

01174 20
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



“Desarrollo de perfiles de Energía Específica y Resistencia a la Compresión en sitio a partir de parámetros de perforación.”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA PETROLERA
P R E S E N T A:

IZA ARACELI VAZQUEZ REYES

ASESOR: DR. DANIEL GARCIA GAVITO



Estudios de Posgrado MEXICO, D. F.

Enero 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).



El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



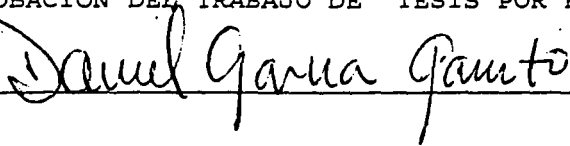
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA

RECIBI COPIA DE TESIS DESARROLLADA POR LA ALUMNA: IZA ARACELI VAZQUEZ REYES.

PARA PRESENTAR EXAMEN DE GRADO DE MAESTRIA EN INGENIERIA EN EL CAMPO DEL CONOCIMIENTO INGENIERIA PETROLERA Y DE GAS NATURAL.

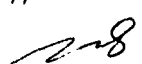
JURADO	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE: DR. VICENTE CASARIEGO GONZALEZ		09/01/02
VOCAL: DR. DANIEL GARCIA GAVITO		09/01/02
SECRETARIO: DR. SERGIO BERUMEN CAMPOS		11/Enero/2002
SUPLENTE: DR. FERNANDO SAMANIEGO VERDUZCO		5 de Enero 2002
SUPLENTE: M. en I. JOAQUIN MENDIOLA SANCHEZ		01/102

APROBACION DEL TRABAJO DE TESIS POR EL DEPARTAMENTO _____



BJS*jac.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Recibi'
11-01-02


A Dios:

por la vida que disfruto,
por la alegría de mis hijos,
por el amor incondicional de la familia que poseo,
por la comprensión y el cariño de mi esposo,
por todas y cada una de las cosas tangibles
e intangibles que me has dado.

Gracias Señor.

A mi esposo Luis:

“Solo con el corazón se puede ver claro,
lo esencial es invisible a los ojos”.

Antoine de Saint Exupéry

A mi madre y a mi hermana Yolanda:

El éxito de las grandes mujeres
se debe a pequeños actos en su vida.

Gracias.

Con amor a mis hijos Eduardo, Gina y Mauricio:

El éxito de los grandes hombres
se debe a pequeños actos en su vida.
Hagamos pues, las cosas pequeñas
e insignificantes de cada día,
Y nos sorprenderá ver,
que terminamos haciendo lo imposible.

Gracias por su amor.

A todos mis sobrinos:

“El hombre mas lento,
que no pierde de vista, el fin,
va siempre más veloz, que el que vaya,
sin perseguir un punto”

Gotthold W. Lessing

Con mucho cariño a mis hermanos: Elia
Maricela
Eduardo y
Guillermo

Con un profundo respeto y cariño a mis maestros:

Dr. Daniel García Gavito,
Dr. Vicente Cazariego González
Dr. Fernando Samaniego Verusco
Dr. Jesús Rivera Rodríguez
Ing. Eusebio Capitanachi González
Ing. Luzbel Napoleón Solórzano
Ing. González Guevara José Antonio
que tuvieron a bien compartir conmigo un poco de sus
conocimientos, así como a todas y cada una de las
personas que de una u otra forma contribuyeron a la
consecución de este objetivo. Gracias

A mi inolvidable Universidad Nacional Autónoma de México
“Por mi raza hablará el espíritu”

A Petróleos Mexicanos por la oportunidad y apoyo brindado.
Gracias.

CONTENIDO

Capítulo	Pág.
Titulo	i
Agradecimientos	ii
Contenido	iv
Lista de tablas	v
Lista de figuras	vi
Resumen	1
1. Definición del problema y objetivo.	2
2. Revisión Bibliográfica.	5
2.1. Energía específica como parámetro de medición.	5
2.2. Predicción de la resistencia a la compresión de las rocas.	8
3. Desarrollo de correlaciones para estimar energía específica y resistencia a la compresión.	12
3.1. Conceptos básicos.	12
3.2. Análisis de pruebas de laboratorio.	14
3.3. Resistencia a la compresión de las rocas utilizadas.	20
3.4. Mecanismos de corte de la roca.	25
3.5. Desarrollo de las correlaciones.	26
4. Análisis y discusión de resultados.	36
4.1. Metodología de aplicación.	36

4.2.	Ejemplo de aplicación.	38
4.3.	Aplicación al campo Arcos.	40
4.4.	Información disponible del campo en estudio.	40
4.5.	Comparación de la predicción de resistencia a la compresión con otros métodos.	45
4.6.	Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC).	48
5.	Conclusiones y recomendaciones.	61
5.1.	Conclusiones	61
5.2.	Recomendaciones	63
	Nomenclatura.	64
	Referencias.	66
	Apéndice 1.	68
	Apéndice 2.	70

LISTA DE TABLAS

Tabla	Pág.
1. Datos de las pruebas de laboratorio de la formación de carbonatos, fluido base aceite, barrena tipo 1.	16
2. Datos de las pruebas de laboratorio de la formación de carbonatos, fluido base agua, barrena tipo 1.	17
3. Datos de las pruebas de laboratorio de la formación de carbonatos, fluido base agua, barrena tipo 2.	17
4. Datos de las pruebas de laboratorio de la formación de carbonatos, fluido base aceite, barrena tipo 2.	18
5. Resumen de propiedades físicas, mecánicas y de transporte de rocas	24
6. Ejemplo de la toma de información del registro de los parámetros de perforación cada metro.	43
7. Información disponible del campo Arcos, Región Norte.	44
8. Datos de perforación en lutitas tipo 1, fluido base aceite, barrena tipo 1.	70
9. Datos de perforación en lutitas tipo 1, fluido base agua, barrena tipo 1.	70
10. Datos de perforación en lutitas tipo 1, fluido base agua, barrena tipo 2.	71
11. Datos de perforación en lutitas tipo 1, fluido base aceite, barrena tipo 2.	71
12. Datos de perforación en lutitas tipo 2, fluido base aceite, barrena tipo 1.	74
13. Datos de perforación en lutitas tipo 2, fluido base agua, barrena tipo 1.	74
14. Datos de perforación en lutitas tipo 2, fluido base agua, barrena tipo 2.	75
15. Datos de perforación en lutitas tipo 2, fluido base aceite, barrena tipo 2.	75
16. Datos de perforación en areniscas, fluido base aceite, barrena tipo 1.	78
17. Datos de perforación en areniscas, fluido base agua, barrena tipo 1.	78
18. Datos de perforación en areniscas, fluido base agua, barrena tipo 2.	79
19. Datos de perforación en areniscas, fluido base aceite, barrena tipo 2.	79

LISTA DE GRAFICAS Y FIGURAS

Figuras	Pág.
Figura 1. Energía específica total de Teale como una función de la velocidad de penetración, (Rop) en carbonatos.	18
Figura 2. Energía específica total de Teale como una función del peso sobre barrena, (Wob) en carbonatos.	19
Figura 3. Penetración por revolución como una función del peso sobre barrena, (Wob) en carbonatos, fluido 12 (lb/gal), barrena 8 ½ (pg).	19
Figura 4. Torque característico como una función de la penetración por revolución, (Rop) en carbonatos, en lutita tipo 1, fluido 12 (lb/gal), barrena 8 ½ (pg).	20
Figura 5. Cámaras de muestras de pruebas de esfuerzo.	21
Figura 6. Envolvente de falla en lutita tipo 2.	22
Figura 7. Envolvente de falla en carbonatos.	22
Figura 8. Envolvente de falla en arenisca.	23
Figura 9. Ejemplo de una función de Mohr, de los círculos de esfuerzo. 23	
Figura 10. Criterio de Morh-Coulomb.	24
Figura 11. Gráfica semilogarítmica de la penetración por revolución como una función de la energía específica adimensional en lutita tipo 1.	27
Figura 12. Gráfica semilogarítmica de la Penetración por revolución como una función de la energía específica adimensional en lutita tipo 2.	28
Figura 13. Gráfica semilogarítmica de la Penetración por revolución como una función de la energía específica adimensional en carbonatos.	29
Figura 14. Gráfica semilogarítmica de la Penetración por revolución como una función de la energía específica adimensional en areniscas.	30
Figura 15. Energía específica adimensional como una función de la penetración por revolución p (pg/rev), para las diferentes muestras de roca.	31
Figura 16. Correlación de la energía específica adimensional como una función de la penetración por revolución para las diferentes muestras de roca.	32
Figura 17. Correlación de la energía específica de Teale como una función de la energía específica de Rabia.	34

Figuras	Pág.
Figura 18. Diagrama de bloques de la metodología de aplicación de las correlaciones de los perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC).	37
Figura 19. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PCR) aplicados a datos de campo.	39
Figura 20. Ubicación del campo Arcos perteneciente a la cuenca de Burgos.	41
Figura 21. Localización de los pozos en estudio.	42
Figura 22. Resultado de la comparación con diferentes modelos, pozo 43.	46
Figura 23. Resultado de la comparación con diferentes modelos, pozo 511.	47
Figura 24. Resultado de la aplicación de las correlaciones al pozo Arcos 26D.	49
Figura 25. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 507.	50
Figura 26. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 11.	51
Figura 27. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 508.	52
Figura 28. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 505.	53
Figura 29. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 43.	54
Figura 30. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 511.	55
Figura 31. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 27.	56
Figura 32. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 55.	57

Figuras	Pág.
Figura 33. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 54.	58
Figura 34. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos DL3.	59
Figura 35. Energía específica como una función de la penetración por revolución Rop (pg/rev) en lutitas tipo 1	72
Figura 36. Energía específica como una función del peso sobre barrena Wob (lbf) en lutitas tipo 1.	72
Figura 37. Penetración por revolución como una función del peso sobre barrena Wob (lbf) en lutitas tipo 1.	73
Figura 38. Torque característico como una función de la penetración por revolución Rop (pg/rev) en lutitas tipo 1.	73
Figura 39. Energía específica como una función de la penetración por revolución Rop (pg/rev) en lutitas tipo 2.	76
Figura 40. Energía específica como una función del peso sobre barrena Wob (lbf) en lutita tipo 2.	76
Figura 41. Penetración por revolución como una función del peso sobre barrena Wob (lbf) en lutita tipo 2.	77
Figura 42. Torque característico como una función de la penetración por revolución Rop (pg/rev) en lutita tipo 2.	77
Figura 43. Energía específica como una función de la penetración por revolución Rop (pg/rev) en arenisca.	80
Figura 44. Energía específica como una función del peso sobre barrena Wob (lbf) en Arenisca.	80
Figura 45. Penetración por revolución como una función del peso sobre barrena Wob (lbf) en Arenisca.	81
Figura 46. Torque característico como una función de la penetración por revolución Rop (pg/rev), en Arenisca.	81

Resumen

Tradicionalmente, la resistencia de las rocas a la compresión axial se obtiene de registros geofísicos y de pruebas a nivel laboratorio. Sin embargo, existe el interés de desarrollar un método por el cual se determine el valor de la resistencia a la compresión in situ de la roca con datos que provengan directamente de las operaciones en campo y para barrenas policristalinas de diamante compacto (PDC). Este valor calculado de manera confiable serviría para mejorar los diversos trabajos que se realizan en la perforación de pozos. Por esta razón, en el presente trabajo se establece un método para la evaluación de la resistencia a la compresión in situ de las rocas, a partir de parámetros de perforación. Estos parámetros de perforación son medidos rutinariamente en campo durante la construcción de pozos.

El trabajo consistió en realizar un estudio detallado de datos de laboratorio para diferentes tipos de roca. Se analizaron las similitudes de comportamiento existentes entre las diferentes rocas estudiadas. Partiendo del análisis cualitativo y cuantitativo se determinó el intervalo del ritmo de penetración en el que se presentaban dos diferentes mecanismos de corte de la roca para las diferentes muestras. Apoyados en los estudios realizados por Teale⁴ y Rabia⁵⁻⁸ para barrenas tri-cónicas se obtuvieron dos correlaciones, la primera entre la energía específica y la resistencia a la compresión de la roca y la segunda que corresponde a la energía específica real, los resultados son el perfil de resistencia a la compresión de la roca (PRC) y el perfil de energía específica (PEE).

Los resultados obtenidos con estas correlaciones se comparan favorablemente con aquellos métodos tradicionales, dando excelentes resultados. La mayor aplicación se realizó en el estudio del campo Arcos, perteneciente a la Región Norte de Pemex Exploración y Producción (PEP). Cabe hacer mención que el uso de estas correlaciones, no representa una erogación extra en términos económicos y en efecto, el costo es menor ya que este método se apoya en datos convencionales de la perforación de pozos y ofrece una amplia gama de aplicación en los trabajos de perforación, como son la selección de barrenas, el fracturamiento hidráulico, la detección de zonas poco consolidadas, cambios litológicos por mencionar algunas.

CAPÍTULO I.

Definición del problema y objetivo.

Los avances tecnológicos, la prevención de daños ecológicos y los cambios socioeconómicos que se han suscitado en México, nos han hecho modificar los procedimientos, la forma de trabajar y de analizar con mayor detalle los problemas que se presentan en nuestras áreas de trabajo, con el fin de establecer propuestas de solución y así mejorar los procesos aumentando calidad y disminuyendo costos.

La ingeniería petrolera no ha sido la excepción; es por ello que en el caso específico de la perforación de pozos petroleros ha sido necesario planear, ejecutar y dirigir los programas de perforación e intervenciones a pozos con mayor eficiencia, a menor costo, en el menor tiempo y con la mejor rentabilidad posible.

Actualmente, se cuenta con una metodología de selección y optimización de barrenas tri-cónicas apropiadas de acuerdo a la profundidad y el campo que se esté trabajando; sin embargo, ésta metodología se encuentra fundamentada prácticamente en la experiencia. Por otra parte, se cuenta con información obtenida de registros con línea de acero, los cuales han sido extensamente empleados en la caracterización de yacimientos y en muchas ocasiones proporcionan mediciones directas de algunas propiedades elásticas de las rocas. Sin embargo, se presenta el interés de desarrollar algún método que determine el valor de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca que sea lo más confiable posible, dicho parámetro, es necesario en los diferentes trabajos que se realizan en perforación de pozos. Para ello contamos con la teoría de la mecánica de rocas que nos proporciona las bases teóricas para ser aplicadas en el análisis de datos de perforación, contribuyendo al mejoramiento de los programas de intervenciones a pozos.

De los estudios realizados por varios autores sobre barrenas tri-cónicas y de lo anterior expuesto tenemos que, la resistencia a la compresión uniaxial de la roca se puede determinar de dos formas diferentes:

-
- a) De registros geofísicos^{11-13,17} a partir del tiempo de tránsito, de datos de porosidad o de datos de densidad de las formaciones atravesadas.
 - b) De análisis de núcleos^{14-16,19} en pruebas de laboratorio uniaxial y axial.
 - c) A partir de correlaciones empíricas de laboratorio.

La resistencia a la compresión de las rocas en sitio es una propiedad muy difícil de determinar o medir, debido a la variación en los estados de esfuerzos y la anisotropía de las formaciones. Por otro lado, la velocidad de penetración al perforar, está relacionada con la resistencia de las rocas a ser destruidas y este valor de velocidad se puede medir en el campo con un alto grado de confiabilidad. Con este valor y otros parámetros de perforación relacionados entre sí, se podrían emplear para determinar la resistencia a la perforación de la roca.

De la investigación realizada y después de estudiar y profundizar en el concepto de energía específica, se pretende determinar una nueva forma de calcular la resistencia a la compresión de la roca en sitio, utilizando datos de operación medidos en el campo, como lo es peso sobre la barrena, el torque, la velocidad de rotación (RPM, revoluciones por minuto) y el intervalo perforado.

Este estudio pretende establecer, las relaciones teóricas requeridas para integrar el planteamiento de la nueva forma de cálculo y presentar la metodología para el cálculo de la resistencia a la compresión en sitio de la roca, a partir de parámetros de perforación medidos en campo, teniendo como premisa relacionar los trabajos realizados en laboratorio, con los resultados obtenidos en campo.

Por lo tanto los objetivos de este estudio son:

1) Establecer una correlación que permita calcular la resistencia a la compresión en sitio de la roca, a partir de datos de operación medidos en campo como lo son: el peso sobre barrena, el torque, la velocidad de rotaria, y el intervalo perforado.

2) Desarrollar la metodología de uso y aplicación de la correlación en el campo Arcos que permita entre otras cosas, la selección óptima de barrenas de diamante policristalino sintético (PDC).

3) Establecer las bases que permitan en futuros trabajos implementar un modelo matemático de optimización de condiciones de operación en función de los mecanismos de corte para barrenas (PDC) y profundizar en el estudio, uso y explotación de estas correlaciones.

CAPÍTULO 2

Revisión bibliográfica

El corte o penetración de la superficie de un sólido semi-infinito de material quebradizo bajo un esfuerzo normal, es la base de todo el proceso activo relacionado a la perforación o fragmentación de rocas, el entendimiento cualitativo de este proceso es fundamental en los trabajos de perforación de pozos. Usualmente, el cuerpo de la roca es mayor en relación con la sección de roca dañada por un cortador, por lo que el problema puede generalizarse como la fabricación de una entrada en un sólido semi-infinito de roca a través de una y sólo una cara libre. La energía requerida para realizar esta penetración y la resistencia a la compresión o dureza de la roca son los tópicos que se abordaran en este capítulo.

2.1 Energía específica como parámetro de medición.

Varios autores¹⁻³ han propuesto modelos en los cuales los procesos de perforación son tratados aisladamente como un sistema de balance de energía mecánica. La energía específica mecánica proporcionada, la eficiencia de perforación y el esfuerzo de la roca son los tres elementos claves en estos sistemas, los cuales aún hoy en día no han podido presentar de manera sistemática la relación existente entre ellos dando en todos los estudios realizados solo aproximaciones aisladas de los mismos.

En el estudio de la trituración de rocas, generalmente la energía aplicada se acepta como un parámetro importante y se han hecho muchos esfuerzos sin éxito para relacionarla a las propiedades del material y a las dimensiones de los recortes producidos¹. No obstante, el conocimiento de este parámetro es importante en el estudio de las rocas.

Teale⁴, en 1964, realizó pruebas de simulación en laboratorio a escala completa bajo condiciones de laboratorio controladas para desarrollar y validar un modelo de balance de energía para perforar bajo presión hidrostática, e introduce el concepto de energía específica, definida como la energía necesaria para excavar un volumen unitario de roca, o en otras palabras es *el trabajo realizado por unidad de volumen de roca recortado*. Este parámetro puede tomarse también como un índice del proceso activo de la eficiencia mecánica para perforar la roca.

Teale⁴ reconoce que la energía específica no puede ser representada por un simple número, ya que el proceso de perforación desde hace tiempo se ha caracterizado por fluctuaciones de los parámetros de perforación debida a la dinámica compleja y a la naturaleza heterogénea de la roca.

En 1982 Rabia⁵ concluye que la energía específica (Es) no es una propiedad intrínseca de la roca en términos de unidad de volumen o área de superficie creada. Esta energía es altamente dependiente del tipo y diseño de la barrena. Esto es, los valores de energía específica (Es) que se obtendrían son diferentes para una misma formación que se perforara con dos diferentes tipos de barrenas.

Continuando con sus investigaciones en 1985, Rabia⁶ utiliza los resultados reportados por Teale y emplea el concepto de energía específica. Adicionalmente presenta una forma aproximada de seleccionar el tipo apropiado de barrena, combinándola con el costo por metro. Propone la aplicación potencial de la energía específica en el desarrollo de pozos exploratorios. Con lo anterior, Rabia⁶ proporciona al personal de perforación un método para analizar en sitio el desempeño de la barrena. El método utiliza la energía específica, congruente a la descrita por Teale y concluye que:

- La energía específica (Es), es una medida del desempeño de la barrena y es directamente compatible con el costo por pie perforado.
- La energía específica (Es), puede utilizarse para seleccionar el tipo apropiado de barrena triconica para cualquier sección del agujero, y los puntos de cambio para diferentes tipos de barrenas tri-cónicas pueden determinarse de gráficas de (Es) contra Profundidad para cada formación. El valor de energía específica (Es) también puede utilizarse como un criterio para finalizar el uso de una barrena presente.

En un pozo exploratorio, el valor de energía específica (Es), es una herramienta conveniente para determinar la profundidad a la cual sacar una barrena del agujero, el asentamiento de tuberías de revestimiento y la localización de zonas de alta presión.

Rabia y colaboradores⁷ en 1986, incluyen el análisis de laboratorio y proponen algunas ecuaciones modificadas para ser empleadas y validadas bajo ciertas condiciones

de laboratorio en la selección de barrenas, proponiendo emplear para el cálculo de la energía específica, una constante que depende del tipo de barrena empleado y de las condiciones de operación empleadas para cada caso. La expresión simplificada de energía específica en este artículo propone un método para el análisis del desempeño de la barrena como una herramienta para la selección de las mismas, siempre y cuando la suposición que se haga de la constante sea la adecuada. Por otra parte no muestra la metodología para el uso de estos conceptos, mencionando que para futuros estudios de energía específica en campo se tendrá la necesidad de demostrar su simplicidad, exactitud y utilidad al seleccionar la barrena.

En 1987 Rabia y colaboradores⁸, complementan sus estudios y realizan una serie de simplificaciones para que las ecuaciones propuestas sean aplicadas a datos de perforación en campo para calcular la energía específica cuando la barrena esta perforando. La ecuación que propone podrá ser utilizada para todos los tipos de barrenas tri-cónicas y sería un indicativo de la relativa eficiencia de perforación, además sugiere que se deberá desarrollar la correlación entre la energía específica y el tiempo de viaje sónico de los datos sísmicos para ayudar quizás en la selección de la barrena.

Dicho estudio⁸ lo aplicaron en tres pozos del mar del Norte, detallando los parámetros de perforación de los datos disponibles. Muestran que la energía específica es un indicativo del cambio de litología y la correcta selección de barrena basada en su desempeño. No debe entenderse que solo con el valor de energía específica sea suficiente para seleccionar barrenas, sino que en conjunto con la información de otros métodos normalmente usados así como del estudio de los registros de barrenas y costo por pie perforado serian de gran utilidad.

Pessier⁹ (1992) utiliza tres parámetros claves para la selección de barrenas que son: la eficiencia mecánica, la energía específica y el coeficiente de superficie de deslizamiento de fricción de la barrena, junto con el diagnostico de fallas en diferentes practicas de perforación, modifica los conceptos estudiados por Teale a condiciones atmosféricas, ampliándolos para ser aplicados en perforación bajo condiciones de presión hidrostática, con el único fin de hacerlos aplicables a la perforación de campos de aceite.

Para 1996 Reddish¹⁰, mediante un taladro portátil de pruebas para perforar núcleos en laboratorio determinó el índice de esfuerzo de roca basado en la Energía Específica de perforación. La metodología inicial fue investigar la relación entre el tipo de roca y la energía específica. Observando una relación básica que consiste en el aumento de la energía específica con el esfuerzo de la roca. Sin embargo, el control del empuje en la barrena fue difícil e impráctico y los resultados mostraron claramente una reducción en la energía específica cuando el empuje fue incrementado.

