	10.9
31.75	30	0.5	300	258.6	18.6	13.7
19.05	45	0.1	300	231.0	189.0	2.3
19.05	45	0.2	300	244.8	163.2	4.6
19.05	45	0.3	300	253.0	136.2	6.9
19.05	45	0.4	300	256.0	109.7	9.2
19.05	45	0.5	300	254.6	84.9	11.4
25.4	45	0.1	300	231.0	189.0	3.0
25.4	45	0.2	300	244.8	163.2	6.1
25.4	45	0.3	300	253.0	136.2	9.3
25.4	45	0.4	300	256.0	109.7	12.3
25.4	45	0.5	300	254.6	84.9	15.1
31.75	45	0.1	300	231.0	189.0	3.8
31.75	45	0.2	300	244.8	163.2	7.7
31.75	45	0.3	300	253.0	136.2	11.6
31.75	45	0.4	300	256.0	109.7	15.4
31.75	45	0.5	300	254.6	84.9	18.9

Cont.

Radio de la muestra (mm)	Angulo de Inclinación	Coefficiente de Fricción	Fvc' (N)	FB (N)	FA (N)	X (mm)
19.05	60	0.1	300	314.2	279.9	3.6
19.05	60	0.2	300	321.8	255.2	7.1
19.05	60	0.3	300	322.9	227.6	10.6
19.05	60	0.4	300	318.3	198.9	13.9
19.05	60	0.5	300	309.3	170.7	16.9
25.4	60	0.1	300	314.2	279.9	4.8
25.4	60	0.2	300	321.8	255.2	9.5
25.4	60	0.3	300	322.9	227.6	14.2
25.4	60	0.4	300	318.3	198.9	18.5
25.4	60	0.5	300	309.3	170.7	22.6
31.75	60	0.1	300	314.2	279.9	6.0
31.75	60	0.2	300	321.8	255.2	11.9
31.75	60	0.3	300	322.9	227.6	17.7
31.75	60	0.4	300	318.3	198.9	23.2
31.75	60	0.5	300	309.3	170.7	28.2