Reddish demuestra, que una roca puede perforarse eficazmente o ineficazmente dependiendo del empuje en la barrena y que el ritmo de penetración máximo ocurre al mismo tiempo cuando la eficiencia de corte es mayor y la energía específica es mínima.

2.2 Predicción de la resistencia a la compresión de las rocas.

Otros investigadores como Elkington y colaboradores¹¹ en 1982 realizaron un estudio exhaustivo de los diferentes registros con línea de acero que se emplean comúnmente en perforación para tratar de predecir el esfuerzo compresivo de la roca, a partir de las propiedades elásticas dinámicas de la misma en un afán de optimizar la perforación. Este estudio, se realizó con nueve núcleos de roca tomados a diferentes profundidades en los campos de Nottinghamshire y Staffordshire Coal, los cuales fueron sometidos en el laboratorio a pruebas de esfuerzo uniaxial y triaxial. Lo anterior para comparar los resultados determinados con los obtenidos por medio de registros geofísicos. Concluyeron que, presentan una buena aproximación cualitativa del esfuerzo compresivo si se combinan con otros registros como el de calibración, de densidad, sísmico, rayos gamma natural, microresistividad, y el neutrón.

Falconer y colaboradores¹² publicaron en 1988, sobre la interpretación de perforación a tiempo real. Explican cómo inferir los cambios litológicos y el diagnóstico de la condición de la barrena empleando algún tipo de normalización del ritmo de penetración. Esto frecuentemente lleva a resultados ambiguos o confusos porque es imposible separar los efectos de la barrena de los efectos de la litología con sólo una medida. Falconer muestra el parámetro de torque en el fondo del agujero, cómo una segunda medida que puede emplearse junto con el ritmo de penetración para evidenciar y separar los efectos de la barrena de los efectos de litología, al perforar con barrenas de

fricción o barrenas PDC. Apoyándose todo lo anterior en los datos registrados por la herramienta MWD.

En 1988, Onyia¹³ estudia las relaciones existentes entre la resistencia a la perforación de la roca y algunas propiedades de los registros con línea de acero. En este estudio Onyia muestra como la resistencia a la perforación de una formación se puede estimar a través de datos de registros. Esta cuantificación es de especial significado para optimizar las operaciones de perforación. El trabajo de Onyia consistió en generar un registro sintético de resistencia en forma continua partiendo de datos geológicos y de perforación de un pozo de Oklahoma (DM#2). Posteriormente compara estos resultados con los obtenidos en muestras de núcleo. Onyia encontró buenas correlaciones entre los tiempos de viaje sínicos, la porosidad, la resistividad de la formación y la resistencia de la roca. Sin embargo la suposición de que las correlaciones mostradas en este artículo pudieran emplearse para todas las geologías no fue válida. Siendo posible solo el uso de algunas de ellas para obtener una aproximación del registro de esfuerzo continuo de la roca para cada área en particular. Warren¹⁴ y otros investigadores muestran de que manera la resistencia de la roca puede determinarse para barrenas de conos.

Andersen¹⁵ en 1993 realiza un estudio comparativo de diferentes barrenas de perforación haciendo hincapié en las barrenas PDC, Andersen explica la importancia que tiene en el buen desempeño de la barrena, el tipo de cortador que se emplea, así como el corte que se realiza. Detallando las ventajas y desventajas que existen al emplear una barrena PDC y una convencional de conos. Sobre este tema existe muy poca literatura por lo que representa un área de oportunidad, el profundizar en el estudio de los temas relacionados con los parámetros que afectan a la perforación de rocas cuando se emplean barrenas PDC.

Richard y colaboradores¹⁶ en 1998, haciendo uso de un método experimental para evaluar el esfuerzo compresivo en rocas sedimentarias. Publicaron un procedimiento para medir la fuerza requerida para rayar un núcleo de roca. El estudio consistió en realizar una ralladura de 1mm de profundidad o menor, a un núcleo de roca, midiendo la fuerza requerida para rayar con un cortador PDC. Las observaciones experimentales del corte en rocas, indican que existe un mecanismo plástico de falla a pequeñas profundidades de corte. Este modo de corte también es llamado ralladura. Estos experimentos muestran

que la fuerza en la cara de corte es proporcional al área de sección transversal del surco y que la energía específica intrínseca (Es), parece estar bien correlacionada con el esfuerzo compresivo uniaxial.

Un aspecto substancial de este esfuerzo de investigación sobre los modelos de corte es establecer la dependencia de la fuerza de corte con los parámetros mecánicos de la roca.

Los experimentos con el dispositivo de prueba en núcleos, mostraron que es posible obtener una medida del esfuerzo de la roca de las pruebas de recortes y que el procedimiento es simple dado que solo involucra recortes de un núcleo de roca. Esto es una perspectiva interesante dado que no existen otros métodos actualmente disponibles que provean un registro de parámetros de esfuerzo compresivo de la roca.

En 1993 J.P. Sarda y Nicolás Keesler¹⁷, realizaron un estudio en pruebas de laboratorio para areniscas saturadas y secas en una amplia variación de contenido de cuarzo, determinando una correlación semiempírica para calcular el esfuerzo compresivo de la roca llegando a la ecuación:

$$Co = 258 * e^{(-9*\phi)} \dots\dots\dots(1)$$

Concluyendo en su trabajo que la saturación y la composición mineralógica no son factores determinantes en lo que compete al esfuerzo compresivo de la roca.

En el año 2001, Gustavo Gutiérrez Escobedo¹⁸, desarrolla una correlación a partir de datos de registros geofísicos que determina en forma semiempírica el valor de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca, obteniendo buenos resultados.

Gutiérrez¹⁸ plantea una metodología para calcular las propiedades elásticas y de falla de la roca, haciendo uso del método de autoconsistencia. Con este método obtiene las ecuaciones normalizadas para la impedancia acústica y el módulo de ondas P (módulo M) cuyo comportamiento con la porosidad es el mismo que el de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca. Los estudios realizados fueron establecidos para dos tipos de rocas la caliza y la arenisca.

Son varios los estudios realizados, para conocer la energía específica de las rocas a partir de estadísticas de barrenas, de costos de perforación y de parámetros operativos, a su vez se presentan los estudios que pretenden de alguna forma conocer o medir la resistencia a la compresión uniaxial de la roca a través de registros geofísicos, de pruebas de laboratorio y de análisis de núcleos. En cada estudio realizado en forma particular se tienen resultados aceptables. Sin embargo, no se ha podido establecer la relación que guardan unos con otros. En este estudio se pretende encontrar la relación que permita conjuntar estos dos parámetros que cuentan con características similares, relacionándolos de tal manera que se obtenga una correlación para estimar la resistencia a la compresión en sitio de la roca. La selección de la barrena, el fracturamiento hidráulico, las correlaciones entre pozos para establecer la geología del campo, tendrían una mayor confiabilidad, si se encuentran fundamentados en el conocimiento de la resistencia a la compresión en sitio de la roca, conocimiento que se traduciría en beneficios económicos para Pemex Exploración y Producción (PEP).

Capítulo 3.

Desarrollo de correlaciones para estimar energía específica y resistencia a la compresión.

En este capítulo se emplean los conceptos básicos descritos con anterioridad y se aplican al análisis de datos de laboratorio¹⁹, para el desarrollo de correlaciones fundamentales entre los parámetros de perforación y la resistencia a la compresión de la roca.

3.1 Conceptos básicos.

Sobre la base de la definición de energía específica y de los conceptos básicos empleados en su desarrollo se procede con la derivación de los términos que relacionan a la energía con los parámetros de perforación obtenidos en campo. Las ecuaciones resultantes serán aplicadas a los datos obtenidos en pruebas de laboratorio¹⁹, para diferentes tipos de rocas bajo condiciones iguales de presión, temperatura y fluido de perforación.

La energía específica de perforación (E_s) se define como el trabajo realizado para fragmentar una unidad de volumen de roca⁴:

$$E_s = \frac{W}{V} \dots\dots\dots(2)$$

por la definición de trabajo (W) tenemos:

$$W = F * d \dots\dots\dots(3)$$

el volumen de roca perforado (V) se puede calcular por la siguiente expresión⁵:

$$V = \pi d^2 * \left(\frac{Rop}{N} \right) \dots\dots\dots(4)$$

Durante la perforación la energía total del sistema involucra la energía torcional y energía axial, derivadas de los trabajos realizados por el torque T [pg.lb] y el peso sobre barrena Wob [lb]. Los parámetros involucrados son: la velocidad de rotación N [rev/min],

el área del agujero perforado A [pg^2] y el ritmo de penetración o perforación Rop [pg/min], por lo que el trabajo total realizado en un minuto es:

$$W = Wob * Rop + 2\pi * N * T \dots\dots\dots(5)$$

el volumen de roca perforado en un minuto es:

$$V = A * Rop \dots\dots\dots(6)$$

Por lo que la ecuación de la energía específica en función de los parámetros de perforación nos queda como:

$$Es = \left(\frac{Wob}{A} \right) + \left(\frac{2\pi}{A} \right) \left(\frac{N * T}{Rop} \right) \dots\dots\dots(7)$$

Usando los subíndices a y t para denotar la energía axial y torcional, los componentes de la energía específica Es , son:

$$Ea = \left(\frac{Wob}{A} \right) \dots\dots\dots(8)$$

$$Et = \left(\frac{2\pi}{A} \right) \left(\frac{N * T}{Rop} \right) \dots\dots\dots(9)$$

De las ecuaciones anteriores y de los estudios realizados por Teale⁵, la expresión para el cálculo de la energía específica basado en pruebas de laboratorio bajo condiciones de presión atmosférica (Es_T), es:

$$Es_T = \frac{Wob}{A_B} + 120\pi \left(\frac{N * T}{A_B * Rop} \right) \dots\dots\dots(10)$$

Como se mencionó en el capítulo anterior, Rabia⁸ encontró una ecuación de energía específica basada en datos de operación para ser usada en campo (E_{sR}), la cual se expresa como (ver Apéndice 1):

$$E_{sR} = 20 \left(\frac{Wob * N}{d * Rop} \right) \dots\dots\dots(11)$$

Donde:

- Wop.- peso sobre barrena, (lbf)
- N.- velocidad de rotaria, (rpm)
- d.- diámetro de la barrena, (pg)
- Rop.- Relación de penetración, (ft/hr)
- A_B.- Área del agujero, (pg²)

Las Ecuaciones 10-11 se utilizaron para el análisis de datos de laboratorio y desarrollo de las correlaciones en este trabajo. El concepto de energía específica y las ecuaciones analíticas 10 -11, se han empleado con cierto grado de éxito para barrenas triconicas pero no así para barrenas PDC.

3.2 Análisis de pruebas de laboratorio

Se utilizó la información de 16 pruebas de laboratorio¹⁹. Durante las pruebas se emplearon dos diferentes tipos de barrenas PDC de un mismo diámetro (8 ½ pg) con dos diferentes tipos de fluidos de perforación uno base agua y otro base aceite, para cuatro diferentes tipos de rocas, Lutita 1 (semidura), Lutita 2 (suave), Carbonatos, y Arenisca. Las pruebas consistieron en variar los diferentes parámetros de perforación como son peso en la barrena y velocidad de rotación, midiendo el torque y el ritmo de penetración resultantes.

Empleando la información experimental descrita, el análisis realizado consistió en calcular para cada una de las muestras de roca, la energía específica requerida para perforarlas. Con la aplicación de las ecuaciones previamente derivadas se pudo observar y obtener cierta tendencia o característica que relacionan a los diferentes tipos de rocas. Los datos de las pruebas así como los resultados obtenidos de las energías específicas calculadas con las ecuaciones de Teale (Ecuación 10) y Rabia (Ecuación 11) se presentan en las Tablas 7-18 del Apéndice 2. Se puede observar que los valores de

energía específica de Rabia son mayores en magnitud que los valores de energía específica de Teale debido a la simplificación empleada por Rabia.

Las gráficas de los mismos (Figuras 36-47) muestran una tendencia clara de las relaciones que existen entre los diferentes tipos de roca. Los parámetros de perforación, y el tipo de fluido empleado facilitan o dificultan la perforabilidad de la roca. Esto indica la existencia de una combinación de parámetros y fluidos de perforación óptima que permita perforar una roca de manera eficiente.

En las Figuras 36-47 se observa como la energía específica requerida para perforar la roca presenta cierta tendencia y características similares entre una roca y otra, aun variando las condiciones de operación.

Para ejemplificar estas similitudes empleamos los datos de los Carbonatos Tablas 1-4, las gráficas se muestran por paquetes de los diferentes análisis realizados (Figuras 1-4).

La Figura 1, representa un análisis de energía específica requerida contra la penetración por revolución de la roca. Este tipo de gráfica resulta muy representativa ya que se puede apreciar fácilmente la tendencia de tipo potencial que guardan los datos entre si. También se observan los efectos que causan el fluido de perforación y el diseño de cortadores. En esta gráfica se observa que a mayor penetración por revolución se requiere menor valor de energía específica. Es decir la perforación se vuelve mas eficiente conforme el ritmo de perforación aumenta.

La Figura 2, muestra la importancia que tiene el peso sobre la barrena en el parámetro de energía específica, observándose que esta aumenta de forma inversa al valor de penetración por revolución guardando un comportamiento semejante con el de la Figura 1.

La Figura 3, muestra el impacto del peso sobre barrena en la penetración por revolución, en donde a mayor peso sobre barrena tenemos potencialmente mayor penetración por revolución.

En la Figura 4, se presenta el torque característico contra la penetración por revolución. Este parámetro de torque es difícil de medir en superficie, pues es

dependiente de diversos factores. El torque es el resultado de la interacción de las fuerzas normal y tangencial que se generan en el fondo del pozo. Es de esperarse que el torque se incremente a medida que la penetración de la barrena se incrementa, como se observa en esta gráfica.

Las gráficas y tablas complementarias de los diferentes tipos de roca analizados se encuentran en el Apéndice 2, Tablas 5-16 y Figuras 5-16. Las tendencias descritas para carbonatos son similares para los diferentes tipos de roca empleados.

Prueba 3, datos de perforación en carbonatos.

Barrena 8,5 pg Tipo I **Lodo** 12 lb/gal
Toberas 4) 11/32" 0.37 pg² Base Aceite

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	$p=Rop/N$ (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabia (lb/pg ²) Ecuación 11
1	2,2	0,0042	4848	2445	81	127928,45	274110,73
2	3	0,0162	10800	4857	81	73467,16	140255,61
3	4,1	0,0352	19284	7287	81	61028,23	97803,98
4	4,7	0,0043	3792	2408	141	98713,16	266296,47
5	5,6	0,0149	10020	4861	141	74579,39	153591,26
6	7,3	0,037	18336	7267	142	55147,20	92673,01
7	8,1	0,0039	3588	2477	351	102578,80	300839,79
8	9,7	0,0142	9516	4828	351	74350,11	160134,94
9	12,4	0,0326	18816	7339	352	134445,86	222652,70
10	13,9	0,019	11184	4829	81	65219,98	119526,05
11	15,1	0,0191	10704	4833	141	61979,89	118771,76
12	16,9	0,0146	9960	4865	352	75610,78	156784,62
13	18,2	0,0204	11676	4912	142	63391,35	113185,23
14	19,4	0,0192	12000	4873	142	69452,86	119717,30
15	20,2	0,0175	11640	4889	141	73363,98	130806,26
16	21,7	0,0237	14520	4899	143	68106,56	97536,65
17	22,1	0,0055	4848	2466	80	97643,96	210994,65
18	23	0,0201	11652	4871	82	64595,18	114611,76
19	24,1	0,0381	19608	7298	82	57190,31	90261,84
20	24,8	0,0062	4680	2446	141	83072,99	184431,02
21	26	0,0177	10716	4875	140	67068,39	129506,64
22	27,6	0,035	19104	7372	141	60506,51	99019,00
23	28,9	0,0057	4584	2410	350	88867,38	198470,59
24	30,2	0,0163	10416	4884	349	70950,81	141219,22
25	32,1	0,0362	19464	7324	348	59653,18	95191,48

Tabla 1. Datos de las pruebas de laboratorio de la formación de carbonatos, fluido base aceite, barrena tipo I.

Prueba 8, datos de perforación en carbonatos.

Barrena 8,5 pg Tipo I Lodo 12 lb/gal
 Toberas 4) 11/32" 0.37 pg² Base Agua

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	$p=Rop/N$ (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabiá (lb/pg ²) Ecuación 11
1	3	0,0174	8196	3014	80	51911,15	81048,74
2	4,4	0,0461	18192	6087	82	44037,00	62469,84
3	5,6	0,0632	26784	9145	81	47263,49	68350,17
4	6,7	0,0134	6696	3056	141	55660,78	107858,82
5	8,5	0,0402	16608	6058	142	46406,52	71776,05
6	10,3	0,0556	23664	9188	352	117207,96	193142,79
7	11,9	0,0131	7500	3030	351	63420,33	108801,02
8	14,9	0,0348	16464	6079	353	52854,69	82772,88
9	18,2	0,0475	22560	9229	81	12235,28	20989,72
10	20,2	0,0396	16824	6054	141	81679,35	124751,77
11	21,9	0,0372	15960	6147	351	118483,56	193767,13
12	24,7	0,296	14868	6095	142	22585,51	39162,44
13	26,2	0,0381	15900	6179	142	46404,93	76463,44
14	27,5	0,0295	13644	6129	141	50826,19	96827,90
15	28,7	0,0293	14508	6133	141	54819,56	98295,31
16	29,7	0,0252	12828	6109	82	32824,77	66217,85
17	30,1	0,0078	4968	3097	81	69675,34	184453,68
18	31,5	0,0372	14784	6096	80	43760,30	76498,82
19	33	0,0624	24720	9219	80	43957,07	69413,65

Tabla 2. Datos de las pruebas de laboratorio de la formación de carbonatos, fluido base agua, barrena tipo I.

Prueba 11, datos de perforación en carbonatos.

Barrena 8,5 pg Tipo II Lodo 12 lb/gal
 Toberas 4) 11/32" 0.37 pg² Base Agua

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	$p=Rop/N$ (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabiá (lb/pg ²) Ecuación 11
1	2,2	0,0065	5700	3159	80	97154,42	228705,88
2	3,4	0,0177	12036	6075	80	75189,08	161060,48
3	4,8	0,0329	20544	9084	81	69429,34	130173,20
4	5,2	0,0059	5172	3143	141	96183,51	248270,59
5	6,2	0,0163	10560	6075	140	71904,54	175541,80
6	8,3	0,0303	18624	9073	140	68250,51	140978,91
7	9,5	0,0069	5076	3093	350	82019,90	212264,71
8	11,1	0,0159	10800	6083	351	75329,88	180066,03
9	13,5	0,0276	18132	9050	352	73016,06	154547,00
10	15	0,0227	13416	6086	80	65404,33	125890,11
11	16,5	0,0199	12528	6115	140	69466,93	143882,35
12	18,5	0,0153	10848	6127	351	78766,20	188812,73
13	19,8	0,0224	14184	6144	141	72476,60	133226,30
14	21,1	0,0183	12240	6109	141	74176,06	157112,45
15	22,7	0,0175	11712	6135	140	73911,47	164304,16
16	24,1	0,0156	10920	6100	141	77602,06	183978,61
17	24,5	0,009	6564	3098	80	80811,23	161986,93
18	25,5	0,0216	13680	6134	81	69820,59	132848,66
19	26,7	0,0337	22440	9110	80	74330,87	127971,91
20	27,4	0,0071	5520	3116	141	86235,67	206755,76
21	28,7	0,0178	12108	6109	140	75185,64	160990,12
22	30,1	0,0327	19992	9096	141	68013,39	131205,73
23	31,2	0,0075	5604	3137	350	82948,12	197207,00
24	32,5	0,0171	11172	6046	350	72267,10	165968,63

Tabla 3. Datos de las pruebas de laboratorio de la formación de carbonatos, fluido base agua, barrena tipo II.

Prueba 16, datos de perforación en carbonatos.

Barrena
Toberas

8,5 pg
4) 11/32"

Tipo II
0,37 pg²

Lodo 12 lb/gal

Base Aceite

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	p=Rop/N (pg/rev)	Torque (lb . pg)	Wob (lb)	RPM	Energia especifica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energia especifica de Rabia (lb/pg ²) Ecuación 11
1	2,2	0,0209	13116	6139	81	267461,69	531827,81
2	3,3	0,019	12060	6146	81	70344,95	152124,06
3	4,5	0,0333	18804	9187	80	62314,25	129053,56
4	5,4	0,0209	13116	6139	141	196167,42	390007,06
5	6,9	0,0161	10488	6106	140	72688,92	179588,24
6	8,5	0,0288	17904	9171	140	68860,37	149556,20
7	9,6	0,0209	13116	6139	351	62680,28	124470,34
8	11	0,011	8916	6149	350	90091,06	263743,87
9	13,2	0,0269	17184	9174	351	71059,45	160862,94
10	14,4	0,0209	13116	6139	81	69305,56	137649,55
11	15,6	0,0177	11448	6109	140	71665,64	162288,43
12	17,1	0,0108	9204	6129	351	94741,33	267821,85
13	18,4	0,019	12600	6267	140	73539,51	154972,14
14	19,7	0,0145	10584	6185	140	80535,62	199746,25
15	20,9	0,0168	11220	6208	140	73808,30	173304,09
16	21,9	0,0141	10200	6140	140	79965,60	204301,84
17	22,3	0,0209	13116	6139	81	202928,09	403455,58
18	23,5	0,0203	12804	6145	81	70131,01	142824,96
19	24,8	0,0365	21564	9180	80	65578,47	118356,16
20	25,4	0,0209	13116	6139	141	168158,96	334291,76
21	26,6	0,0173	10296	6133	140	66060,90	166965,48
22	27,9	0,0283	18528	9180	141	72842,08	153045,23
23	29,3	0,0168	11220	6208	352	80632,28	189350,76
24	30,7	0,0165	10500	6084	351	70466,36	173264,42
25	31,9	0,026	17124	9072	347	73264,41	164600,47

Tabla 4. Datos de las pruebas de laboratorio de la formación de carbonatos, fluido base aceite, barrena tipo 2.