Anexo D

Muestras de lutitas

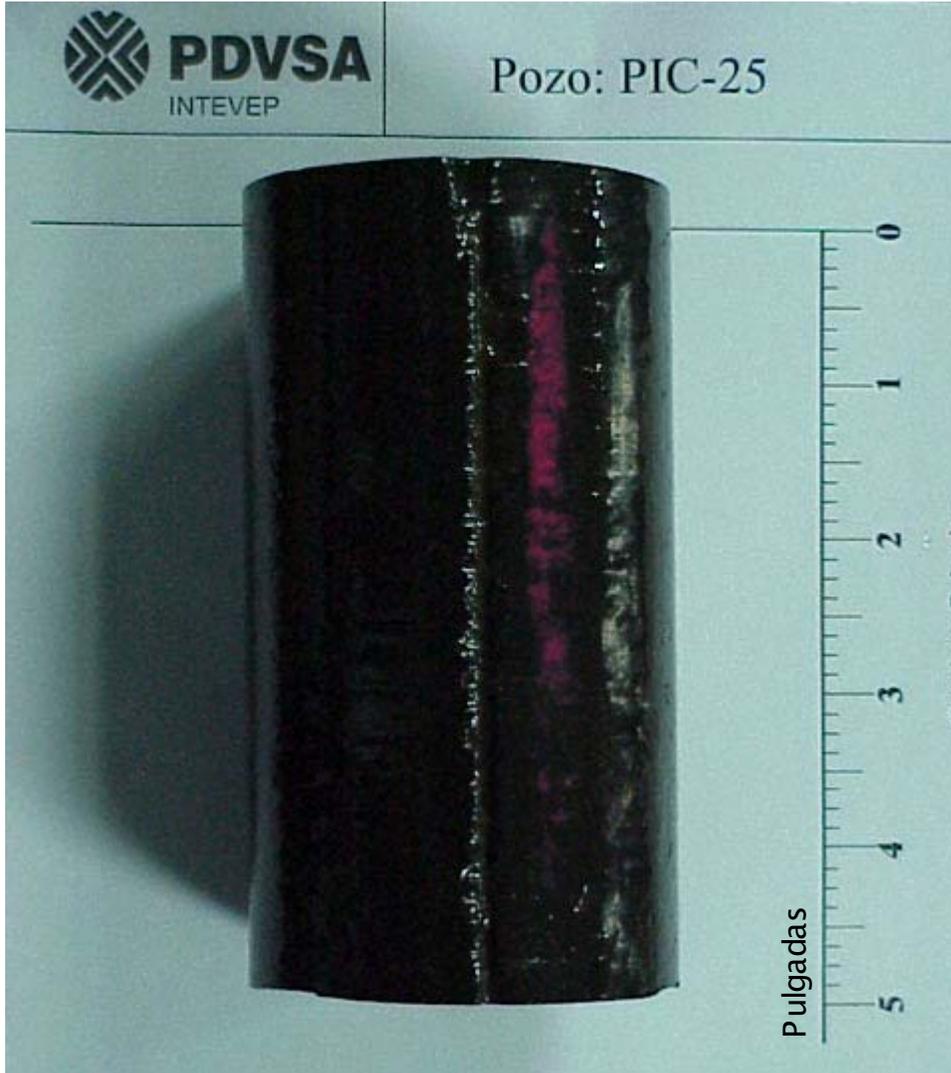
MUESTRA A

PROFUNDIDAD: 19310 pies



MUESTRA B

PROFUNDIDAD: 19311 pies



MUESTRA C

PROFUNDIDAD: 19328 pies



MUESTRA D

PROFUNDIDAD: 19312 pies



MUESTRA E

PROFUNDIDAD: 19319 pies



Anexo E

Procedimiento técnico para ejecución de ensayos con el equipo TSI

Procedimiento técnico para la ejecución de ensayos con el equipo TSI

- Chequear la conexión del equipo y la celda de carga.
- Encender el equipo y la computadora.
- Abrir el programa TSI de ensayos y llenar los siguientes campos en la forma que se muestra a continuación:

Rock ID: Nombre del pozo y número o profundidad de la muestra. (Ej. PIC25-19762').

Cutter ID: Tipo de cuchilla y número. (Ej. R10S1).

Test Series ID: Nombre completo. (Ej. PIC25-19762-R10S1).

- Presionar el botón CONFIRM.
- Colocar la muestra en el equipo TSI fijándola firmemente con los soportes y tornillos.
- Verificar la alineación de la muestra con respecto a la dirección de corte.
- Identificar el punto inicial de corte colocando la cuchilla justo en la superficie de la muestra.
- Establecer el cero vertical en ajustando el micrómetro digital cero.
- Situar la cuchilla manualmente por encima de la superficie de la muestra (a partir del cero vertical por lo menos 1 mm).
- Desplazar el carrusel horizontalmente utilizando los controles de la aplicación entre 2 y 4 mm de distancia entre la cuchilla y la muestra.
- Seleccionar el punto inicial de corte oprimiendo el botón SET HOME.
- Definir las siguientes características:
 - Número de corte "cut".
 - Longitud de corte "Lc".
 - Profundidad absoluta "da".
 - Profundidad de corte (relativa) "dc".
 - Ranura número 1, 2 ó 3.
 - Tipo de corte "Precorte o Corte".
- Introducir los valores de longitud y profundidad en la ventana de TEST CONFIGURATION del software, así como el número de ranura en GROOVE.
- Ajustar la profundidad del corte.

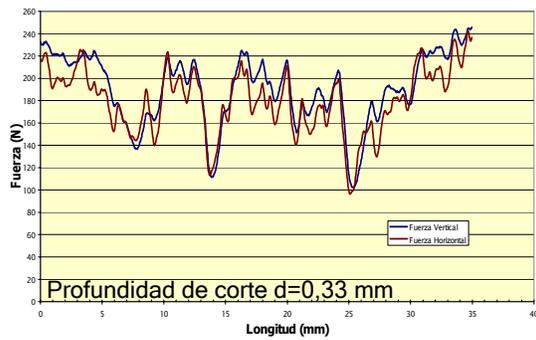
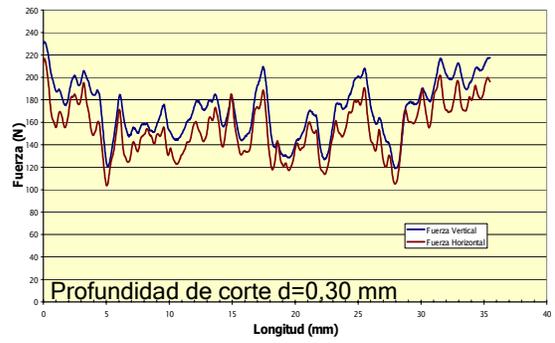
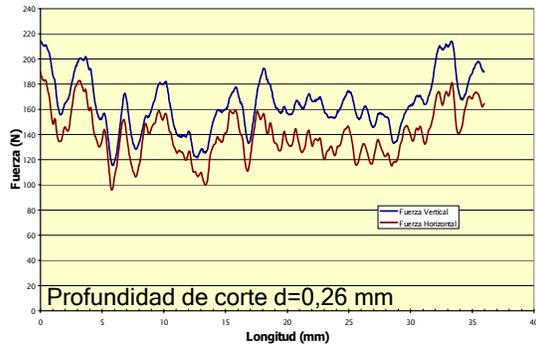
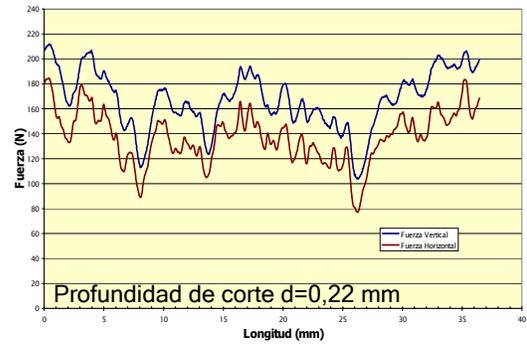
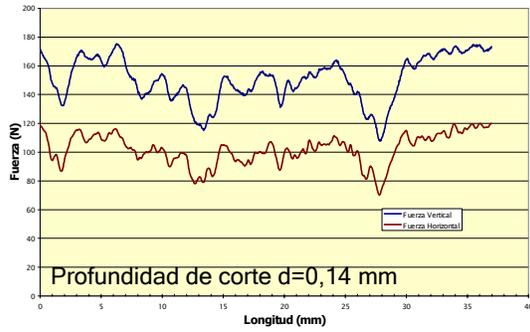
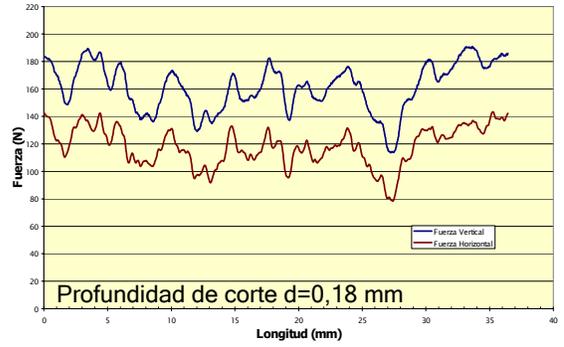
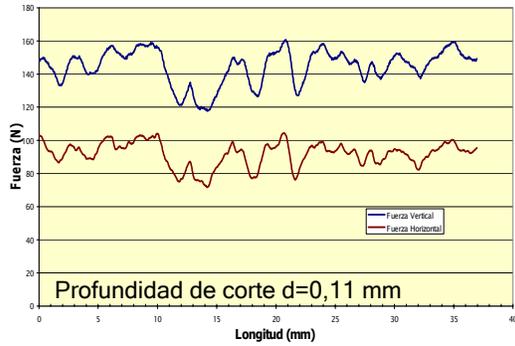
- Sujetar el cortador con los tornillos y la palanca previstos para ello.
- Oprimir el botón START TEST para comenzar el ensayo de pre-corte en forma automática.
- Observar el comportamiento del ensayo.
- En caso de descartar el ensayo de pre-corte, oprimir el botón DISCARD TEST que aparece en la ventana de "SELECT ZONES NUMBER" y luego, oprimir PROCEED en la siguiente ventana.
- Si se requiere grabar el ensayo de pre-corte, colocar el número de regiones a salvar y oprimir el botón GO en la ventana "SELECT ZONES NUMBER". Verificar en la pantalla los datos recopilados, introducir en los campos BEG CUT y END CUT el comienzo y el final donde se requiere grabar los datos, y oprimir el botón SAVE DATA de la ventana "SELECT ZONES NUMBER".
- Aflojar los tornillos que sujetan el cortador y subir la cuchilla manualmente girando la perilla en sentido contrario a las agujas del reloj a una distancia mayor o igual a 0,2 mm por encima de la muestra.
- Oprimir el botón GO HOME, lo que hace mover la cuchilla hasta la posición inicial.
- Repetir las actividades de "pre-cortes" tantas veces como sea necesario hasta que se observe uniformidad, aumentando progresivamente la profundidad en 0.1, 0.2 ó 0.3 mm entre cada pre-corte.
- Definir los parámetros para el ensayo de corte.
- Oprimir el botón START TEST para comenzar el ensayo de corte en forma automática.
- Observar el comportamiento del ensayo y grabar los datos correspondientes al corte, colocando el número de regiones a salvar y oprimiendo el botón GO en la ventana "SELECT ZONES NUMBER".
- Verificar en la pantalla los datos recopilados, introducir en los campos BEG CUT y END CUT el comienzo y el final donde se requiere grabar los datos, y oprimir el botón SAVE DATA de la ventana "SELECT ZONES NUMBER".
- Aflojar los tornillos que sujetan el cortador y subir la cuchilla manualmente girando la perilla en sentido contrario a las agujas del reloj a una distancia mayor o igual a 0,2 mm por encima de la muestra.
- Oprimir el botón GO HOME, lo que hace mover la cuchilla hasta la posición inicial.

- Una vez finalizado este paso se ajusta manualmente a la siguiente profundidad de corte y se comienza nuevamente el corte de la muestra.
- Repetir estos últimos pasos las veces necesarias hasta alcanzar varias profundidades de corte. De ser necesario, se desmonta la muestra y se empieza una nueva ranura gemela.
- Cambiar la cuchilla recta o afilada por la que tiene chaflán y repetir el proceso con esta cuchilla.
- Una vez finalizada la prueba se analiza los datos graficando las fuerzas en función de la profundidad donde se obtendrá el valor de la Energía Intrínseca Específica y el valor del ángulo de Fricción.