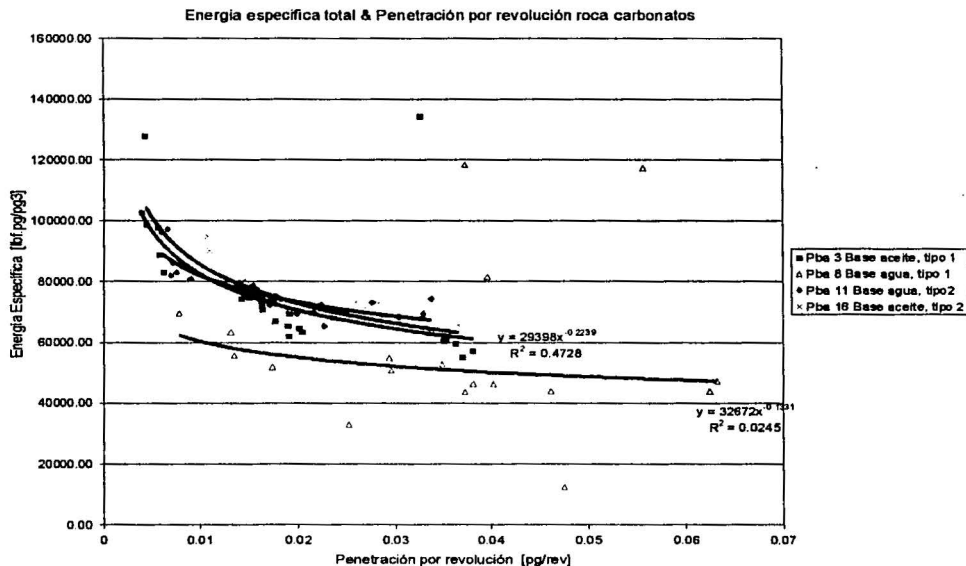


Figura 1. Energia especifica total de Teale como una función de la velocidad de penetración, (Rop) en carbonatos.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Energía específica total & Peso sobre barrena roca carbonatos

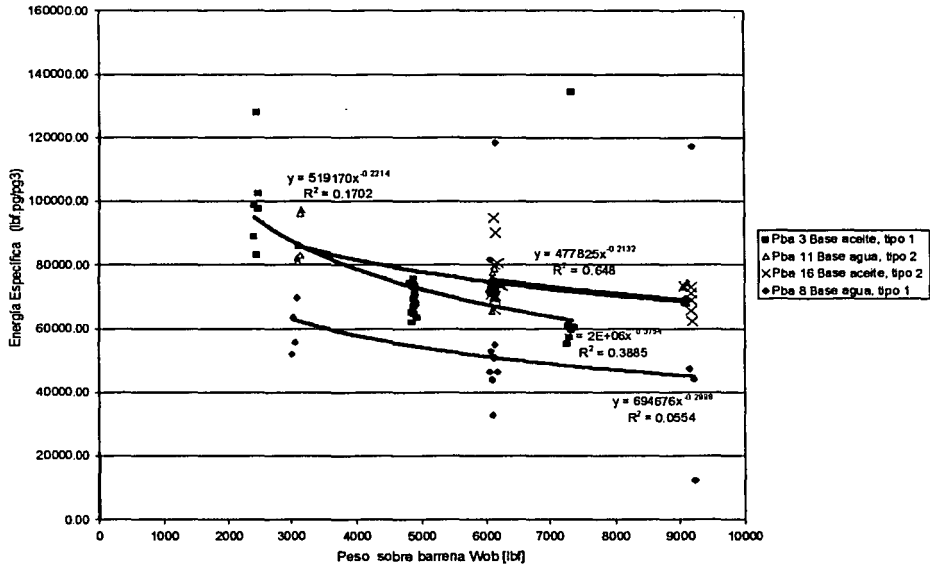


Figura 2. Energía específica total de Teale como una función del peso sobre barrena, (Wob) en carbonatos.

Penetración por revolución & Peso sobre barrena roca Carbonatos

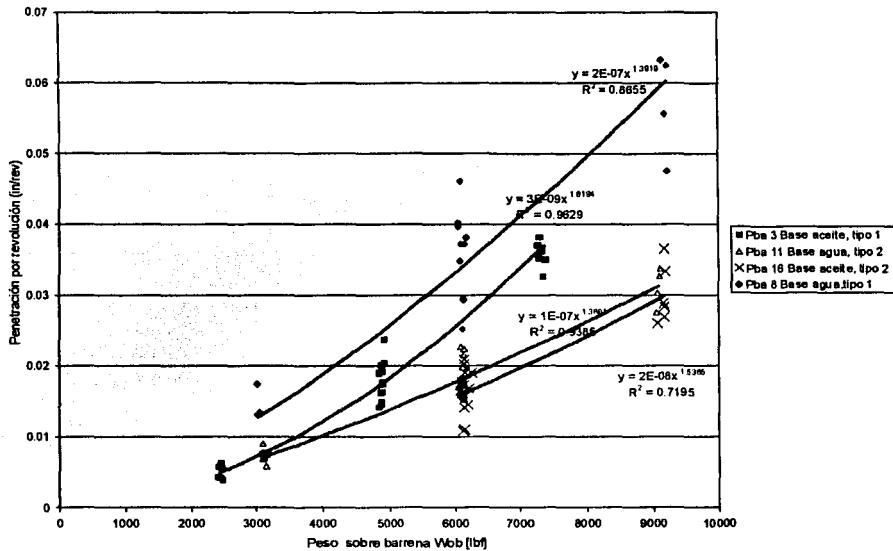
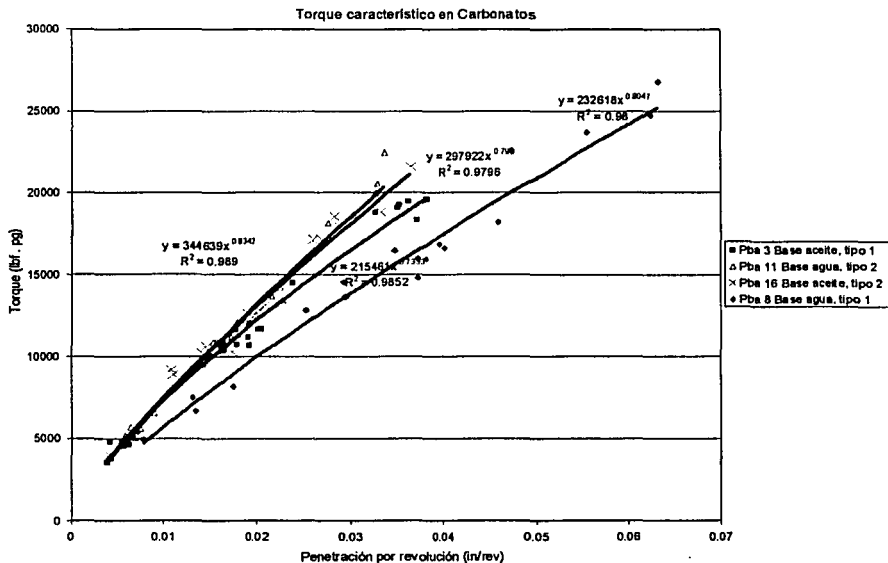


Figura 3. Penetración por revolución como una función del peso sobre barrena, (Wob) en carbonatos, fluido 12 (lb/gal), barrena 8 ½ (pg)..

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 4. Torque característico como función de la penetración por revolución, (Rop), en carbonatos, fluido 12 (lb/gal), barrena 8 ½ (pg).

3.3 Resistencia a la compresión de las rocas utilizadas.

Las pruebas de laboratorio se realizan dentro de camisas o cámaras que simulan las condiciones del pozo, de tal manera tenemos pruebas a presión constante y pruebas con fluidos de perforación en donde la muestra de roca se sumerge en fluido y la presión hidrostática ejercida por este se ve compensada por la presión de la muestra como se muestra en la Figura 5.

Con los esfuerzos principales de las pruebas de laboratorio y empleando la teoría del método de los círculos de esfuerzos de Mohr²² se construyó la envolvente de falla, para poder visualizar el estado de esfuerzos en la roca, (Figura 9). Mohr encontró que la falla de corte ocurre cuando los esfuerzos de corte (τ) a lo largo de alguno de los planos de la muestra son grandes. Por lo que al unir por medio del círculo de Mohr los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 encontramos una región segura, de esta manera al estar trabajando dentro de esta región no se presentará la falla debida a los esfuerzos de corte (τ), no siendo lo mismo para los valores fuera de esta zona.

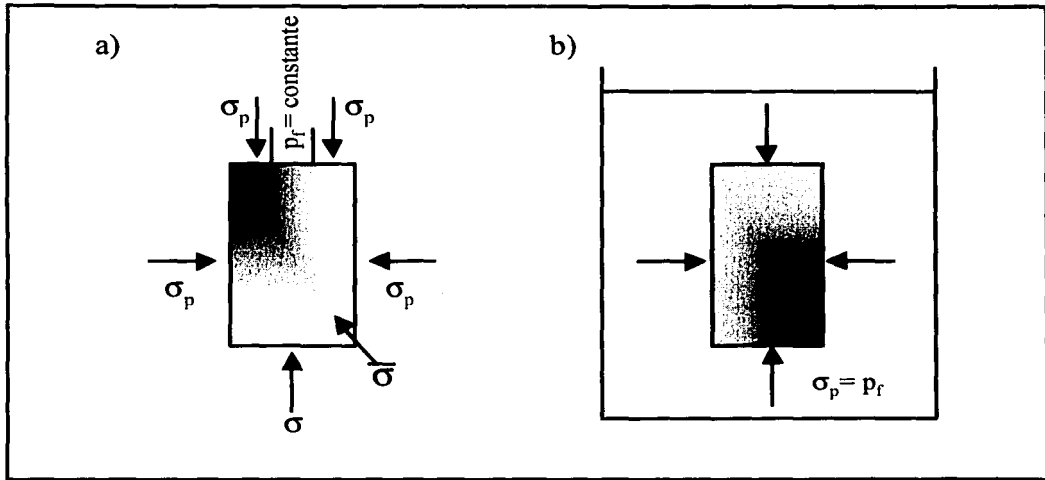


Figura 5.- Cámaras de muestras de pruebas de esfuerzo compresivo uniaxial
a) presión constante y b) presión de poro constante.

Las Figuras 6-8 muestran las envolventes de falla para los diferentes tipos de rocas analizados. Donde se observa la región en la cual, las rocas son estables.

Con estas gráficas se procedió al cálculo del esfuerzo compresivo de las muestras de roca aplicando la teoría de Mohr- Coulomb, (Figura 10).

La Tabla 5 muestra un resumen de las diferentes propiedades físicas, mecánicas y de transporte de la roca como son la porosidad ϕ (%), la densidad ρ (gm/cm^3), la saturación de agua de la muestra S_w (%), la presión de confinamiento (psi), el valor de resistencia a la compresión σ (psi), el módulo de young y la velocidad ultrasónica (ft/seg).

3.4 Mecanismos de corte de la roca.

En teoría se conocen dos diferentes tipos de mecanismo de corte de la roca que se presentan durante la perforación y que provocan diferencias considerables y notables en la eficiencia de perforación de las rocas, estos son:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

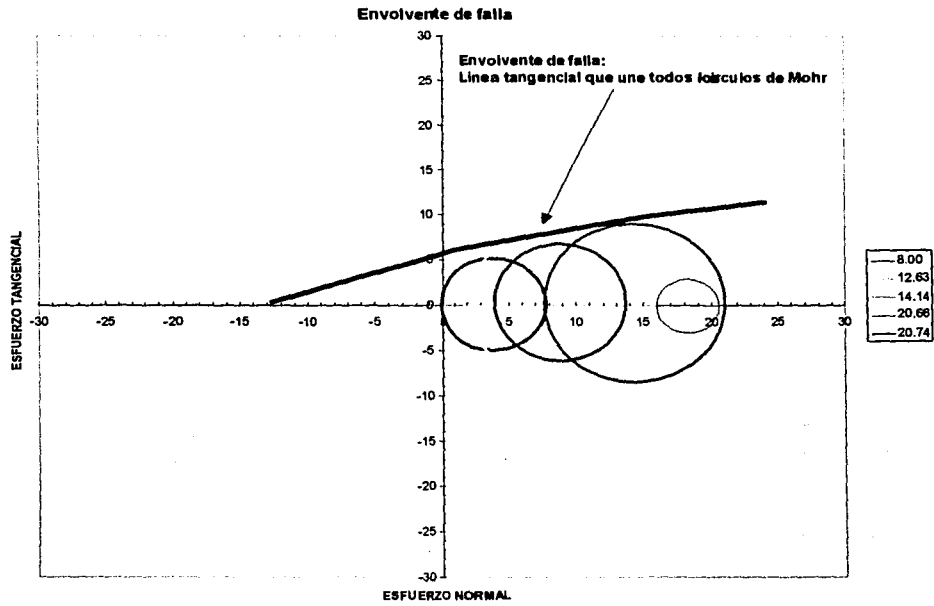


Figura 6.- Envolvente de falla en roca lutita tipo 2.

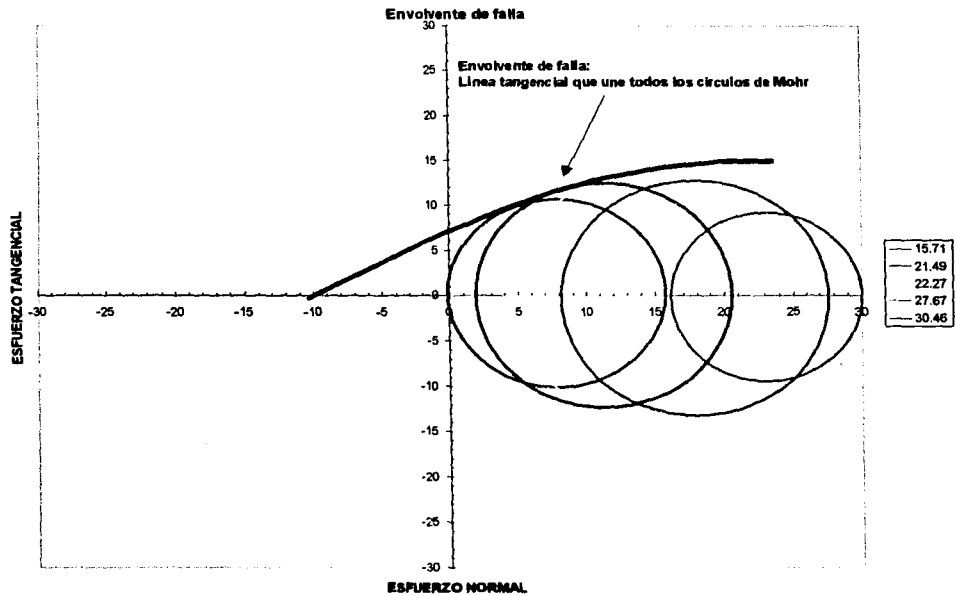


Figura 7.- Envolvente de falla en roca carbonatada.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

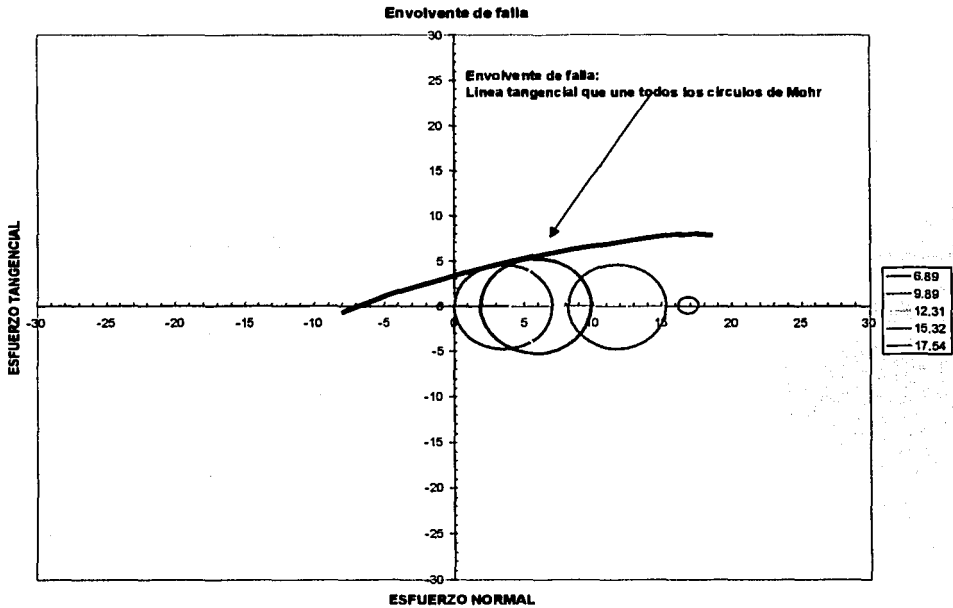
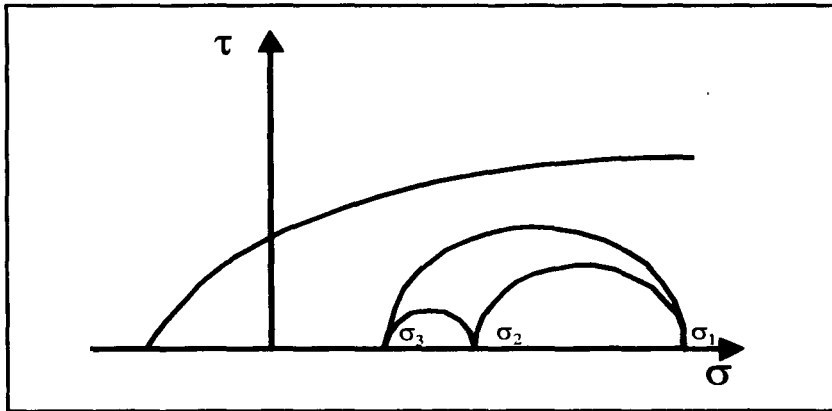


Figura 8.- Envolvente de falla en roca arenisca.



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Figura 9. Ejemplo de una función de Mohr en donde se muestra el círculo que conecta los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 , y σ_3 .

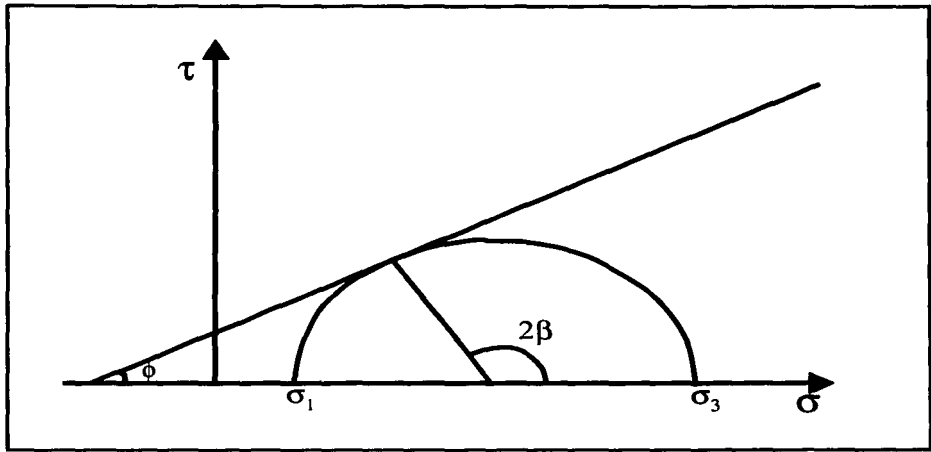


Figura 10.- Criterio de Mohr-Coulomb en la zona de esfuerzo de corte - esfuerzo ($\tau - \sigma$). Donde también se muestra el círculo de Mohr del estado crítico de esfuerzos.

Tipo de roca	ϕ (%)	ρ (gr/cm ³)	Sw (%)	k (md)	P. Conf. (lb/pg ²)	σ (lb/pg ²)	Modulo de Young	Velocidad Ultrasonica (ft/seg)		k_i
								long.	corte	
Lutita I	9.70	2.56	93.10	2.0	0	726	0.12	8,660	5,160	<10 ⁴ d
					2,000	1,244	0.13			
					4,000	909	0.08			
					8,000	1,250	0.13			
					16,000	976	0.04			
Lutita II	3.80	2.64	94.10	< 0.01	0	8,000	1.10	13,900	8,050	<10 ⁴ d
					2,000	14,634	1.20			
					4,000	18,140	0.98			
					8,000	28,659	0.93			
					16,000	36,738	1.40			
Carbonatos	1.90	2.70	50.30	< 0.01	0	15,707	5.00	19,200	10,700	<10 ⁴ d
					2,000	23,488	4.60			
					4,000	26,268	5.50			
					8,000	35,671	5.00			
					16,000	46,463	3.20			
Arenisca	20.70	2.66	57.50	315	0	6,886	1.30	11,000	6,270	45.8 md
					2,000	11,890	1.80			
					4,000	16,310	1.90			
					8,000	23,323	1.70			
					16,000	33,537	2.30			

* Resistencia uniaxial a la compresión.

Tabla 5. Resumen de propiedades físicas, mecánicas y de transporte de las rocas.

-
- Mecanismo de Pulverización: como su nombre lo indica, este mecanismo consiste en remoler los recortes en fragmentos muy pequeños, dando con ello una deficiencia en la perforación ya que la mayor parte de la energía mecánica que se suministra en superficie se gasta al estar remoliendo los recortes ya generados.
 - Mecanismo de Fragmentación: en este mecanismo se presenta la mayor eficiencia en la perforación, donde la mayor cantidad de energía suministrada en superficie se emplea prácticamente en su totalidad en la generación de recortes y fragmentos de roca de tamaño considerable que pueden ser acarreados a la superficie por el lodo sin mayor problema.

Para el análisis se emplearon los valores de esfuerzo obtenidos en la sección anterior, diseñándose las gráficas adimensionales de energía específica contra el ritmo de penetración para cada una de las muestras de roca, Figuras 11-14.

El análisis que se hizo de las mismas consistía en la aplicación de alguno de los métodos de ajuste conocidos para llegar a obtener las curvas tipo que representarán la energía específica de las rocas en forma general.

En todas las gráficas se puede apreciar perfectamente los dos diferentes mecanismos de corte presentes en la perforación. Así también se observa como el ritmo de penetración por revolución disminuye, para valores muy grandes de energía específica. Por lo tanto existe un valor óptimo de energía específica, para el cual el ritmo de penetración es mayor.

En la Figura 11, se observa dentro del mecanismo de corte de pulverización, (línea a), una gran dispersión de datos debido a que, cuando se presenta este mecanismo de corte se corre el riesgo de tener el problema de embolamiento de la barrena (efecto talco), el valor que se lee de la gráfica para cambio de mecanismo de corte se ubica aproximadamente en 0.04 (pg/rev). También podemos apreciar que el valor óptimo adimensional de energía específica con el cual se tiene un mayor ritmo de penetración por revolución. Este valor oscila dentro del rango de (6 a 10). Para valores mayores a 10 la eficiencia en la perforación baja considerablemente al haber menor ritmo de penetración por revolución.

La Figura 12 que corresponde a una muestra de roca suave (lutita tipo 2), muestra dos líneas de tendencia bien definidas, la línea a) donde a mayores valores de energía específica se tiene una baja penetración por revolución dando lugar al mecanismo de corte de pulverización, la línea b) por el contrario, muestra que el ritmo de penetración por revolución es inversamente proporcional a la cantidad de energía específica suministrada, presentándose el mecanismo de fragmentación de la roca, el valor que se aprecia para el cambio de mecanismo de corte se ubica aproximadamente en 0.06 (pg/rev). De igual forma, se puede observar la existencia de un valor óptimo adimensional de energía específica con el cual se tiene un mayor ritmo de penetración por revolución. Este valor se encuentra ubicado dentro del rango de 2 a 3, (en la intersección de curvas).

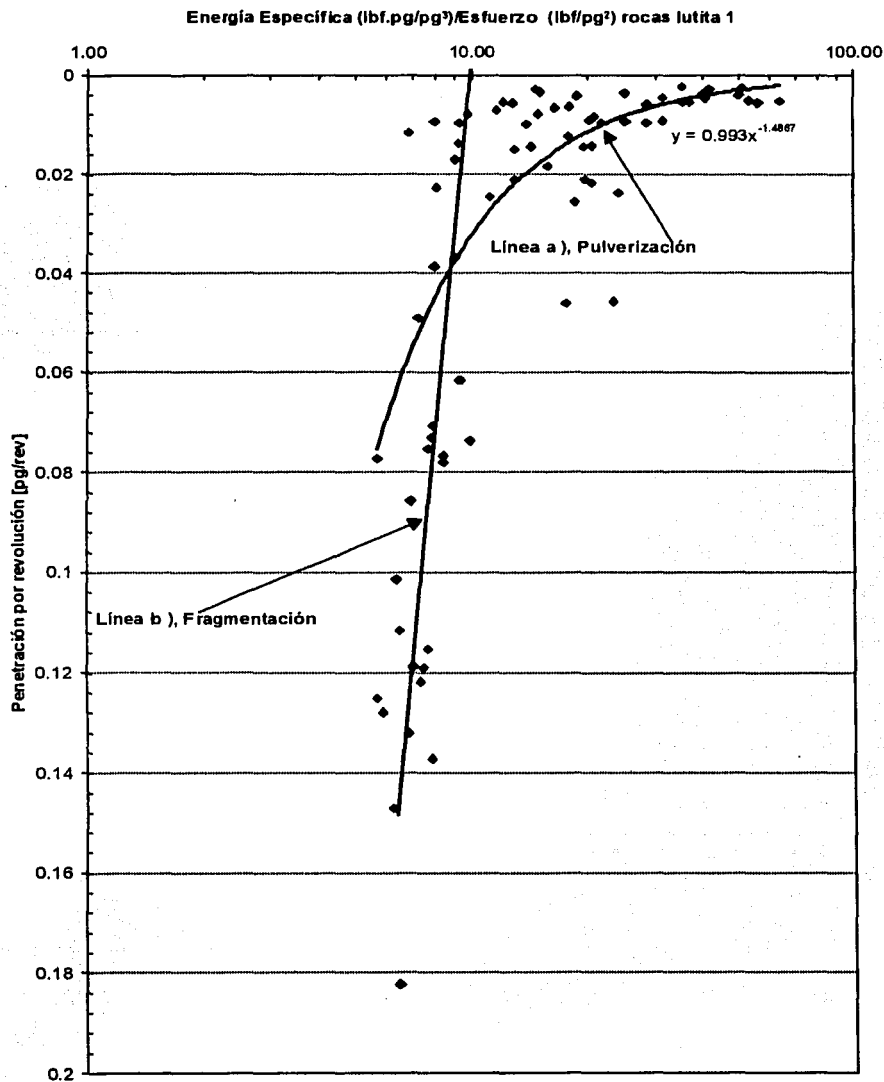
En las rocas Carbonatadas y Areniscas, Figuras 13-14 respectivamente, se observan bien definidas las curvas de los diferentes mecanismos de corte, para la roca Carbonatos el valor de cambio de mecanismo de corte es aproximadamente 0.02 (pg/rev) y de 0.05 (pg/ rev) para la Arenisca. En estas gráficas se puede apreciar también que a mayor requerimiento de energía específica se tiene un menor ritmo de penetración por revolución en la roca.

Se podría decir que el conocimiento de los valores aproximados en que se presentan los dos diferentes mecanismos de corte, es muy útil en la perforación como un indicativo para la optimización de operaciones.

3.5 Desarrollo de las correlaciones.

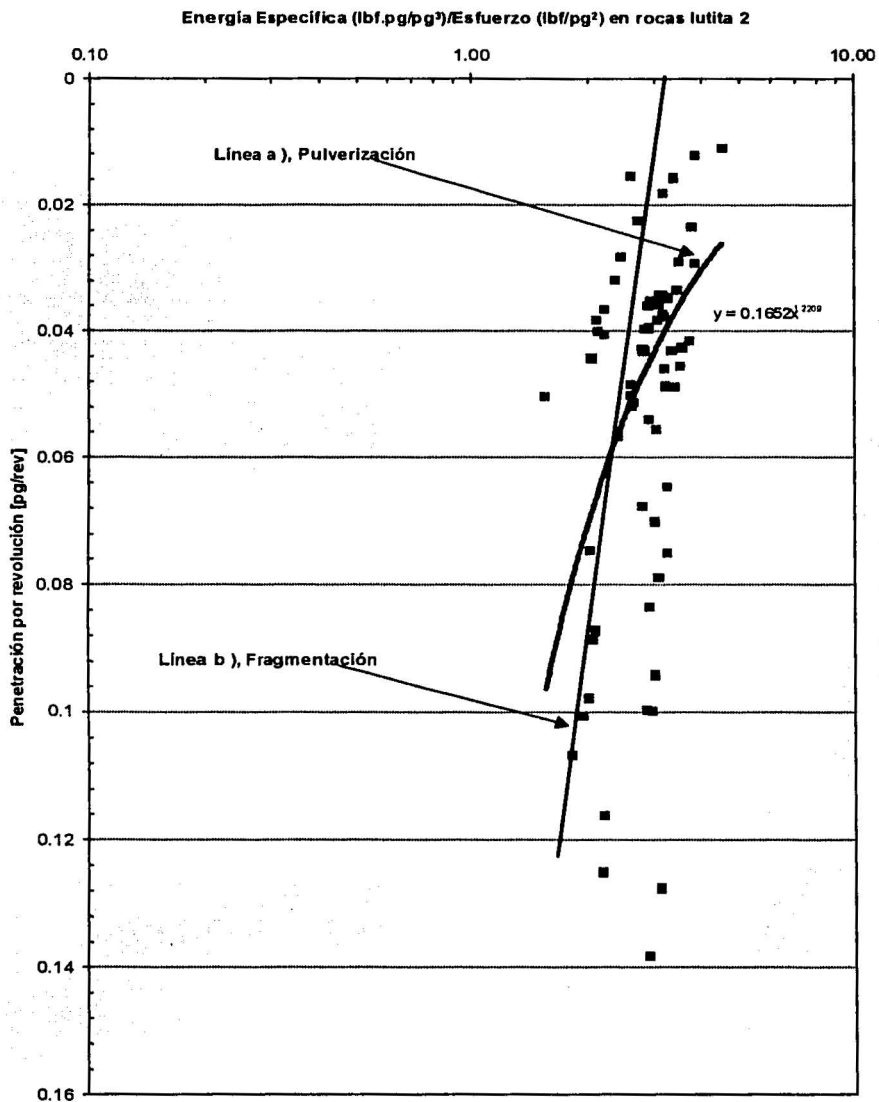
Del análisis cualitativo del inciso anterior, en un principio sé penso en un ajuste de tipo exponencial, pero una vez realizados uno a uno el análisis de cada método de ajuste conocido (exponencial, mínimos cuadrados, polinomial, potencial, línea recta) se tomó la decisión de trabajar simultáneamente los métodos exponencial y potencial, como formas de solución en la obtención de la ecuación general en términos de energía específica para los diferentes tipos de roca y en consecuencia poder generar las curvas tipo representativas adimensionales.

Se realizaron diversos ajustes para determinar el tipo de curva que representará con mayor eficiencia el problema real de este trabajo. De esta manera se seleccionó el



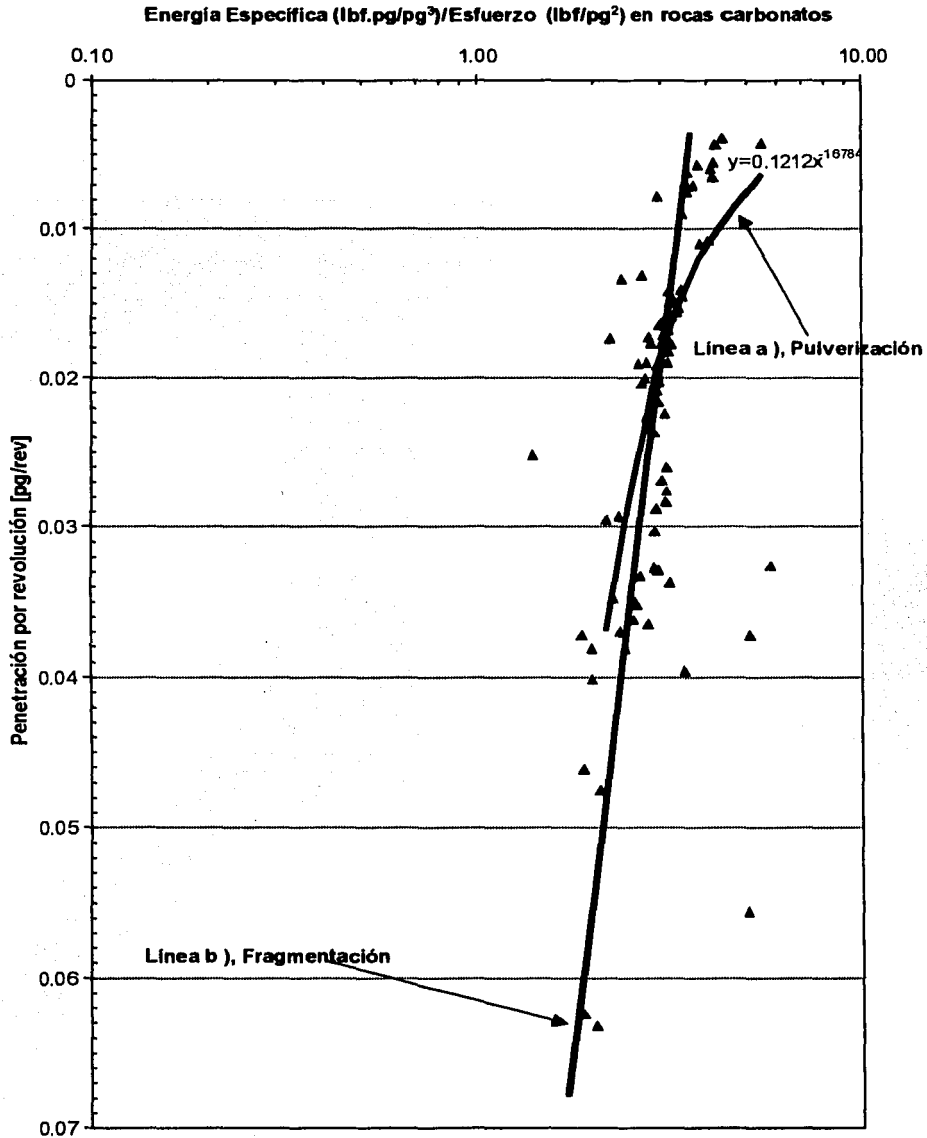
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 11. Gráfica semilogarítmica penetración por revolución como una función de la energía específica adimensional en rocas lutitas tipo 1.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 12. Gráfica semilogarítmica penetración por revolución como una función de la energía específica adimensional en rocas lutitas tipo 2.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Figura 13. Gráfica semilogarítmica penetración por revolución como una función de la energía específica adimensional en rocas carbonatadas.

Energía Específica (lbf.pg/pg³)/Esfuerzo (lb/pg²) en rocas areniscas

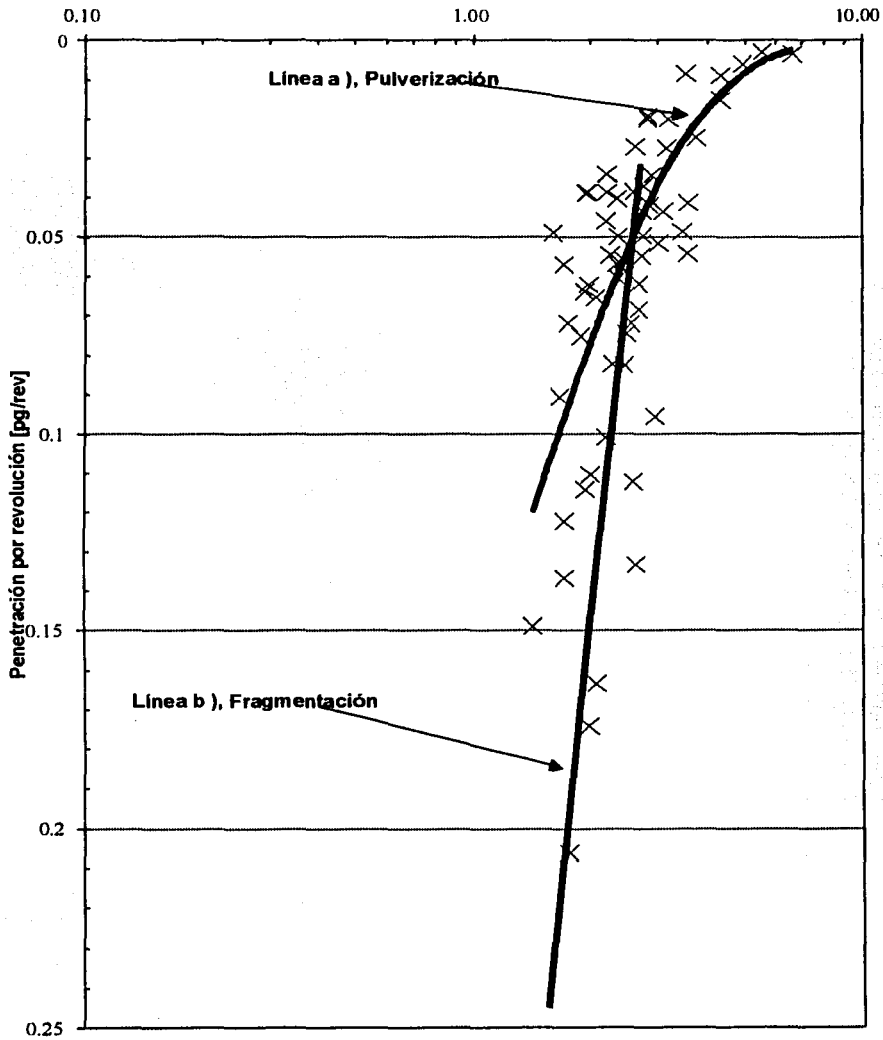


Figura 14. Gráfica semilogarítmica penetración por revolución como una función de la energía específica adimensional en rocas areniscas.

método "ajuste por mínimos cuadrados del modelo potencial". Este modelo potencial es el mas adecuado para representar el problema físico, ya que su radio de ajuste y dispersión es el mas cercano a la unidad. Así se obtuvo la ecuación general en términos de energía específica para los diferentes tipos de roca.

Para generar la correlación representativa adimensional existente entre la energía específica de la roca y la resistencia uniaxial a la compresión se construyó la Figura 15.

Energía específica total & Penetración por revolución

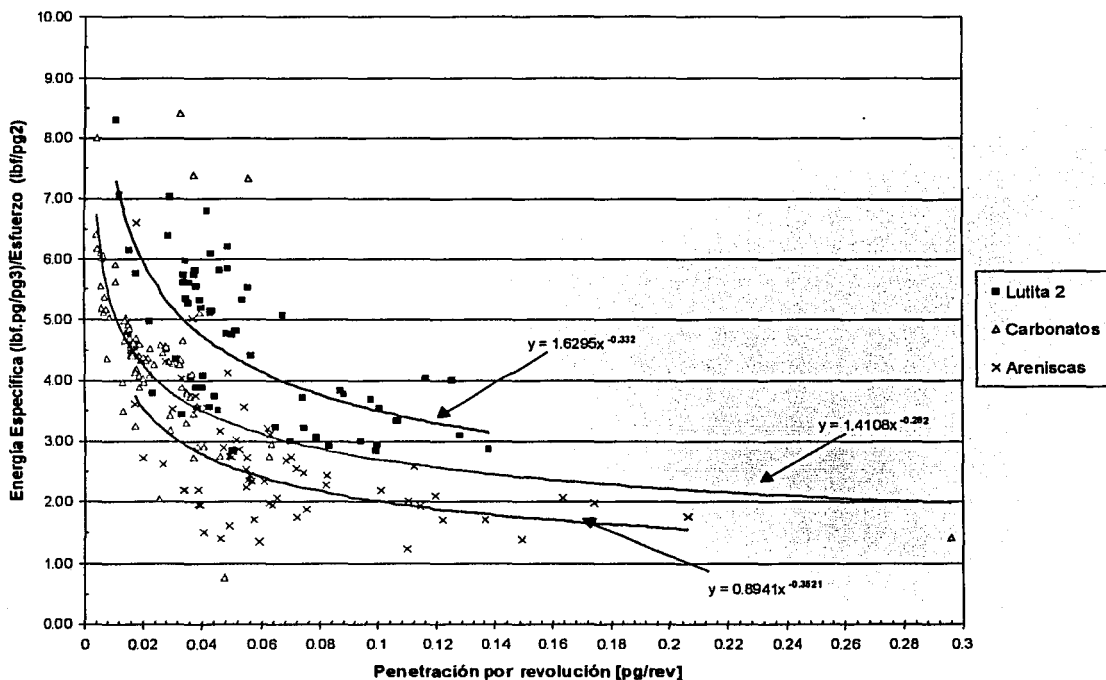


Figura 15. Energía específica adimensional como una función de la penetración por revolución para las diferentes muestras de roca.

En esta gráfica se muestran los tres diferentes tipos de roca, para ser analizados en conjunto, pudiéndose observar la similitud existente entre las curvas ajustadas a los valores calculados para las mismas.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

La dispersión que se observa en esta Figura 15, es un indicativo de la existencia de pulverización de los recortes de perforación en el fondo, provocando con ello una pérdida de energía de perforación y el embolamiento de la barrena. Todo lo anterior redundando en una limpieza deficiente de agujero que causa una baja eficiencia en la perforación de pozos.

A pesar de los efectos de embolamiento y pulverización, se generó la Figura 16 que representa la correlación de la energía específica de la roca y la resistencia uniaxial a la compresión.

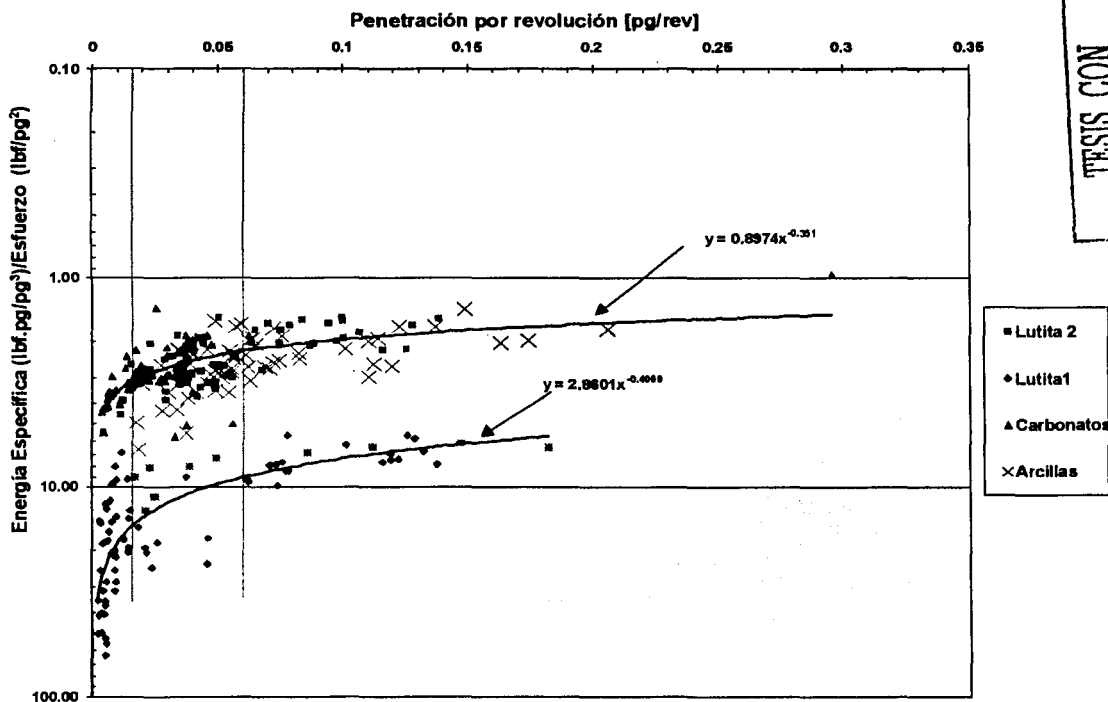


Figura 16. Correlación de la energía específica adimensional como una función de la penetración por revolución para las diferentes muestras de roca.

Para la realización de esta gráfica se utilizó el valor de resistencia a la compresión de la roca, obtenido para una presión de confinamiento de 2000 psi. En esta Figura 16, podemos observar como los valores de las muestras tienden a compactarse de tal manera que las rocas se relacionan entre si, mostrando un comportamiento similar en forma potencial.

Los datos se compactaron casi sobreponiéndose unos con otros quedando los valores de la roca Lutita 1 mas alejados de la nube de puntos principales, no obstante toman la misma curvatura y forma que las demás muestras de roca, esta desviación en los datos ya han sido explicadas en la sección anterior. El intervalo de 0.02 - 0.06 (pg/rev) en dónde se presenta el cambio en el mecanismo de corte en la perforación, obtenido en el inciso anteriormente, corresponde a la curvatura de la línea potencial en esta Figura 16.

De esta manera y empleando la ecuación potencial ajustada a los puntos, se definió la correlación de energía específica y esfuerzo compresivo:

$$\frac{PEE}{Co} = 0.8974 p^{-0.351} \dots\dots\dots(12)$$

Donde:

- PEE.- Perfil de energía específica, (lb.pg/pg³)
- Co.- Resistencia a la compresión, (lb/pg²)
- p.- Ritmo de penetración por revolución, (pg/rev)

$$p = 0.2 \frac{Rop}{N} \dots\dots\dots(13)$$

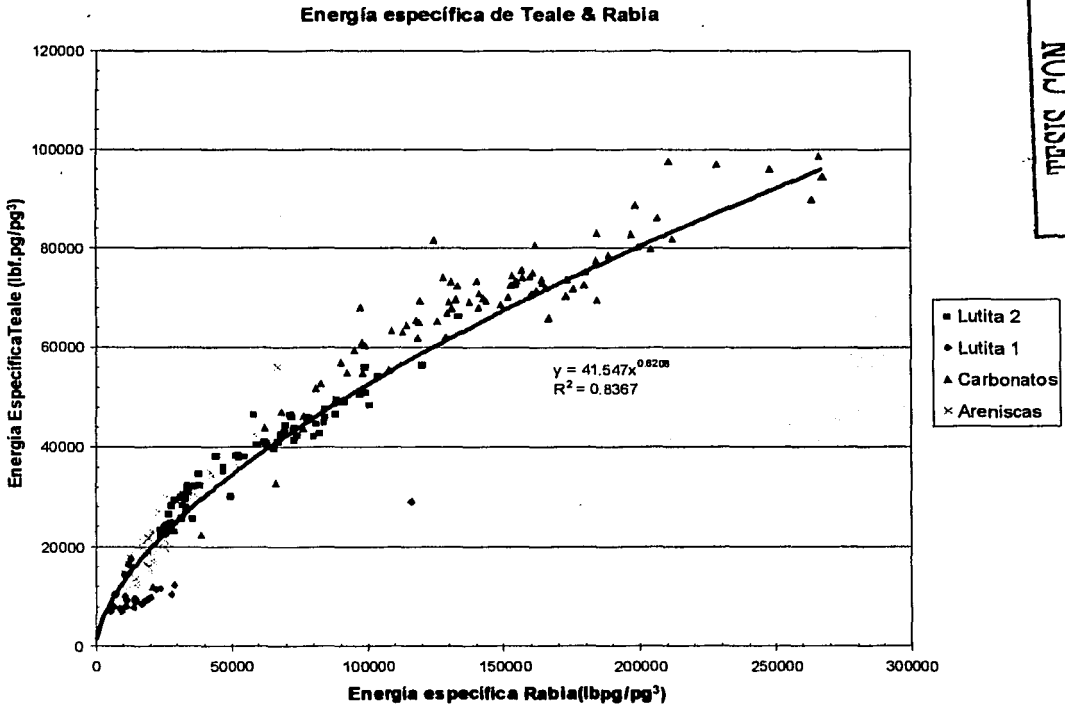
Donde :

- Rop.- ritmo de penetración, (ft/hr)
- N.- Revoluciones por minuto, (r.p.m.)