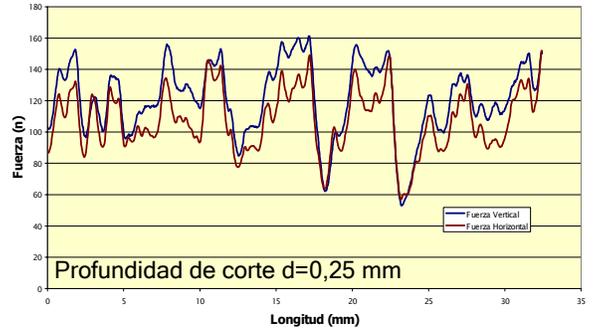
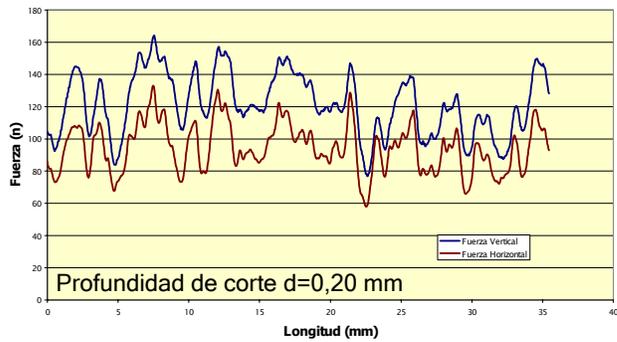
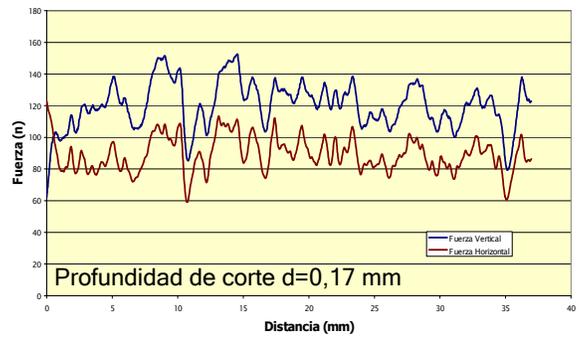
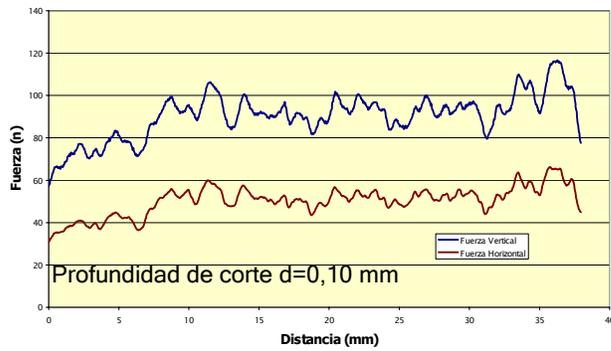
Anexo F

Gráficas de resultados

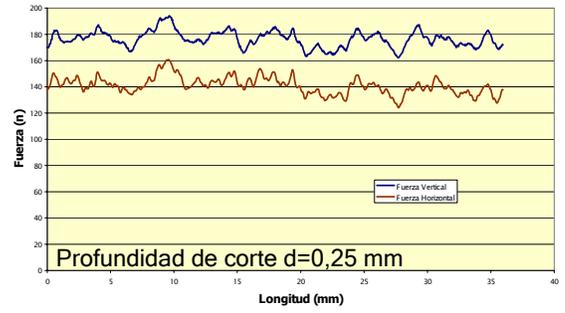
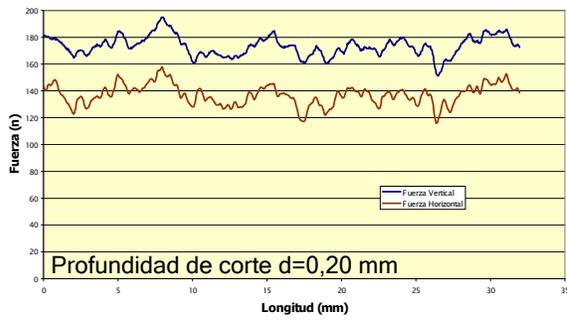
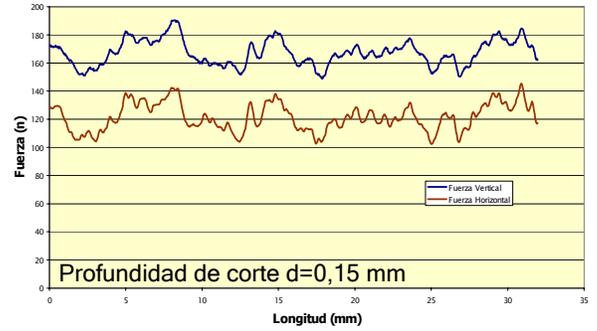
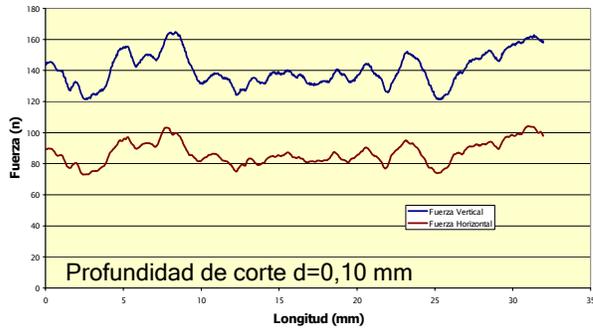
Muestra A (Cuchilla afilada)