Para poder utilizar esta correlación se requería del conocimiento de un valor de energía específica real o teórica (PEE). Por lo que se procedió a establecer la relación

existente entre la energía específica teórica calculada por Teale de datos de laboratorio y la energía específica aproximada de Rabia calculada a partir de los datos de campo.

El procedimiento consistió en un análisis similar al realizado para las muestras de laboratorio con la variante de calcular la energía específica de Rabia y la energía específica de Teale para cada uno de los datos de las muestras de roca. Con los cálculos realizados, se construyó la Figura 17 de energías específicas. Se seleccionó el método de ajuste más representativo, teniendo en cuenta que para las pruebas anteriores el método de ajuste por mínimos cuadrados con el modelo potencial fue el que dio mejores resultados.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 17. Ajuste potencial de la energía específica de Teale como una función de la energía específica de Rabia.

Con todo lo anteriormente explicado se llega a la Figura 17 de donde se obtuvo la ecuación de la curva de correlación de estas dos ecuaciones de energía, la cual se muestra a continuación.

$$PEE = 41.547 E_{sR}^{0.6208} \dots\dots\dots(14)$$

Donde:

PEE.- Perfil de energía específica, (pg.lb/pg³)

E_{sR}.- Energía específica de Rabia, (pg.lb/pg³)

Así de esta manera, se llegó a las correlaciones semiempíricas de la energía específica de la roca y el esfuerzo compresivo en sitio, que resuelve en forma satisfactoria uno de los objetivos de este trabajo.

En este capítulo se analizaron las pruebas de laboratorio para cuatro diferentes tipos de roca, con el fin de visualizar los efectos que se tienen sobre la penetración por revolución al variar los parámetros de perforación. Del análisis, observamos:

- Que la energía específica disminuye con la penetración por revolución en forma potencial.
- Se detectaron los mecanismos de pulverización y fragmentación de roca y el rango en que se presentan.

Se obtuvieron la correlación de energía específica entre resistencia a la compresión y la correlación de energía específica de Teale y Rabia, mediante la aplicación del método de ajuste por mínimos cuadrados con el modelo potencial, el siguiente paso consiste en la aplicación práctica de estas correlaciones a un ejemplo de campo y la comparación de las mismas con otros métodos, lo cual es tema del siguiente capítulo.

Capítulo 4.

Análisis y discusión de resultados

Para hacer uso de las correlaciones desarrolladas en el Capítulo III con la información de campo la cual se describe en el resto de este capítulo, se estructuró una metodología la cual consiste de seis etapas a seguir (ver Figura 18), para la solución de problemas referentes al perfil de resistencia a la compresión, mostrándose también un ejemplo de aplicación.

4.1 Metodología de aplicación.

La metodología para emplear las correlaciones desarrolladas es:

1. La información mínima de campo para elaborar los perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) de un pozo, son los parámetros de perforación que consisten en: peso sobre barrena Wob (lb), rotación N (rpm), diámetro de la barrena d (pg) y el ritmo de penetración Rop (ft/hr). El registro de esta información puede hacerse a mano punto por punto metro a metro o bien con el instrumento de medición de MWD, el cual su uso es frecuente en muchas de las operaciones realizadas.
2. Calcular la energía específica según Rabia, Es_R (Ecuación 11) para cada uno de los datos que se dispongan.
3. Con el valor calculado de Es_R , se aplica la correlación desarrollada en este trabajo para obtener el Perfil de Energía Específica, PEE (psi) (Ecuación 14) y conocer punto a punto el valor de energía específica.
4. Calcular la penetración de la barrena en cada revolución, p (ft/rev) mediante la Ecuación 13.
5. Con los valores determinados de PEE y p , se obtiene el valor de la resistencia a la compresión de la roca en sitio, Co (psi), aplicando la correlación desarrollada y descrita mediante la Ecuación 12.

6. Graficar los valores de energía específica y de resistencia a la compresión contra la profundidad y obtener los perfiles de energía específica y el perfil de resistencia a la compresión del pozo.

El perfil de resistencia a la compresión (PRC) obtenido puede utilizarse para varios fines los cuales incluyen: a) selección de la barrena óptima para perforar el siguiente pozo, b) correlación estructural del campo, c) marcas geológicas, d) cambios en la litología, etc.

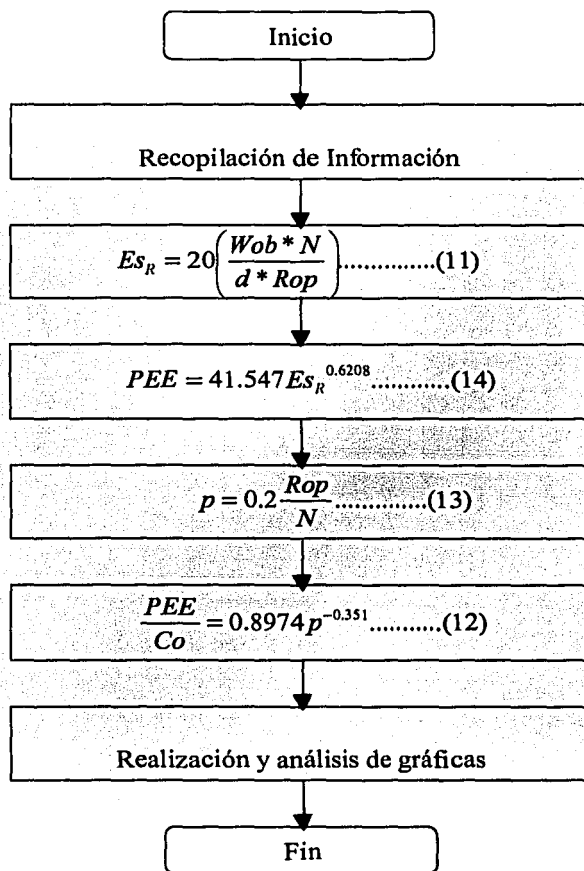


Figura 18. Diagrama de bloques de la metodología de aplicación de las correlaciones de los perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC).

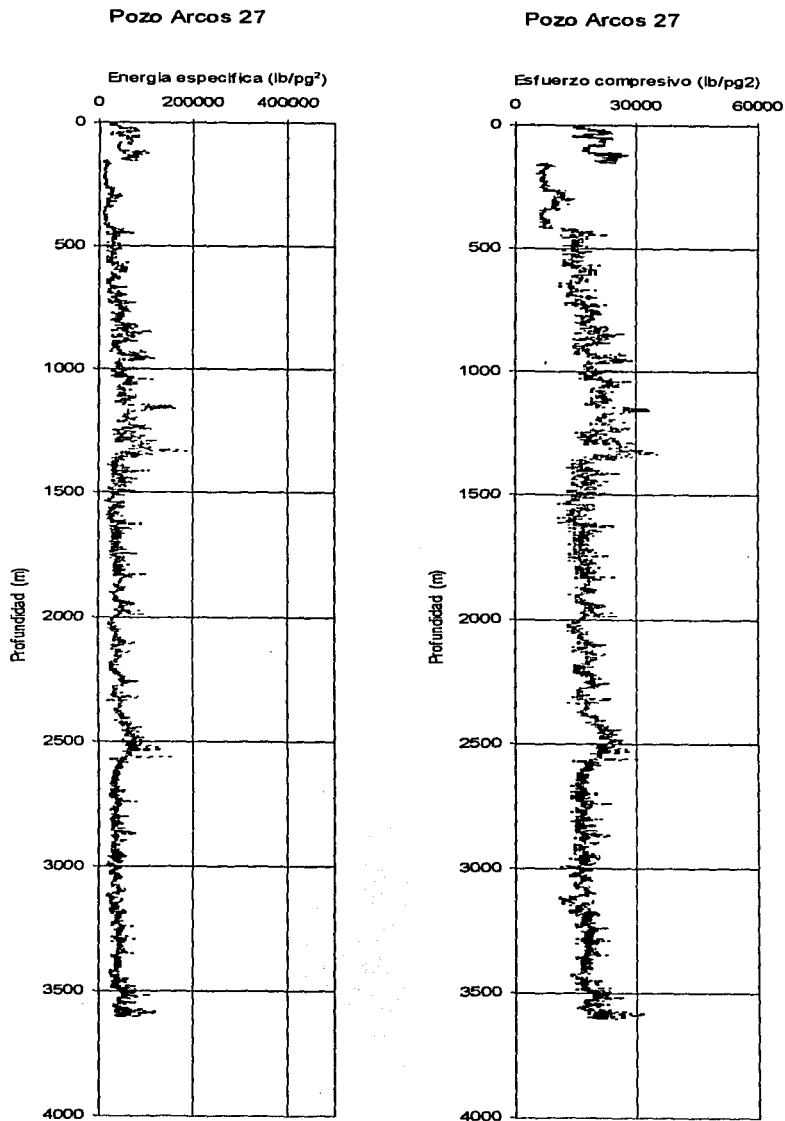
4.2 Ejemplo de aplicación.

Todo el trabajo desarrollado tiene la finalidad de poder emplearse de manera práctica en la solución de problemas cotidianos teniendo como objetivo el mejoramiento en los trabajos de perforación. De esta manera es como se han obtenido resultados muy satisfactorios con la aplicación de las correlaciones encontradas en este trabajo. Para validar lo anterior se aplicará en un caso práctico.

En capítulos anteriores, se han planteado las bases teóricas y analíticas para establecer las relaciones necesarias entre los parámetros de perforación obtenidos en laboratorio, dando como resultados las correlaciones entre la energía específica de Teale E_{ST} (Ecuación 10) y la energía específica práctica E_{SR} (Ecuación 11) y a su vez la correlación que existe entre la energía específica teórica y el esfuerzo compresivo de la roca (Ecuación 12). En esta sección se presenta una evaluación para determinar que tan validos son los resultados que se pueden obtener con la información de campo.

Para realizar la validación, se utilizaron dichas correlaciones en datos de campo de acuerdo a la metodología descrita anteriormente, la correlación se aplicó a un pozo seleccionado de manera aleatoria y del cual se disponía de la información completa este fue el pozo Arcos No. 27, Figura 19.

En esta gráfica podemos observar que existe una diferencia marcada en el esfuerzo compresivo de la roca a medida que profundizamos, pues el valor de la resistencia a la compresión en sitio aumenta a medida que aumenta la profundidad, esto naturalmente se debe a que la roca profunda estará mas compactada y por lo tanto es mas dura para perforarse, que rocas del mismo tipo a menor profundidad. También se observan puntos interesantes donde los valores de resistencia a la compresión decrecen aun estando a profundidades mayores esto sugiere la existencia en ese intervalo de rocas poco consolidadas.



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Figura 19. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) aplicados a datos de campo.

4.3 Aplicación al campo Arcos

El campo Arcos (Figura 20), se encuentra localizado en la porción noreste de la República Mexicana, formando parte integral de lo que se conoce como el Activo Burgos. Desde el punto de vista geológico el campo Arcos se ubica en la cuenca de Burgos dentro de la franja de producción del Eoceno. Su litología se compone principalmente de areniscas siliciclásticas, es un campo productor de gas seco descubierto en 1961.

El volumen original probado del campo fue de 669.3 miles de millones de pies cúbicos, este campo esta considerado actualmente como el segundo campo productor mas importante en la cuenca de Burgos y uno de los principales en términos de reservas remanentes probadas.

Para el estudio del campo se seleccionaron 11 pozos delimitadores de las dos zonas mas representativas del mismo, que contaran con la información suficiente y necesaria para la aplicación de estas correlaciones. Los pozos en estudio del campo son el Arcos 508 al noroeste del campo, el Arcos DL3 al norte, los pozos Arcos 511, 505, 507, y 43 del lado noreste del campo, los pozos Arcos 26 y 27 localizados en la parte inferior al sur del campo, el pozo Arcos 11 localizado casi en la parte central de la zona sur del campo, el pozo Arcos 54 en la franja este de la parte inferior del campo y el pozo Arcos 55, los cuales se encuentran señalados en la Figura 21.

4.4 Información disponible del campo en estudio.

La información de los pozos fue tomada con herramienta MWD para las diferentes etapas de perforación registrándose el tipo de barrena empleado, el diámetro de barrena, la profundidad del pozo, el peso sobre barrena, revoluciones por minuto. Otra información complementaria es el torque, ángulo de inclinación del pozo, bombeo (GPM), presiones de bombeo, densidad y tipo de fluido de perforación, así como, algunas observaciones de importancia, (ver Tabla 6).

La toma de información consiste en ir registrando metro a metro cada uno de los parámetros anteriormente descritos, y llevar la contabilidad de los cambios de barrenas empleados en cada etapa de perforación hasta la profundidad total del pozo.

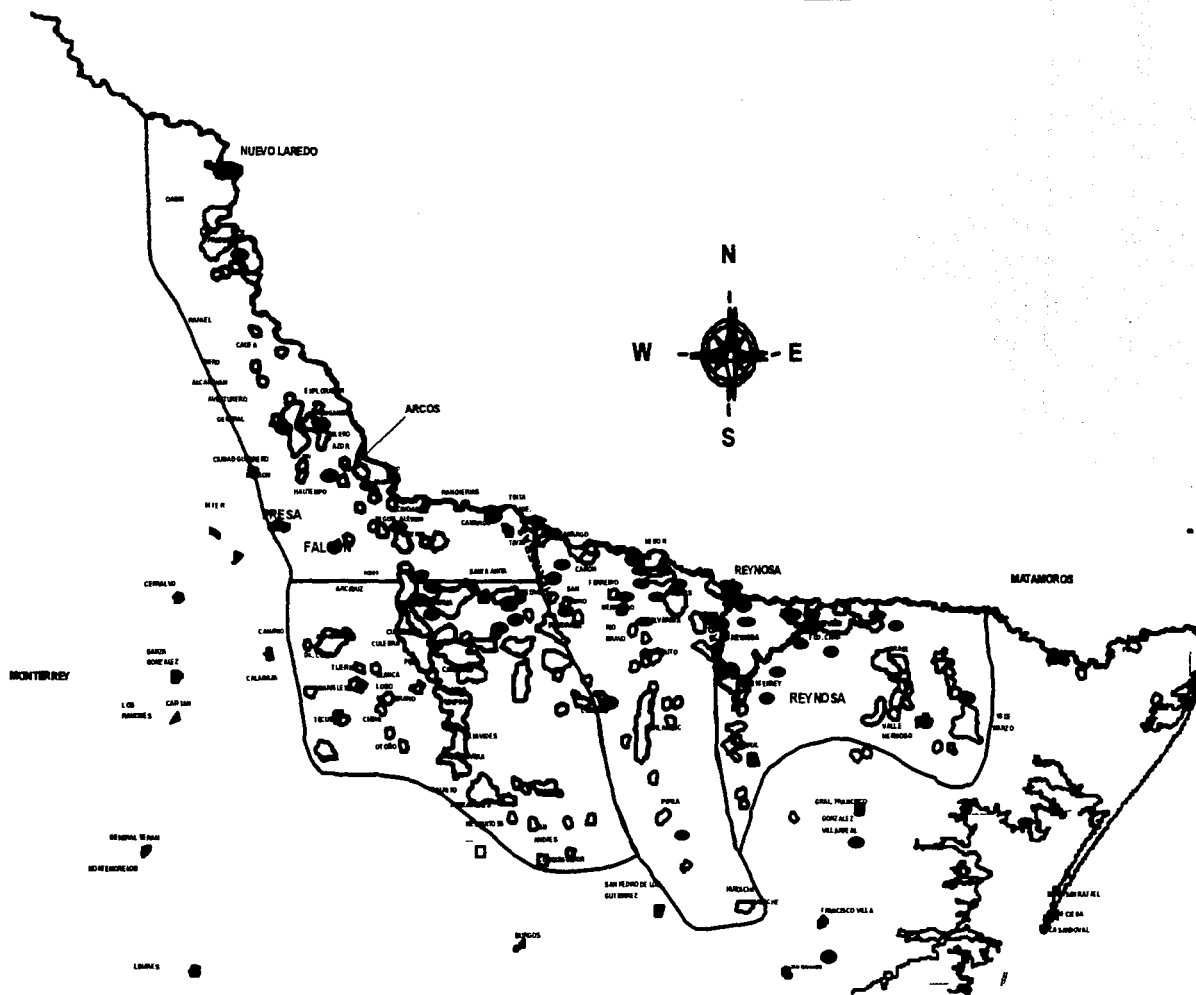


Figura 20. Ubicación del campo Arcos perteneciente a la cuenca de Burgos.

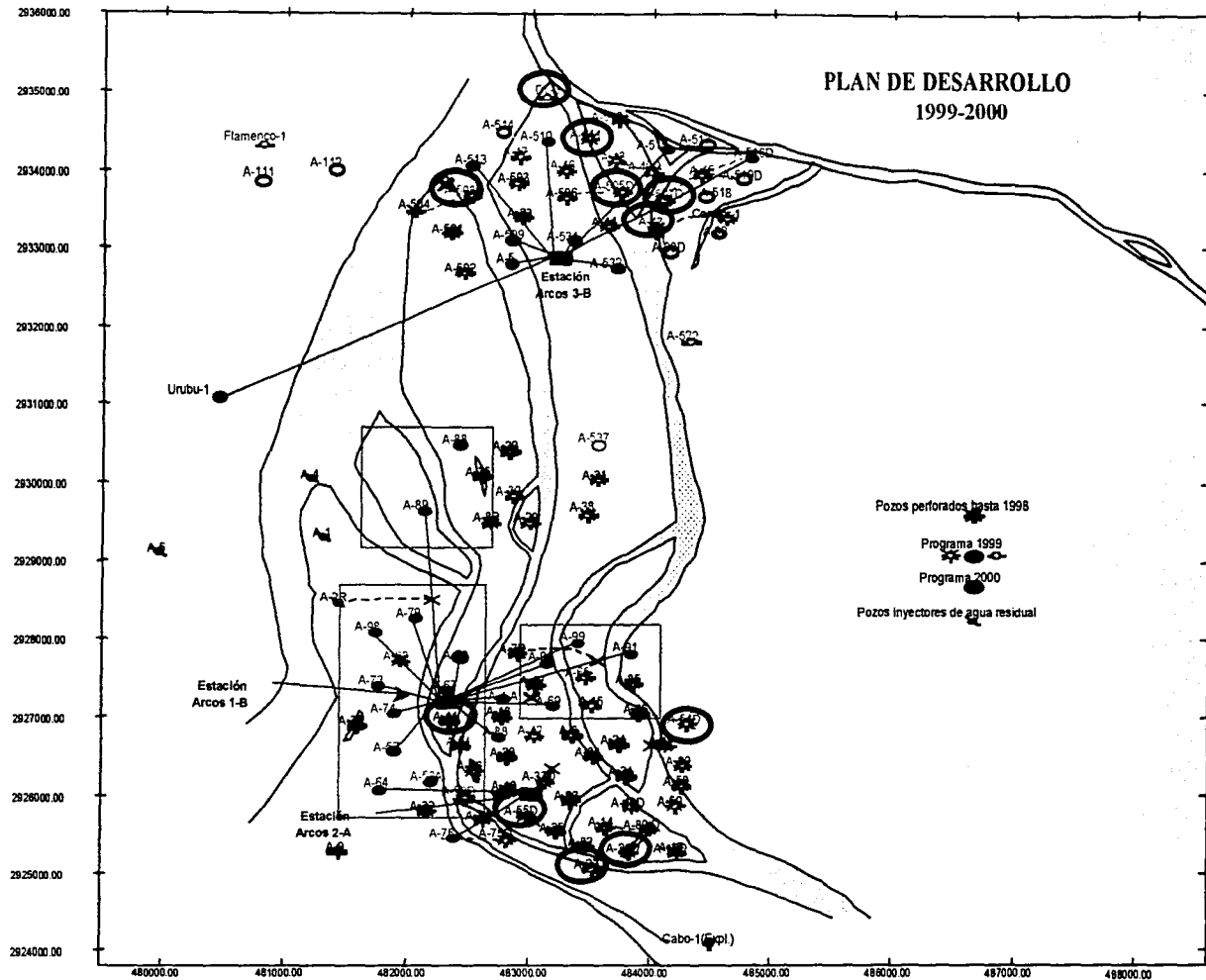


Figura 21. Localización de los pozos de estudio.

RECORD DE BARRENAS OPERADOR

RECORD DE BARRENAS OPERADOR																
COMPAÑIA		HCC			DIAMETRO		6		TOBERAS			2)20 2)15		BOMBAS		
POZO		Arcos 43			TIPO		STR554G12		CORRIDA #			4		BHA:		
EQUIPO					N.SERIE		1900325		DESGASTE							
BNA #	PROF m	MIN/MT	ROP m/hr	MTS ACUM	HRS ACUM	ROP m/hr	PSB Ton	RPM rev/min	TQ	ANG	GPM	PSI	LODO gr/cm ³	FORM	ROP FORM	OBSERV.
4	2553	3	20	1	0.05	20.0	4	80			189	1400	1.77			
4	2554	3	20	2	0.10	20.0	4	80			189	1400	1.77			
4	2555	2	30	3	0.13	22.5	4	80			189	1400	1.77			
4	2556	4	15	4	0.20	20.0	4	80			189	1400	1.77			
4	2557	2	30	5	0.23	21.4	4	80			189	1400	1.77			
4	2558	2	30	6	0.27	22.5	4	80			189	1400	1.77			
4	2559	4	15	7	0.33	21.0	4	80			189	1400	1.77			
4	2560	2	30	8	0.37	21.8	4	80			189	1400	1.77			
4	2561	3	20	9	0.42	21.6	4	80			189	1400	1.77			
4	2562	3	20	10	0.47	21.4	4	80			189	1400	1.77			
4	2563	2	30	11	0.50	22.0	4	80			189	1400	1.77			
4	2564	3	20	12	0.55	21.8	4	80			189	1400	1.77			
4	2565	2	30	13	0.58	22.3	4	80			189	1400	1.77			
4	2566	2	30	14	0.62	22.7	4	80			189	1400	1.77			
4	2567	2	30	15	0.65	23.1	4	80			189	1400	1.77			
4	2568	2	30	16	0.68	23.4	4	80			189	1400	1.77			

Tabla 6. Ejemplo de la toma de información del registro de los parámetros de perforación cada metro.

Registro de información disponible							
Campo	Pozo	Parámetros de Perforación	Intervalo	Registros Geofísicos			
				CAL	DT	GR	SPHI
	No.	m-m	m	in	Us/ft	gAPI	m ³ /m ³
Arcos	11	✓	1 - 3500				
Arcos	26D	✓	14 - 3665				
Arcos	27	✓	Ene-02				
Arcos	43	✓	28 - 3710	✓	✓	✓	
Arcos	505	✓	15 - 3561				
Arcos	507	✓	29 - 3668				
Arcos	54	✓					
Arcos	55	✓					
Arcos	508D	✓	123 - 3168				
Arcos	511	✓	24 -3200 1200 - 3200		✓	✓	✓
Arcos	DL3	✓	28 - 4339				

Tabla 7. Información disponible del campo Arcos, Región Norte.

Para realizar un análisis más completo se hizo necesario buscar información de registros geofísicos.

Los datos de registros geofísicos que se necesitaban en este caso eran los del registro de porosidad o en su defecto los datos del registro sónico, para que en función de este se calculara la porosidad del pozo, este tipo de información es muy frecuente que solo se tome en zonas de interés del pozo.

Debido al elevado costo que tienen estos registros, resulto difícil encontrar pozos que tuvieran información de registros geofísicos en su totalidad, por lo que la información disponible se encuentra resumida en la Tabla 7.

4.5 Comparación de la predicción de resistencia a la compresión con otros métodos.

Como primer etapa en el análisis de resultados, se realizó la comparación de los valores obtenidos de la correlación de resistencia a la compresión de la roca a partir de la energía específica, motivo de este trabajo, con dos modelos diferentes realizados por otros autores para calcular la resistencia a la compresión de la roca, tal es el caso de J.P. Sarda²¹ y Gutiérrez²², quienes a partir de registros geofísicos, en especial datos del registro de porosidad y empleando las correlaciones encontradas por ellos mismos, (Ecuaciones 1-14) respectivamente, obtienen valores de resistencia a la compresión.

$$Co=258 * e^{-9*\phi} \dots\dots\dots(1)$$

$$Co=0.167 * e^{-2.039*M/Ms*Co'} \dots\dots\dots(14)$$

$$M/Ms=0.992 * e^{-6.808*\phi} \dots\dots\dots(15)$$

Donde :

Co = Resistencia a la compresión, (Mpa)

ϕ = Porosidad, (%)

Co' = 50596 (psi) para la arena cuando $\phi = 0$

La comparación se realizo en dos pozos del campo para los cuales se contaba con toda la información necesaria estos fueron el pozo 43 y el pozo 511 cuyas gráficas se presentan en las Figuras 22 -23.

El análisis consistió en calcular los valores de resistencia a la compresión de la roca Co (lb/pg²), por los tres diferentes métodos y compararlos entre si para observar las similitudes o diferencias que existan, los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 22- 23.

En estas gráficas se puede visualizar que el perfil de resistencia a la compresión en sitio (PRC) -motivo de este trabajo- y los resultados obtenidos utilizando la correlación de Gutiérrez²² son los que representan mas certeramente el problema real, mostrando una diferencia mínima entre ellos, (líneas gris y azul respectivamente).

Arcos 43

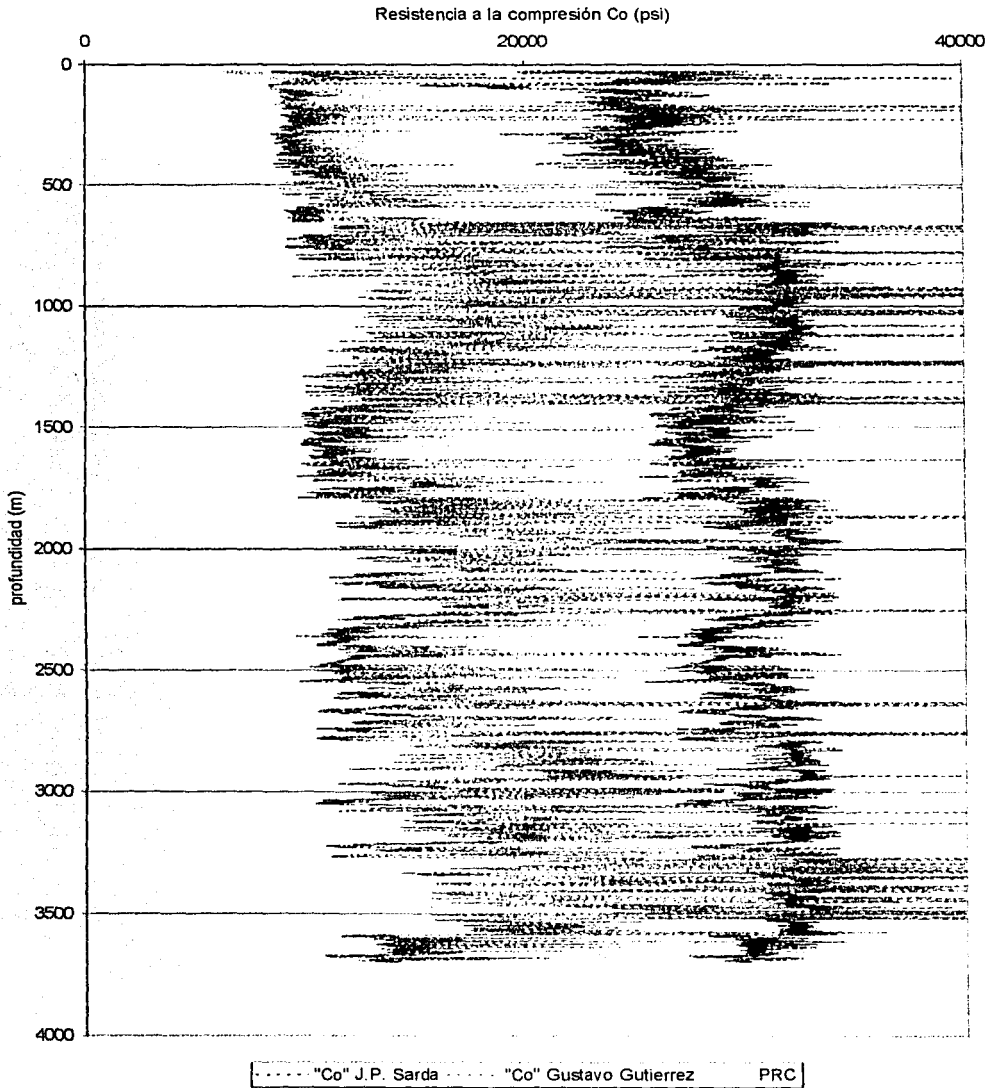
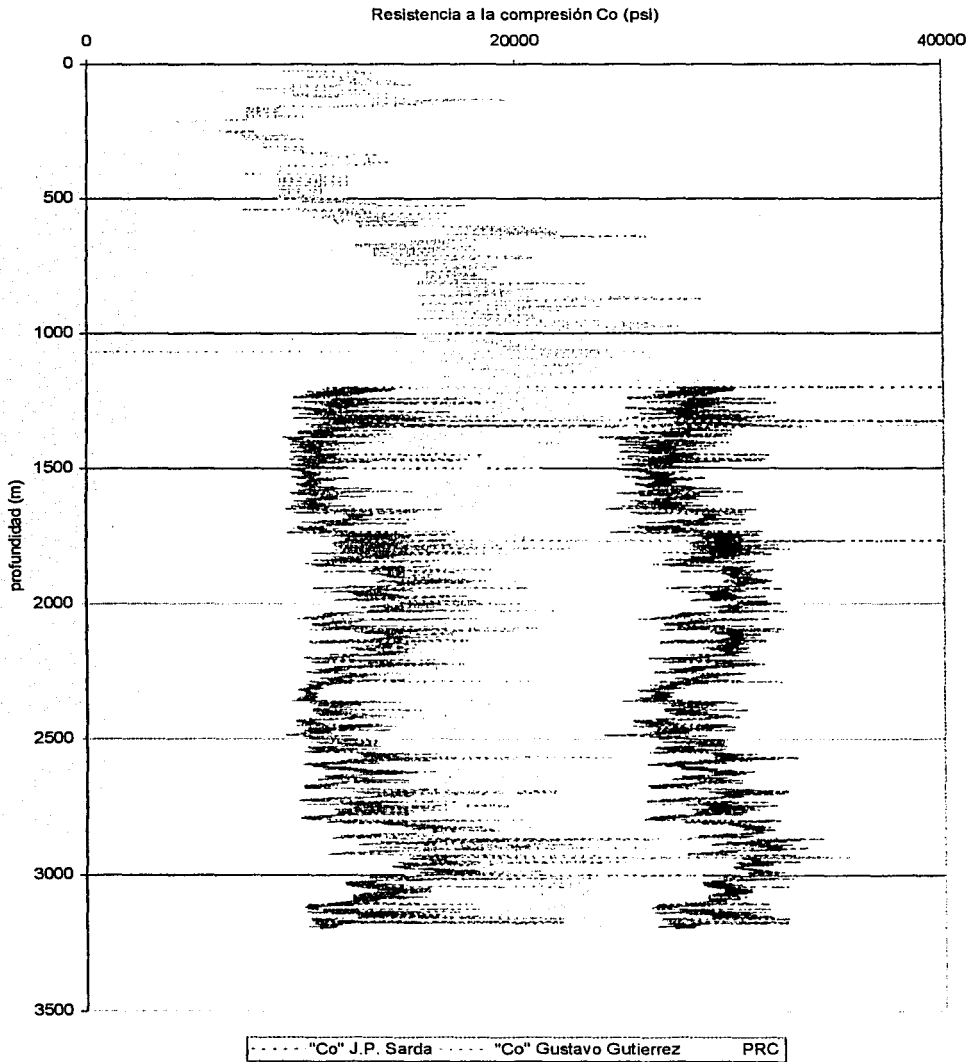


Figura 22. Resultado de la comparación con diferentes modelos, Pozo 43.

Arcos 511



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 23. Resultado de la comparación con diferentes modelos, pozo 511.

Por otra parte tenemos que el valor de resistencia a la compresión de la roca calculada por la correlación de Gutiérrez²² necesita de la disponibilidad de los registros geofísicos y que la base de cálculo para el perfil de resistencia a la compresión son los parámetros de operación, datos de los cuales el ingeniero de perforación dispone en todo momento, sin que esto represente una inversión adicional al pozo.

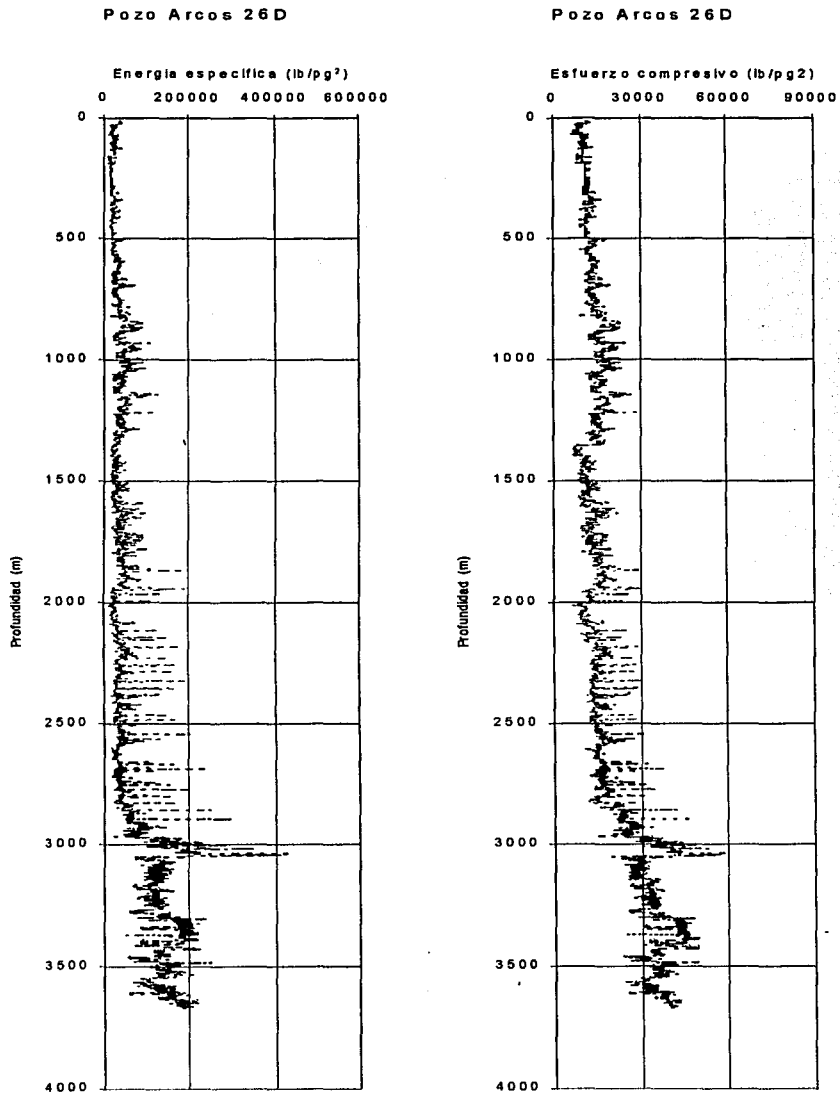
La única correlación que se conoce actualmente que calcule la resistencia a la compresión a partir de datos de campo es la encontrada por Warren y Winter¹⁴ solo que esta es para barrenas tri-cónicas.

4.6 Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC).

La segunda etapa del análisis de resultados se muestra en el conjunto de Figuras 24-34, que nos muestran los perfiles de energía específica (PEE) y resistencia a la compresión en sitio (PRC) para los diferentes pozos en estudio del campo Arcos.

De estas gráficas se tomaron las correspondientes a los pozos Arcos 26 (Figura 24) y 507 (Figura 25) pertenecientes a los bloques inferior y superior del campo respectivamente.

En estas gráficas podemos observar que el comportamiento del campo es un tanto homogéneo ya que a menor profundidad encontramos valores de resistencia a la compresión entre 10000 - 15000 psi para el intervalo de 0 a 500 m, para continuar con rocas mas compactadas de 500 a 1400 m aproximadamente, de ahí se presenta un cierto decremento en los valores hasta la profundidad de 1750 m donde existe un bloque de roca dura cuyo espesor aproximado es de 100 m para el pozo 507, que no se encuentra en el pozo 26, mas el comportamiento en el intervalo de 1850 – 3600 del pozo 507 encuentra su reflejo de manera podría decirse uno a uno en forma visible en el pozo 26 a partir de la profundidad de 2000 m.



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Figura 24. Resultado de la aplicación de las correlaciones al pozo Arcos 26.

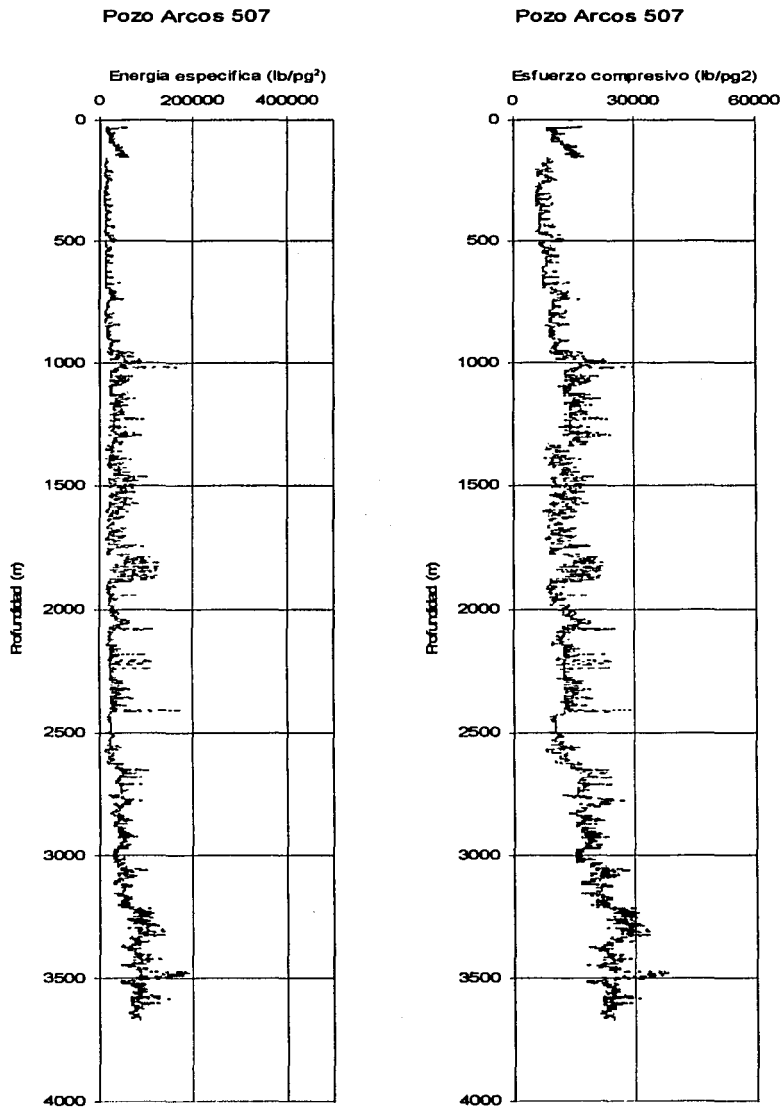


Figura 25. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 507.

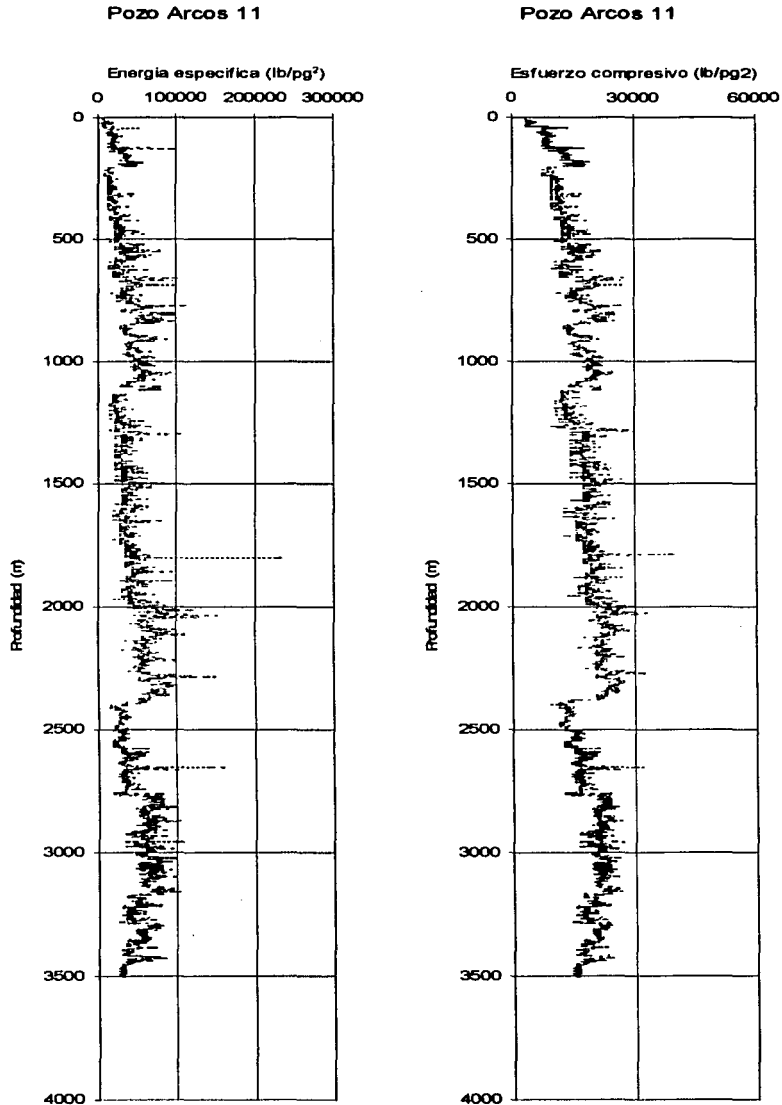


Figura 26. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 11.

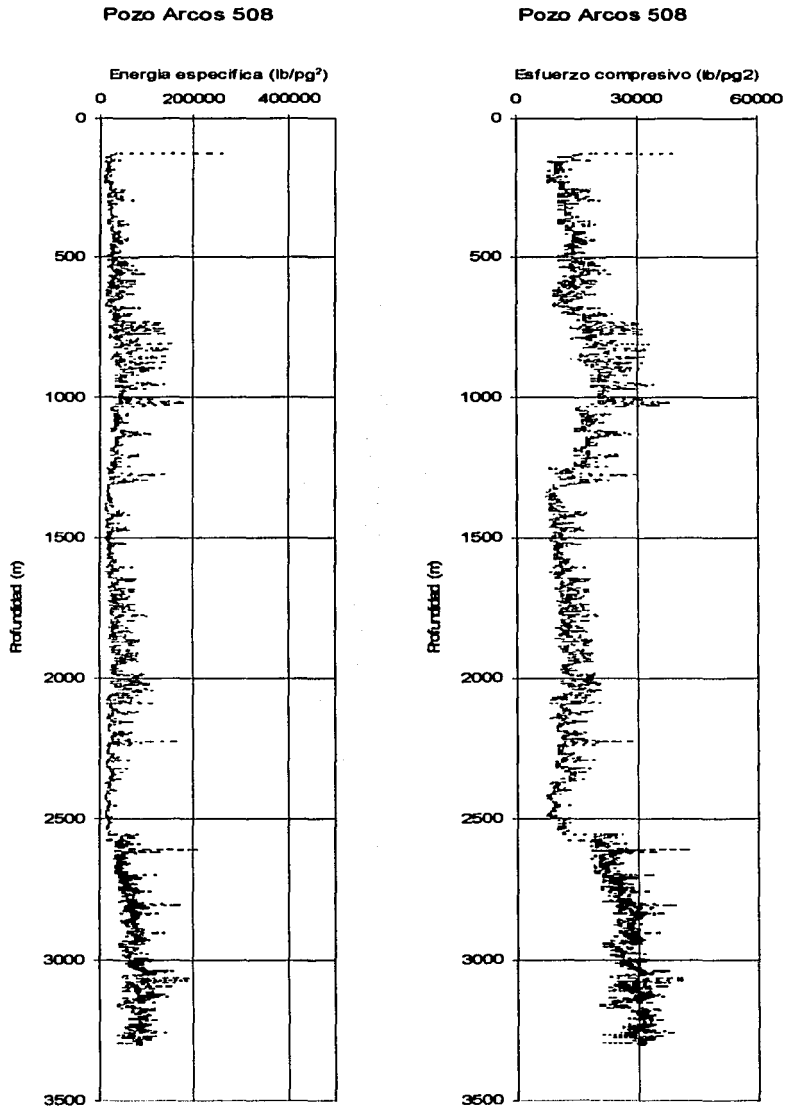


Figura 27. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 508.