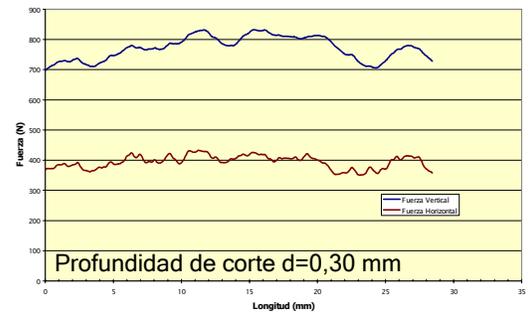
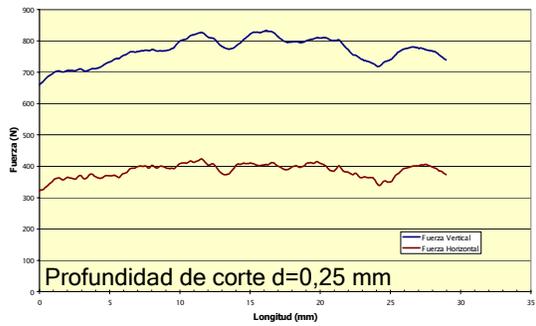
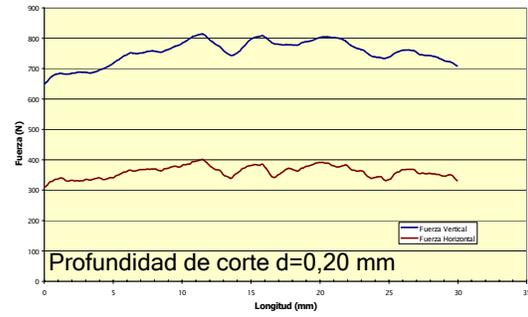
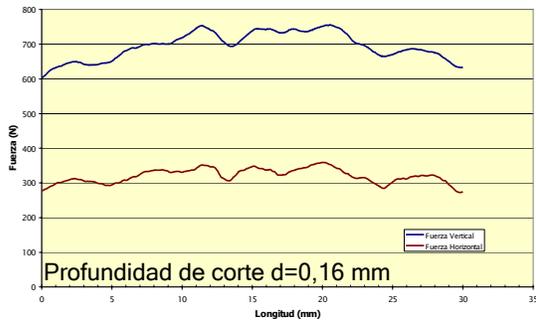
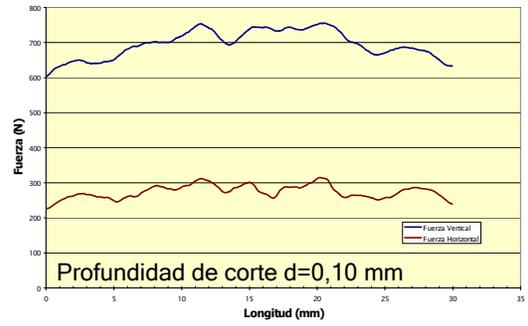
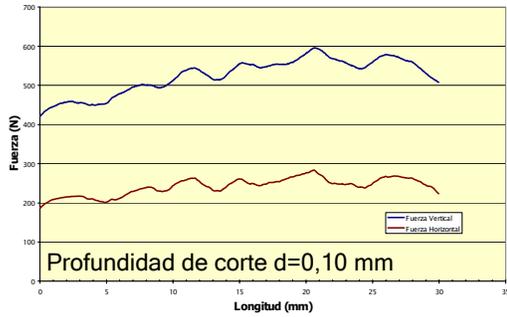
Muestra B (Cuchilla afilada)