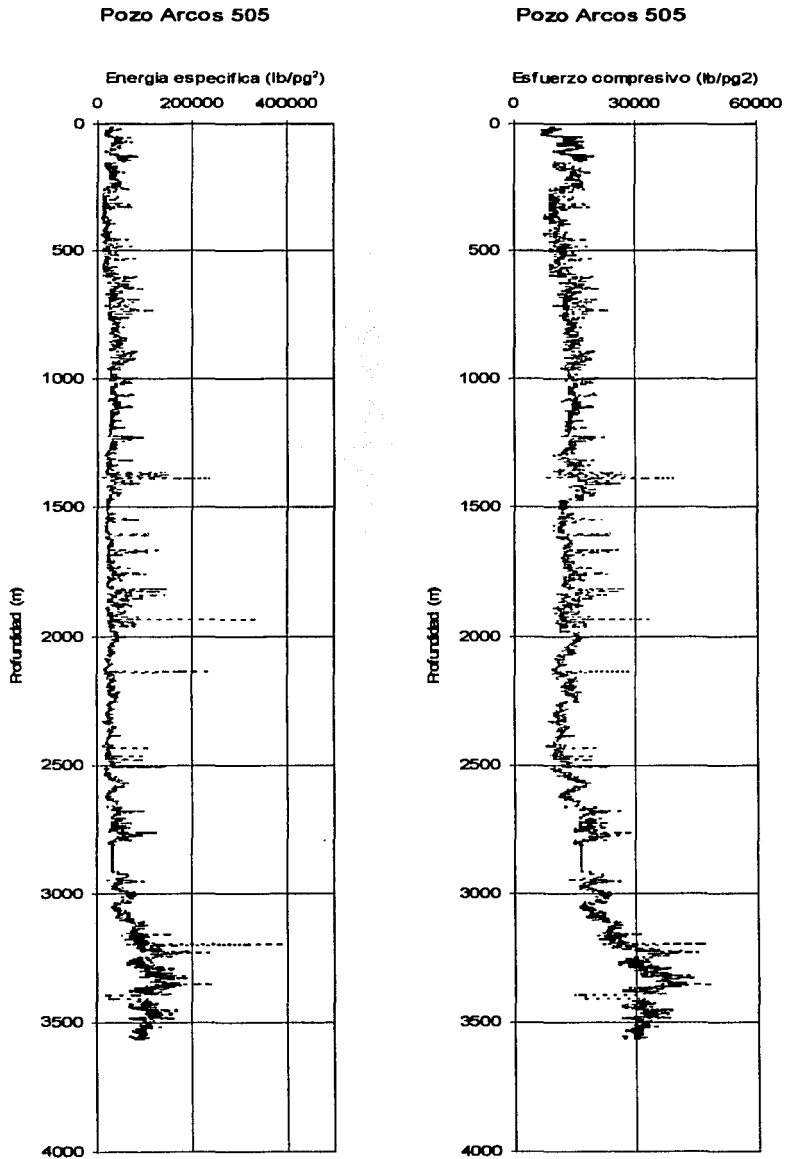


Figura 28. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 505.

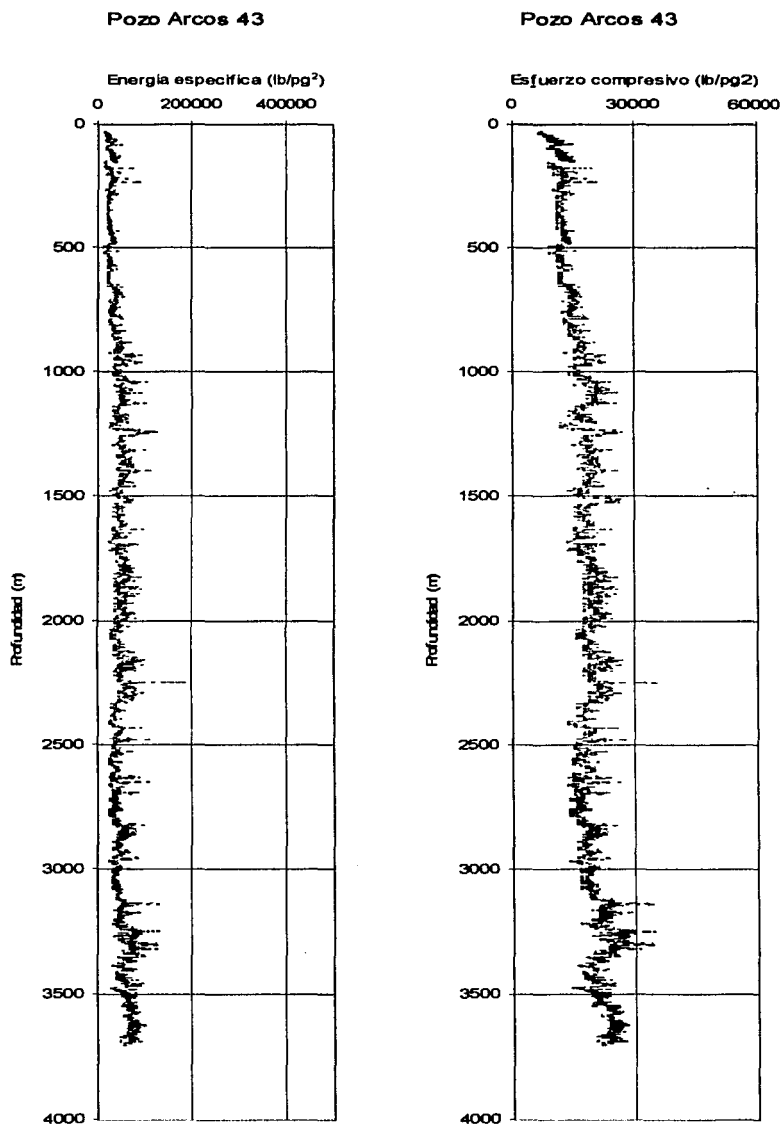


Figura 29. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 43.

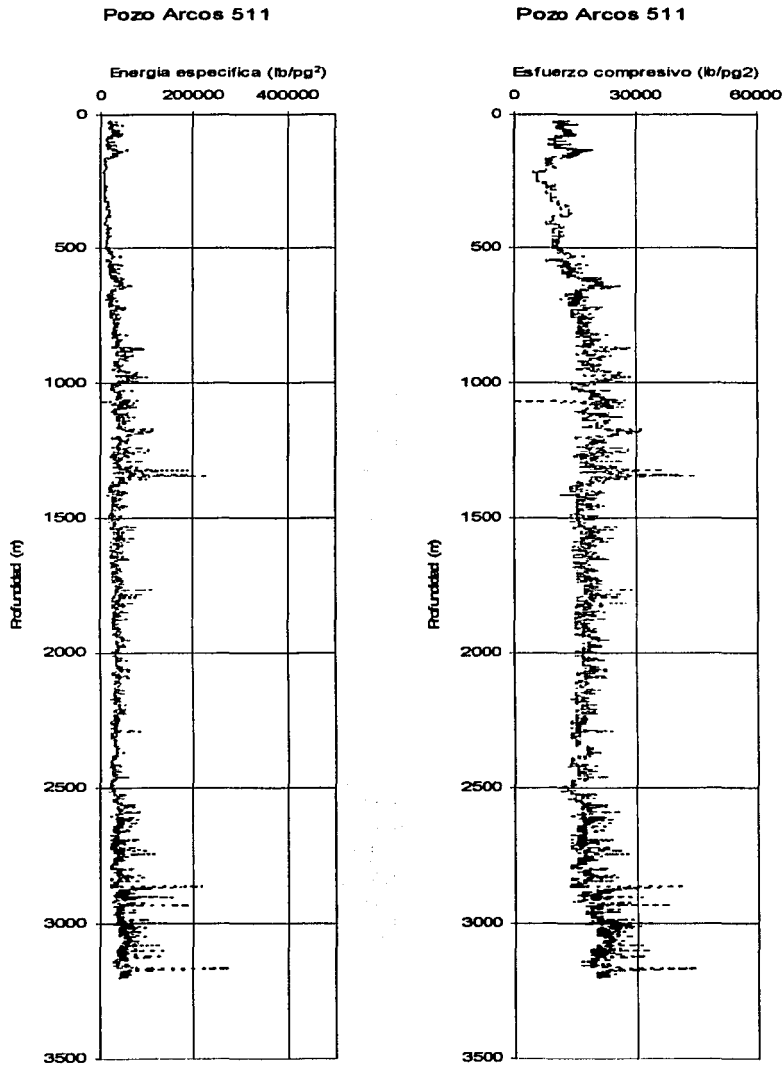


Figura 30. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 511.

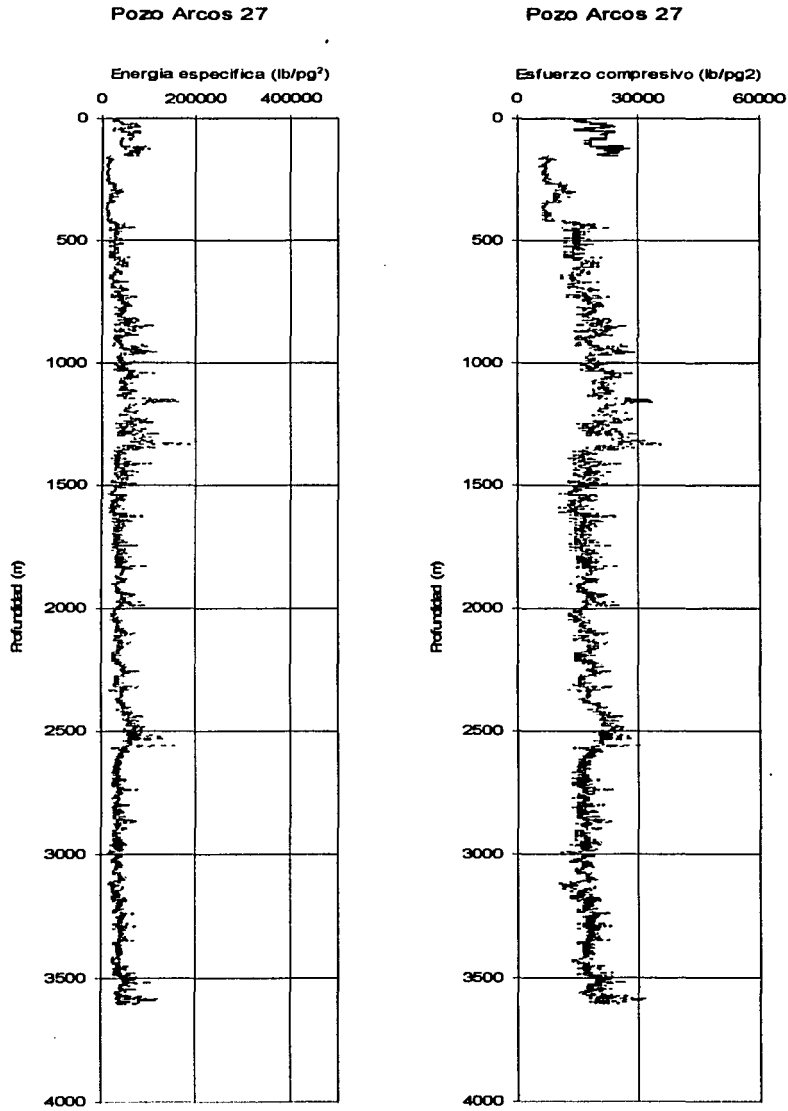


Figura 31. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 27.

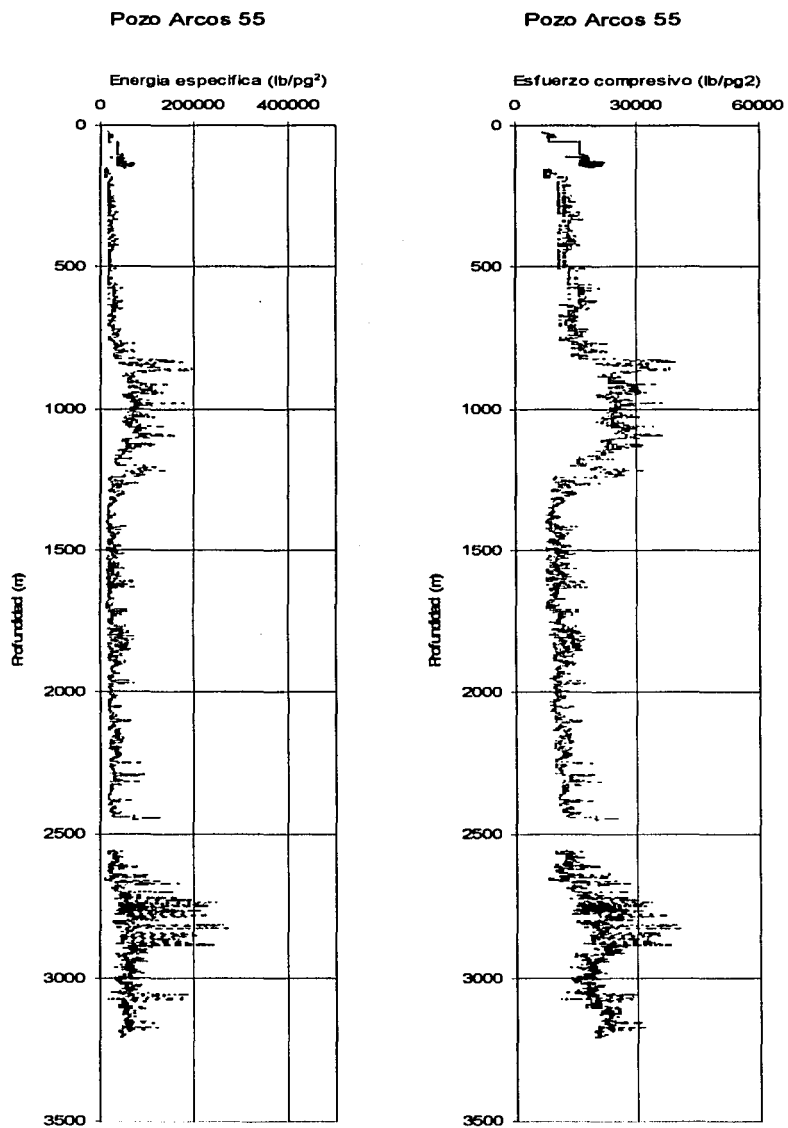


Figura 32. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 55.

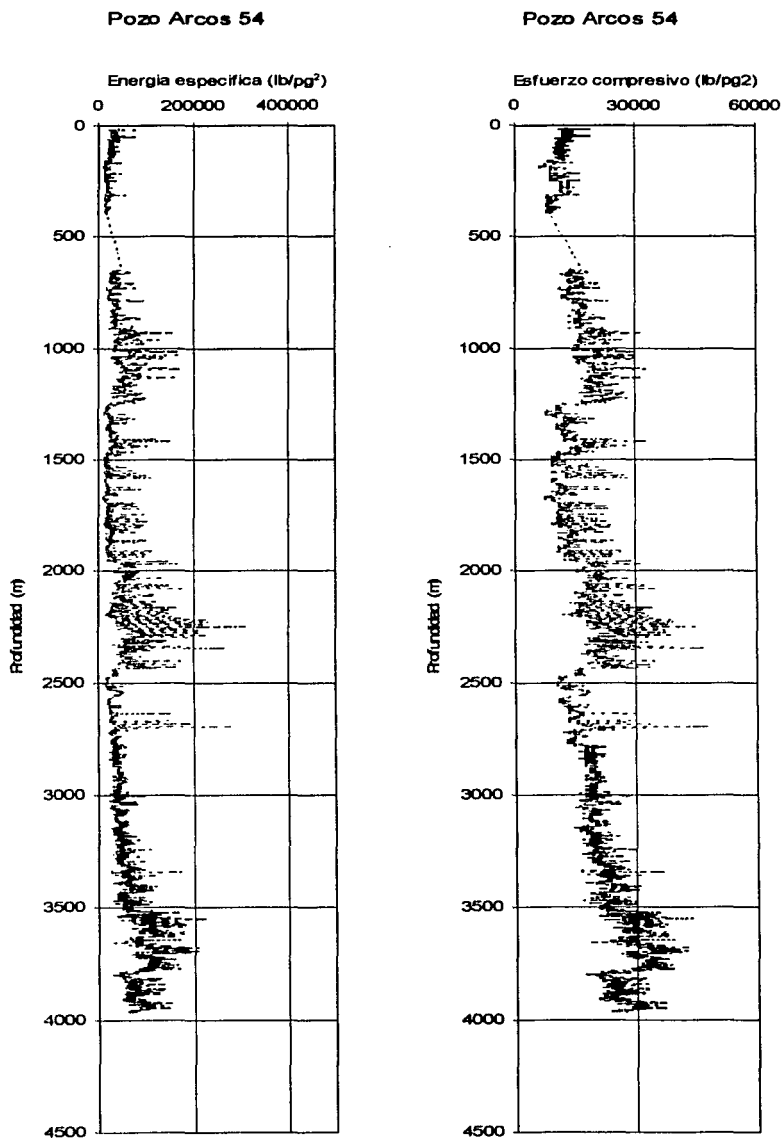


Figura 33. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos 54.

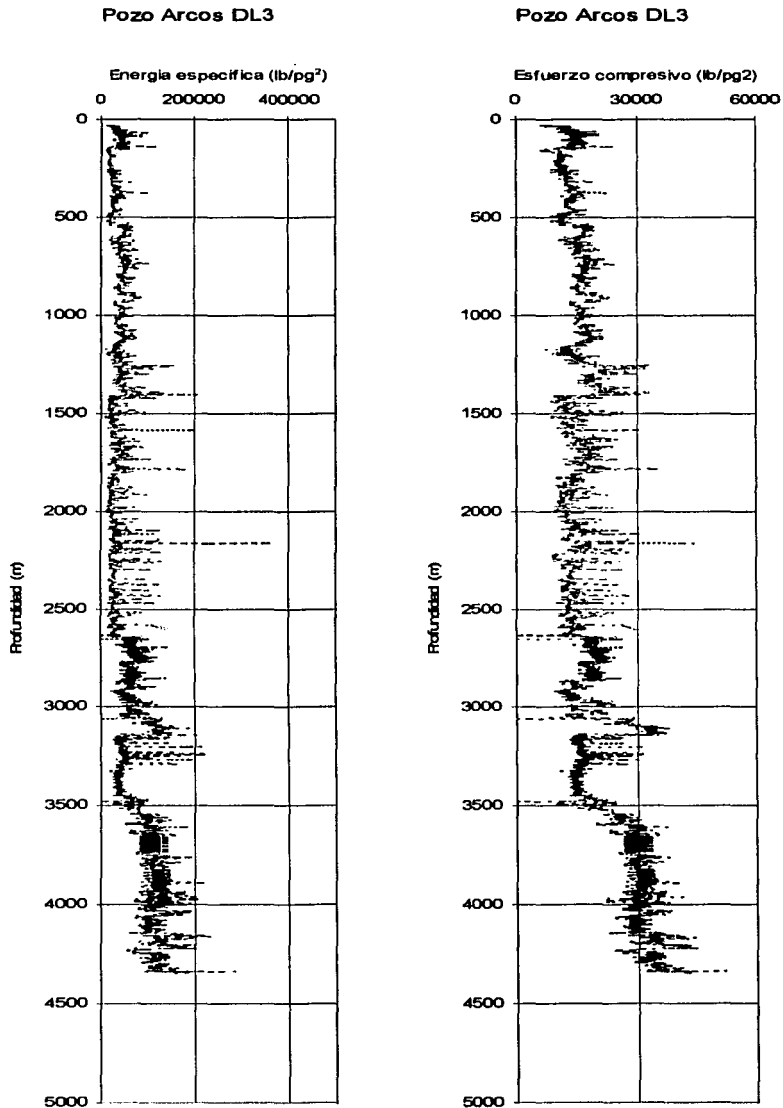


Figura 34. Perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) del pozo Arcos DL3.

Lo mismo sucede con las gráficas de los pozos Arcos 11 (Figura 26) y 508 (Figura 27) otra pareja de pozos que muestran al ser analizados una similitud en comportamiento y forma de las curvas que valen la pena el ser tomadas en cuenta.

Se realizó el análisis comparativo de los pozos Arcos 505, 43 y 511 (Figuras 28 – 30) los cuales presentaron similitudes extraordinarias por ejemplo el pozo Arcos 43 y 511 al sobreponer las gráficas prácticamente son un reflejo uno del otro. Lo mismo sucede al comparar estos dos con el pozo Arcos 505 que se encuentra estructuralmente en medio de los anteriores.

Del análisis gráfico del pozo Arcos 27 (Figura 31) el valor promedio aproximado de resistencia a la compresión de la roca es de 15, 000 lb/pg², observarse que la zona de mayor compactación y alta resistencia a la compresión que se presenta en los demás gráficos, en este no esta presente.

En las gráficas de los pozos Arcos 54 y DL3 se puede observar una zona de mayor compactación y dureza a partir de la profundidad de 3500 y esta zona en el pozo Arcos 55 se localiza 1000 m arriba, (Figuras 32-34)

De la discusión de los resultados obtenidos se deja la posibilidad abierta para que se profundice en el uso y explotación de estas correlaciones encontradas, así como en el mejoramiento del presente trabajo.

Por otra parte la selección óptima de barrena una vez conocido el valor promedio del perfil de resistencia a la compresión (PRC), se puede obtener consultando los catálogos de proveedores, en donde se presentan las especificaciones técnicas de las barrenas así como las propiedades y características físicas del diseño de los diferentes tipos de cortadores.

Capítulo 5.

Conclusiones y Recomendaciones

Los perfiles de energía específica (PEE) y de resistencia a la compresión (PRC) representan para la perforación un avance mas para el conocimiento de las formaciones en la perforación de pozos, ya que estos nos permiten la detección de intervalos poco consolidados o de gran resistencia a la compresión que podrían significar problemas durante la perforación de pozos y no representan una inversión adicional para su aplicación.

5.1 Conclusiones.

- 1) Se desarrollaron dos correlaciones semiempíricas del análisis de datos de laboratorio que sirven para calcular el esfuerzo compresivo en sitio de la roca a partir de parámetros de perforación:

- a) La correlación del perfil de resistencia a la compresión (PRC), como una función del esfuerzo compresivo de la roca, (PEE/Co).

$$\frac{PEE}{Co} = 0.8974p^{-0.351} \dots\dots\dots(12)$$

- b) La correlación del perfil de energía específica (PEE), función que relaciona la energía específica de Rabia y Teale, (Es_R/Es_T).

$$PEE = 41.547Es_R^{0.6208} \dots\dots\dots(14)$$

- 2) Se desarrollo una metodología para calcular la resistencia a la compresión de la roca en sitio (Co), a partir de datos de perforación, teniendo como base teórica el estudio de la energía específica. La cual fue validada con datos de los pozos 26 D, 507, 11, 508, 505, 43, 511, 27, 55, 54, y DL3 del campo Arcos.
- 3) El rango de valores identificado de gráficas en donde cambia el mecanismo de corte esta entre 0.02 y 0.06 (pg/rev), para valores menores de 0.02 (pg/rev) se presenta el mecanismo de pulverización de la roca y para valores mayores a

0.06 (pg/rev) tenemos el mecanismo de fragmentación, este criterio se presenta para la utilización óptima de barrenas PDC.

- 4) La correlación del perfil de resistencia a la compresión en sitio de la roca es una herramienta muy útil comparada basada con cualquier otra basada en registros geofísicos.
- 5) Los perfiles de resistencia a la compresión (PRC), dan un indicativo del trabajo que debe realizarse en superficie para poder atravesar una zona con ciertas características de dureza. Evaluando así la eficiencia que tienen las barrenas empleadas durante la perforación.
- 6) Las gráficas del perfil de energía específica y resistencia a la compresión mostradas en este trabajo, proporcionan un índice para detectar posibles zonas en donde se pudieran presentar problemas durante la perforación, debido a rocas poco consolidadas.
- 7) La dureza de las rocas o resistencia a la compresión es un buen parámetro para detectar cambios en la litología del terreno, siendo información valiosa para la correlación de pozos.
- 8) Las correlaciones obtenidas son una herramienta valiosa que puede ser aplicada en campo sin que ello represente una inversión adicional a lo dispuesto para la perforación del pozo, representando una herramienta de análisis confiable que permite conocer las formaciones.

V.2 Recomendaciones.

- 1) Realizar en laboratorio, pruebas experimentales de resistencia a la compresión en muestras de núcleos del campo en estudio, con la finalidad de validar y comprobar las correlaciones obtenidas en este trabajo.