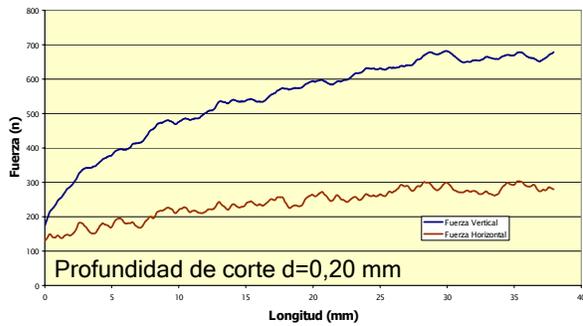
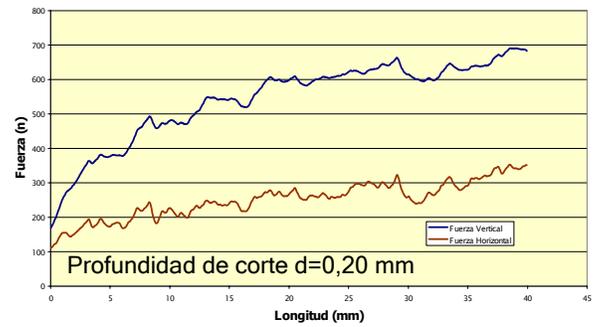
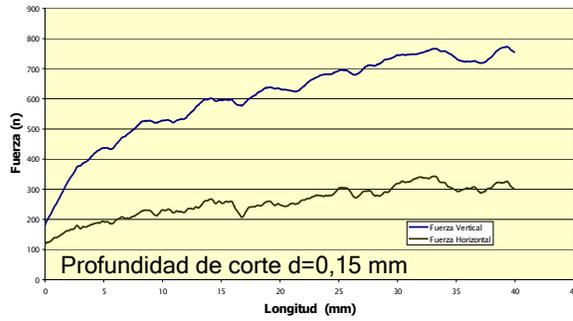
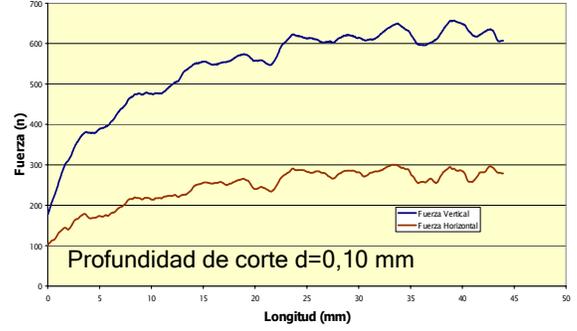
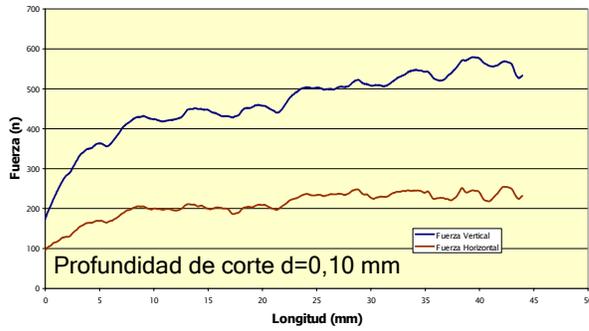
Muestra C (Cuchilla afilada)



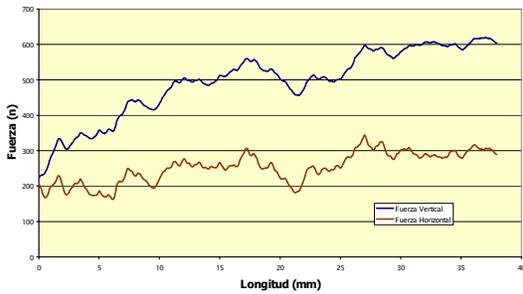
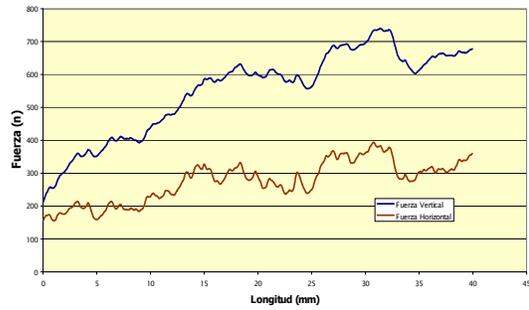
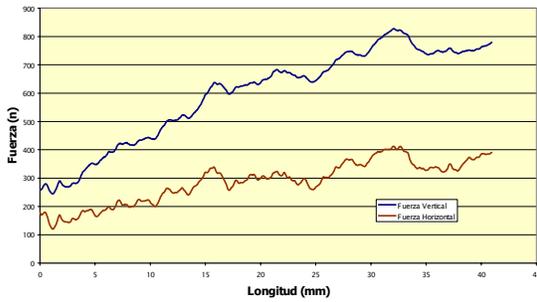
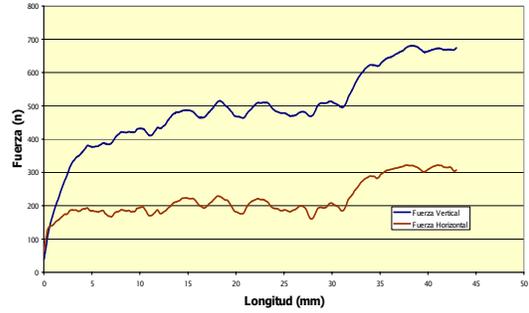
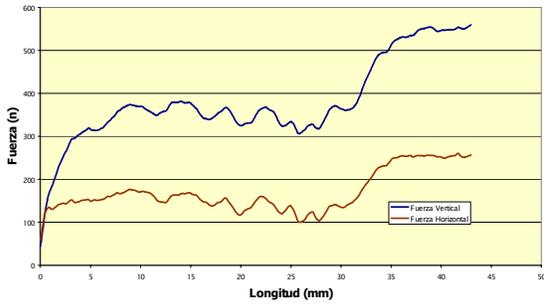
Muestra A (Cuchilla No afilada)



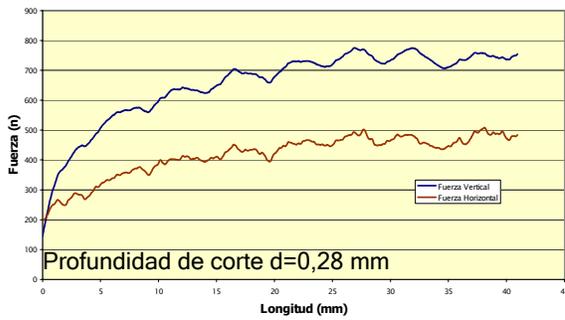
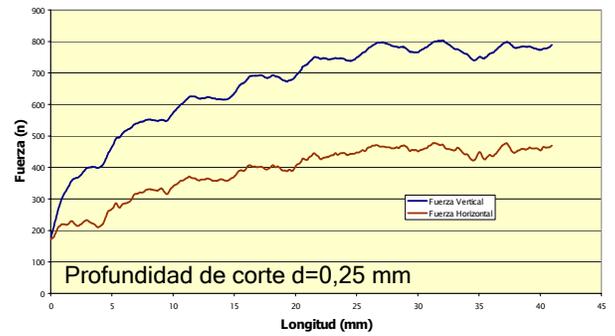
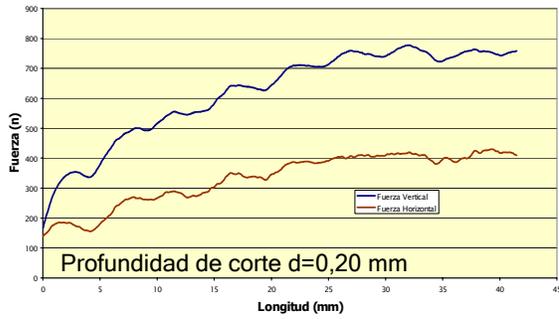
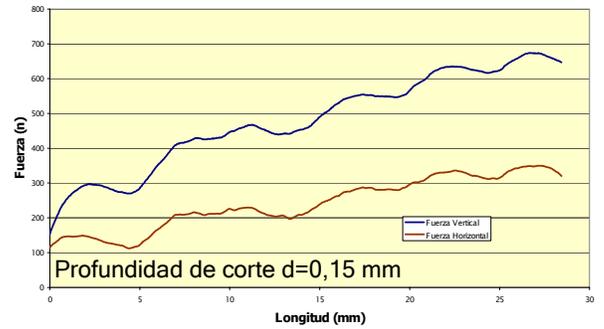
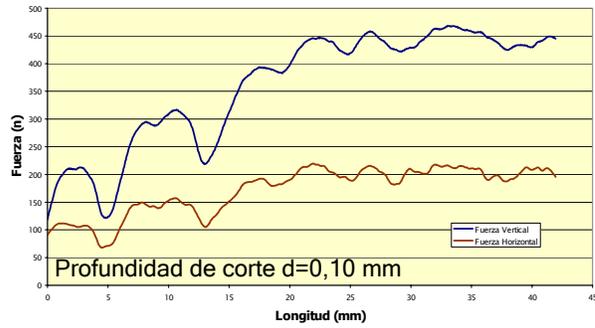
Muestra B Ranura 2 (Cuchilla No afilada)



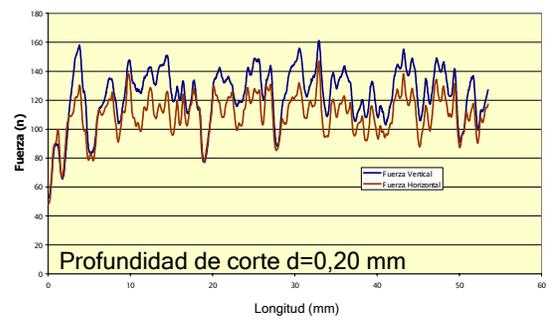
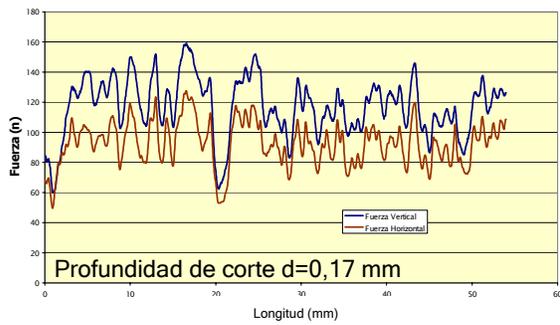
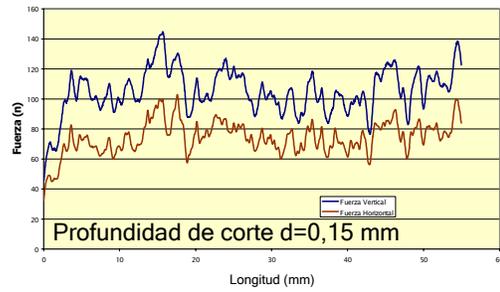
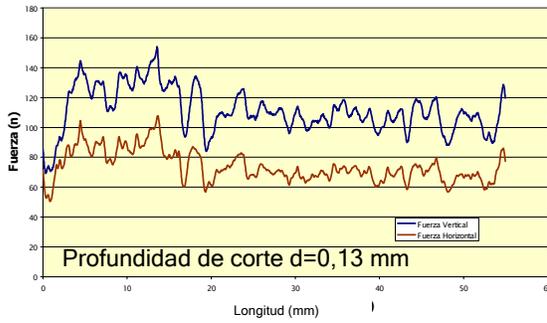
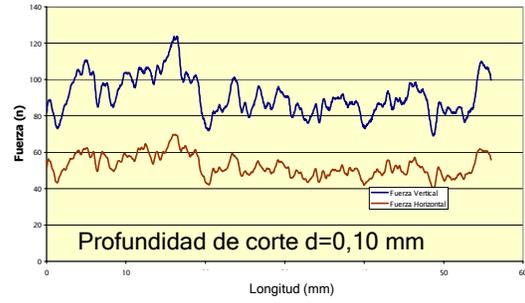
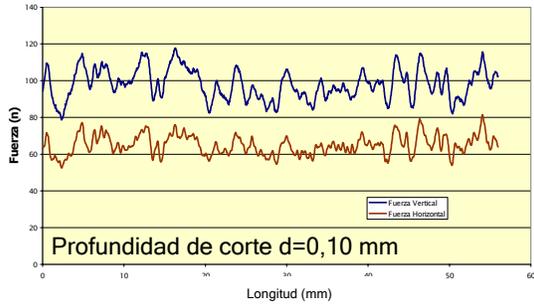
Muestra B Ranura 3(Cuchilla No afilada)



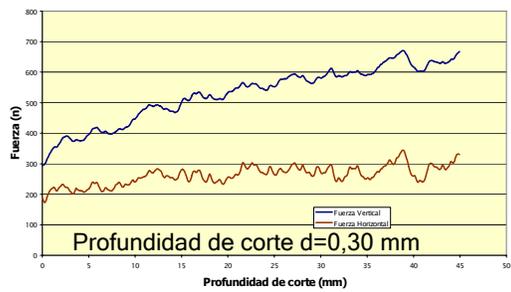
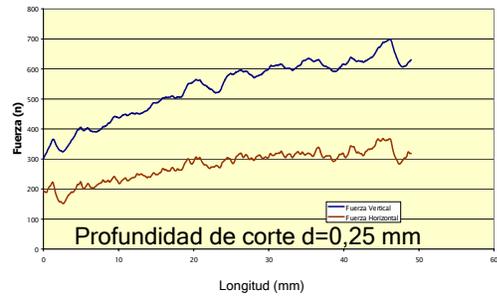
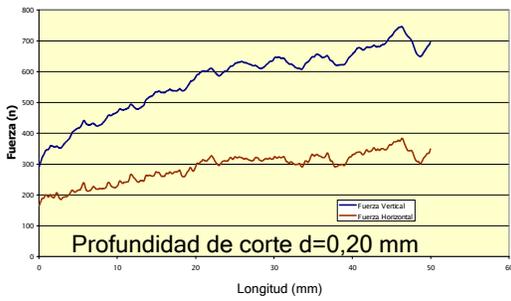
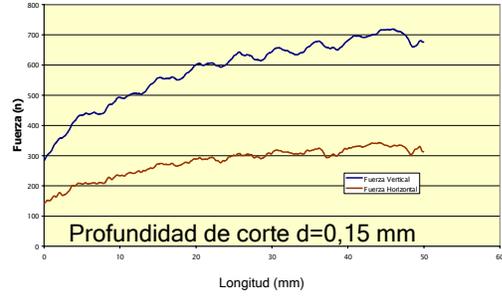
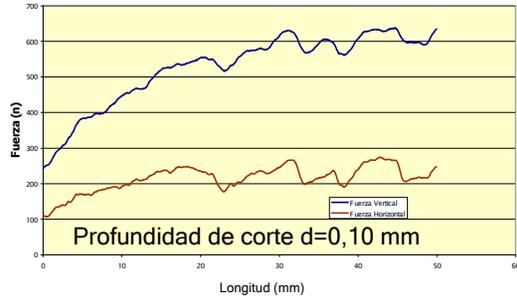
Muestra C (Cuchilla No afilada)



Muestra D (Cuchilla afilada)



Muestra D (Cuchilla No afilada)



Muestra E (Cuchilla No afilada)