-
- 2) Validar la información de los datos de parámetros de otros campo, empleados en el análisis, para garantizar la obtención de resultados confiables al aplicar las correlaciones.
 - 3) Buscar un modelo matemático de optimización de los parámetros de perforación basado en los diferentes mecanismos de corte y los valores en los que estos se presentan.
 - 4) En el área de perforación la realización de correlaciones que nos simulen los fenómenos físicos que se presentan durante los trabajos de perforación de un pozo, son muy escasas. Por lo que este tópico representa un área de oportunidad en materia de perforación de pozos, para todas aquellas personas que en trabajos futuros deseen profundizar en el estudio del uso, aplicación y mejoramiento de este trabajo.

NOMENCLATURA:

A.- Área del agujero perforado, $[pg^2]$

A_B.- Área transversal del agujero, $[pg^2]$

Co.- Resistencia a la compresión, $\left[\frac{Lbf}{pg^2}\right]$

d.- Diámetro de la barrena, $[in]. [mm]$

Es.- Energía específica, $\left[\frac{Lbf}{pg^2}\right]$

Es_T.- Energía específica de Teale, $\left[\frac{Lbf}{pg^2}\right]$

Es_R.- Energía específica de Rabia, $\left[\frac{Lbf}{pg^2}\right]$

F.- Fuerza, $[lbf]$

MWD.- Herramienta que mide parámetros de perforación en el pozo.

N.- Velocidad de rotaria, $[rpm]$

p.- Ritmo de penetración por revolución, $\left[\frac{pg}{rev}\right]$

PRC.- perfil de resistencia a la compresión, $\left[\frac{Lbf}{pg^2}\right]$

PEE.- perfil de energía específica, $\left[\frac{Lbf}{pg^2}\right]$

Rop.- Ritmo de penetración, $\left[\frac{pg}{min}\right] \cdot \left[\frac{ft}{hr}\right] \cdot \left[\frac{m}{h}\right]$

So.- Cohesión $\left[\frac{Lbf}{pg^2}\right]$

T.- Torque, $[lbf \cdot pg]$

V.- Volumen $[pg^3]$

W.- Trabajo, $[Lbf \cdot pg]$

Wob.- Peso sobre barrena, $[lbf] \cdot [N]$

σ .- Esfuerzo compresivo uniaxial $\left[\frac{Lbf}{pg^2} \right]$

σ_n .- Esfuerzo normal $\left[\frac{Lbf}{pg^2} \right]$

σ_t .- Esfuerzo Tangencial $\left[\frac{Lbf}{pg^2} \right]$

ϕ .- Angulo de fricción (grados)

τ_o .- Resistencia a la tensión $\left[\frac{Lbf}{pg^2} \right]$

Referencias

1. Garnier , A.J., and van Lingen , N.H., "Phenomena affecting drilling rates at depth." Trans., AIME (1959) 216, 9-17.
2. Gray, K.E.,y Gatlin,C.: "Two-Dimensional study of rock breakage in drag-bit drilling at atmospheric pressure." J.Pet. Tech. Enero 1962., 93-98: Trans AIME.225.
3. Galle E.M. and Woods, A.B., : "Best constant weight and rotary speed for rotary rock bits." Drill and Prod Prac., API (1963) 48-73.
4. Teale R. : "The Concept of Specific Energy in Rock Drilling." Intl. J. Rock Mech Mining Sci. Vol 2, pp. 57-73, (1965).
5. Rabia, H.: "Specific Energy as a Criterion for Drill Performance Prediction," Intl. J. Rock Mech. & Min. Sci. (Feb. 1982)19,No.1.
6. Rabia, Hussain: "Specific Energy as a Criterion for Bit Selection," J. Pet. Tech. (July 1985).
7. Rabia, H.; Farrelly, M., U. of Newcastle Upon Tyne, and Barr, M.V., British Petroleum plc.: "A New Approach to Drill Bit Selection," Copyright 1986, Society of Petroleum Engineers
8. Farrelly, M. and Rabia, H., U. of Newcastle Upon Tyne.: "Bit Performance and Selection: A Novel Approach," 1987 SPE/IADC Drilling Conference held in New Orleans, LA March 15-18, 1987.
9. Pessier R.C., Hughes Tool co., Fear M.J., Exploration BP: "Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and a bit-specific coefficient of sliding friction." SPE held in Washington, DC, October 4-7, 1992.
10. Reddish D.J., Ergul Yasar,: "A new portable rock strength index test based on specific energy of drilling.", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol 33, No. 5, pp 543-548,1996.
11. Elkington P.A.S.,Stouthamer P., Brown J.R.: "Rock Strength predictions from wireline logs.", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol 19, pp 91-97,1982.

-
12. Falconer I.G., Burgess T.M., Sheppard M.C., Anadrill/Schlumberger: "Separating bit and lithology effects from drilling mechanics data." SPE/IADC Drilling Conference held in Dallas, Texas, February 28-March 2, 1988.
 13. Onyia, E.C., Amoco Production Co.: "Relationships between formation strength, drilling strength, and electric log properties." SPE held in Houston, Tx., October 2-5, 1988
 14. Warren T.M., Winters W.J., Onyia, E.C.: "Roller bit model with rock ductility and cone offset." SPE presented at the Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Tx., September 27-30, 1987.
 15. Andersen E.E., Azar J.J.: "PDC-Bit performance under simulated borehole conditions.", SPE Drilling & Completion, September 1993.
 16. Richard T., Detournay E., Drescher A., Nicodeme P., Fourmaintraux D.: "The scratch test as a means to measure strength of sedimentary rocks," SPE/ISRM Eurock 98 July 6-10, 1998.
 17. Sarda J.P., Deflandre J.P., Kessler N., Wicquart E., Hannaford K.: "Use of Porosity as a Strength Indicator for Sand Production" SPE Presented at 68th ATCE, Texas, October 1993.
 18. Gustavo Gutiérrez Escobedo: "Determinación de la Resistencia a la Compresión Uniaxial a partir de Registros." Tesis de Maestría, DEPI, UNAM, Mayo 2001.
 19. García Gavito, Daniel: "Cutting mechanics modelling for polycrystalline diamond compact and extension to the drill bit.", Ph. D. Dissertation, The University of Tulsa, 1998.
 20. Rodríguez Saucedo, Nicolás; Tesis "Diseño de tuberías de revestimiento por análisis triaxial y su aplicación en pozos horizontales.", Tesis de Maestría, DEPI, UNAM-1993
 21. Sánchez Pérez, Antonio; "Selección optimizada de barrenas tricónicas.", Tesis de Maestría, DEPI, UNAM-1995
 22. Erling Fjaer, M. Holt, Per Horsrud, Arne M. Raaen Iku, and Rasmus Risnes: "Petroleum related rock mechanics.", Regalund University Centre, Stavanger, Norway.
-

Apéndice 1

Derivación de la ecuación de la energía específica para perforación rotatoria

La energía en la barrena en 1 minuto en Joules es:

$$E = Wob \cdot 2\pi R \cdot N \dots\dots\dots (A1)$$

Donde:

Wob = peso sobre barrena [kg]

$2\pi R$ = distancia de movimiento en una revolución [mm]

R = Radio de la barrena [mm]

N = revoluciones por minuto

Volumen de roca removido en 1 minuto es:

$$V = \pi R^2 \cdot Rop \dots\dots\dots (A2)$$

Donde:

Rop = ritmo de penetración [m/hr]

Dividiendo las ecuaciones A1 y A2, expresando la energía específica (Es) en términos del volumen de roca removido tenemos:

$$Es = \frac{Wob \cdot 2\pi R \cdot N}{\pi \cdot R^2 \cdot Rop} \frac{9.81 \times 10^{-3} J/min}{(10^{-6}/60)m^3/min} \dots\dots\dots (A3)$$

Simplificando la ecuación:

$$Es = 2.35 \frac{Wob \cdot N}{d \cdot Rop} \left[\frac{MJ}{m^3} \right]$$

Donde:

d = diámetro de la barrena [mm]

La misma ecuación en unidades de campo nos queda:

$$Es = 20 \frac{Wob \cdot N}{d \cdot Rop}$$

Donde:

Wob = peso sobre barrena [lbf]

N = revoluciones por minuto

d= diámetro de la barrena [in]

Rop = ritmo de penetración [ft-hr]

Apéndice 2

Datos de pruebas de perforación y figuras complementarias.

Prueba 2, datos de perforación en lutita tipo 1.

Barrena 8,5 pg Tipo I Lodo 12 lb/gal,
Toberas 4) 11/32" 0.37 pg² Base Aceite

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	p=Rop/N (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabia (lb/pg ²) Ecuación 11
1	3,2	0,125	7872	1391	82	7031,82	5262,38
2	4,8	0,1471	10188	2723	80	7696,01	8687,54
3	6,9	0,1823	13068	4275	80	8003,97	11023,37
4	9,5	0,1115	8040	1506	142	8027,45	6369,38
5	11,7	0,1191	9876	2903	141	9229,05	11465,63
6	14,6	0,1372	11988	4245	144	9728,56	14528,34
7	18,3	0,0767	7224	1183	352	10449,03	7257,80
8	19,6	0,0228	2076	520	350	10065,91	10705,88
9	21,3	0,0387	3456	959	352	9921,33	11680,55
10	24,2	0,1279	8388	2787	81	7282,84	10214,80
11	26,7	0,1188	9240	2977	145	8677,55	11810,26
12	30,2	0,1321	10020	2761	142	8428,78	9813,82
13	32,6	0,1218	9948	2844	143	9102,75	10999,11

Tabla 8. Datos de perforación en lutitas tipo 1, fluido base aceite, barrena tipo 1.

Prueba 6, datos de perforación en lutita tipo 1.

Barrena 8,5 pg Tipo I Lodo 12 lb/gal,
Toberas 4) 11/32" 0.37 pg² Base Agua

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	p=Rop/N (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabia (lb/pg ²) Ecuación 11
1	3,2	0,0094	840	1425	81	9938,06	71470,59
2	3,9	0,0151	2196	2876	81	16194,63	89857,67
3	5	0,037	3708	4353	81	11236,62	55679,91
4	5,6	0,0057	816	1443	141	15950,14	119684,12
5	6,6	0,0078	852	2877	141	12143,26	173543,10
6	7,5	0,0071	924	4327	141	14502,16	287109,18
7	8,4	0,0023	924	1393	350	43694,06	279799,14
8	9,4	0,0034	564	2875	350	18573,92	401296,11
9	10,1	0,0036	1008	4344	350	31080,01	567843,14
10	10,9	0,0138	1428	2868	81	11485,84	97608,40
11	11,9	0,0078	1296	2882	141	18445,10	173844,71
12	13,1	0,0042	888	2886	351	23369,89	322094,12
13	14,9	0,0097	1008	2899	140	11540,61	140435,99
14	16	0,0117	900	2937	80	8532,95	117627,03
15	17,1	0,0145	2316	5807	81	17705,62	187584,05
16	18,3	0,0185	3240	8667	81	19525,47	220243,76
17	19	0,0054	732	2888	141	15088,16	252141,18
18	19,7	0,0097	2364	5816	140	27048,15	281743,94
19	20,6	0,0096	3072	8723	141	35419,51	425585,81
20	21,3	0,0028	456	2881	351	18134,92	485585,11
21	22,2	0,0045	1584	5813	351	39065,88	607703,05
22	23,3	0,0055	2184	8649	350	44235,46	741948,53
23	24,8	0,0055	2268	8639	351	46061,58	743208,09

Tabla 9. Datos de perforación en lutitas tipo 1, fluido base agua, barrena tipo 1.

Prueba 10, datos de perforación en lutita tipo 1.

Barrena 8,5 pg Toberas 4) 11/32"		Tipo II 0.37 pg ²		Lodo 12 lb/gal Base Agua			
No de dato	Intervalo Perforado (pg)	p=Rop/N (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabia (lb/pg ²) Ecuación 11
1	2,1	0,0171	1728	1475	82	11232,80	40655,46
2	3	0,0246	3084	2955	81	13882,05	56318,82
3	4,1	0,0212	3096	4503	81	16223,30	99792,89
4	4,6	0,0066	1212	1409	140	20446,67	100900,26
5	5,4	0,0084	1956	2938	141	25931,41	165207,58
6	6,1	0,0094	2640	4457	141	31303,46	224041,71
7	6,7	0,0026	1464	1351	350	63064,18	247241,83
8	7,3	0,0039	1776	2932	350	49926,80	349940,32
9	8,4	0,0046	2076	4448	351	50505,79	459190,59
10	9	0,0099	1536	2914	81	17271,56	138843,53
11	9,8	0,0064	1296	2952	140	22374,51	216094,12
12	10,6	0,0028	1296	2901	351	51448,17	488956,06
13	12,2	0,0093	3276	2938	140	39116,14	148894,12
14	12,9	0,0092	2100	2989	80	25190,61	152063,59
15	13,7	0,0144	3336	6007	80	25580,62	194953,35
16	14,6	0,0219	5040	9171	80	25528,08	196171,12
17	15,1	0,0059	1872	2972	140	35441,69	238783,36
18	16,8	0,0257	5340	6016	140	23100,25	110096,73
19	18,4	0,0239	6456	9152	142	30016,83	179873,22
20	19,4	0,004	2232	2940	351	62013,81	346870,59
21	20,9	0,0051	3048	6063	351	65918,33	556369,41
22	22,1	0,0052	3756	9128	351	79496,26	819418,93
23	24,6	0,0056	3528	9147	352	69608,95	765239,22
24	25,8	0,0124	2472	2975	81	22223,44	113400,00
25	26,9	0,0212	4668	6072	80	24430,39	134466,44
26	30,6	0,0461	9084	9069	80	21907,73	92275,99
27	31,5	0,0146	3192	2957	141	24243,84	95245,46

Tabla 10. Datos de perforación en lutitas tipo 1, fluido base agua, barrena tipo 2.

Prueba 15, datos de perforación en lutita tipo 1.

Barrena 8,5 pg Toberas 4) 11/32"		Tipo II 0.37 pg ²		Lodo 12 lb/gal Base Aceite			
No de dato	Intervalo Perforado (pg)	p=Rop/N (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabia (lb/pg ²) Ecuación 11
1	2,2	0,0772	4884	1554	80	7050,62	9497,33
2	4	0,1014	7152	2989	79	7872,85	13890,06
3	5,7	0,1153	9744	4552	80	9462,13	18627,11
4	7,2	0,0491	3984	1511	140	9003,21	14469,22
5	8,9	0,0707	6204	3021	142	9807,90	20187,39
6	11,1	0,078	7272	4612	142	10438,07	27915,77
7	14,2	0,0458	4524	4270	350	29102,49	116439,42
8	17,9	0,0616	6384	2903	350	11505,21	22136,17
9	20,3	0,0737	8172	4550	350	12355,39	29046,97
10	23,5	0,0857	6600	3099	79	8544,74	16942,63
11	25,5	0,0731	6396	3070	139	9724,13	19726,34
12	29,5	0,0617	6480	3110	350	11681,10	23714,60
13	31,9	0,0754	6468	3094	139	9535,38	19274,67

Tabla 11. Datos de perforación en lutitas tipo 1, fluido base aceite, barrena tipo 2.

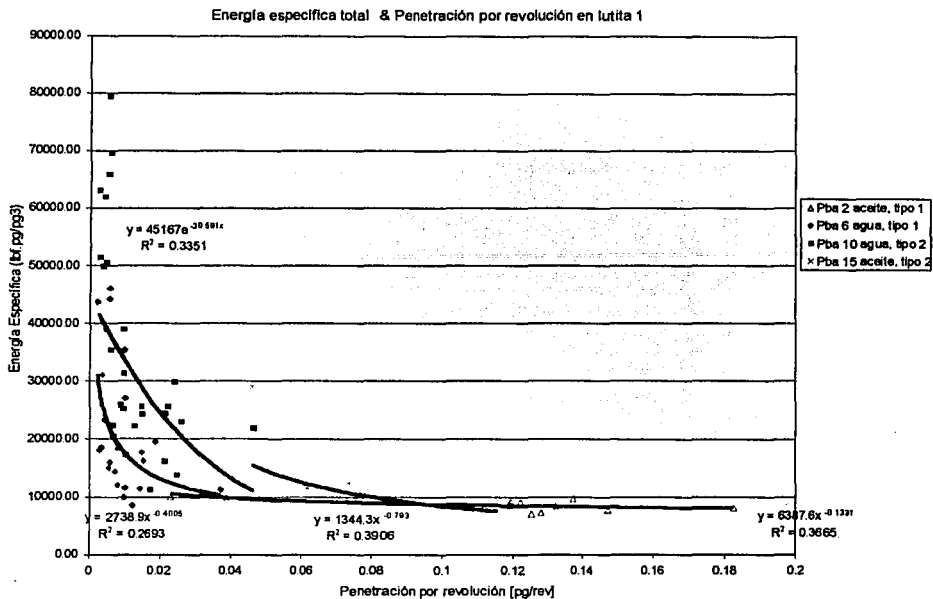
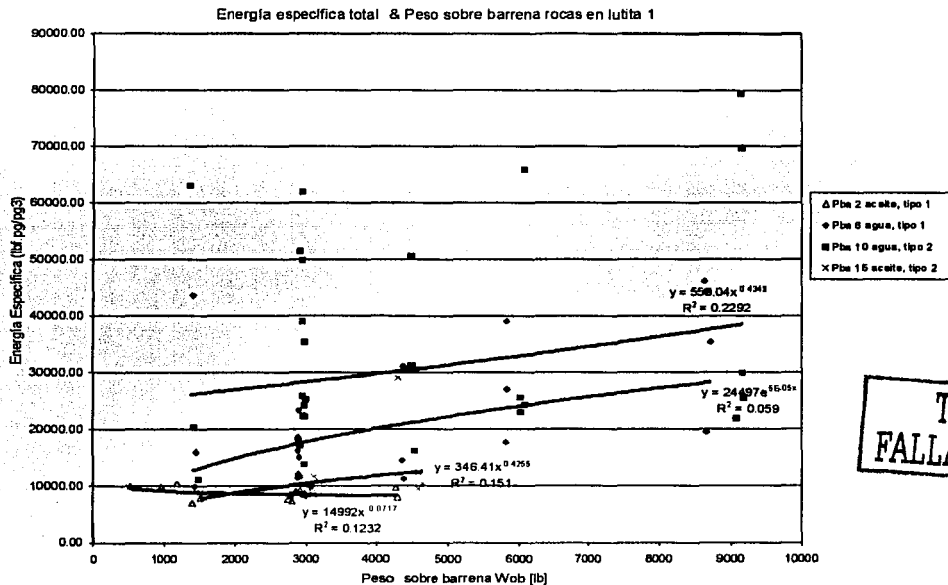


Figura 35. Energía específica como una función de la penetración por revolución Rop (pg/rev), en lutitas tipo 1.



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Figura 36. Energía específica como una función del peso sobre barrena Wob (lb), en lutitas tipo 1.

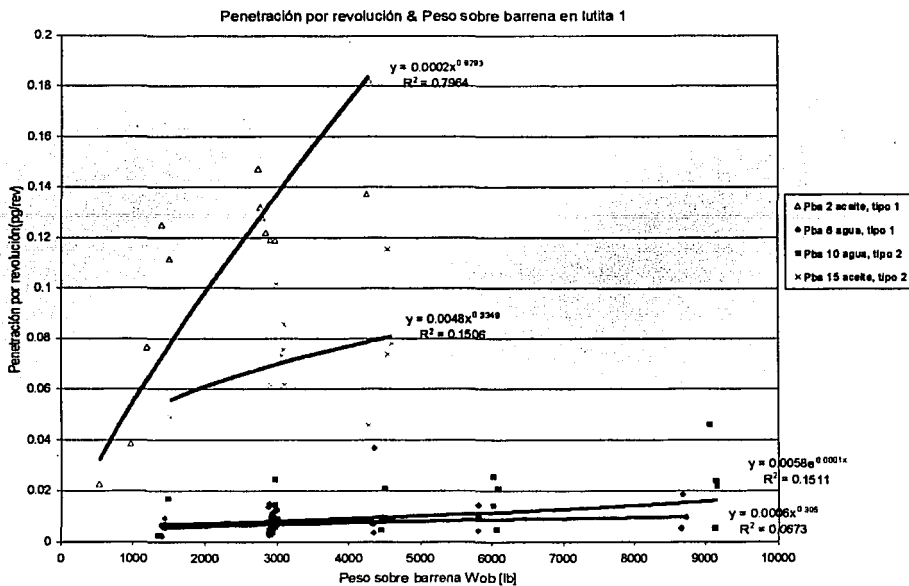


Figura 37. Penetración por revolución como una función del peso sobre barrena Wob (lb), en lutitas tipo 1.

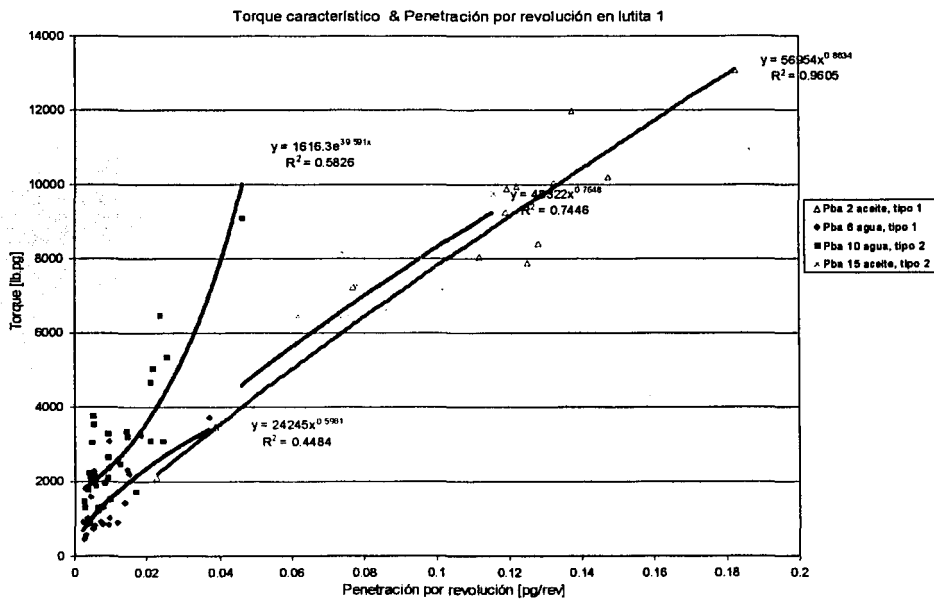


Figura 38. Torque característico como una función de la penetración por revolución Rop (pg/rev), en lutitas tipo 1.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Prueba 1, datos de perforación en lutita tipo 2.

Barrena 8,5 Tipo 1 **Lodo** 12 lb/gal
Toberas 4) 11/32" 0.37 pg² **Base Aceite**

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	p=Rop/N (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabia (lb/pg ²) Ecuación 11
1	4	0,0401	11280	2922	80	31082,46	34162,95
2	5,2	0,0887	23928	5962	80	30042,55	31702,23
3	7	0,1251	35928	9041	80	31984,82	34036,71
4	8,7	0,0366	10716	2982	141	32475,63	38345,83
5	10,6	0,0872	24048	6033	140	30662,51	32579,36
6	13,3	0,1162	33864	9074	139	32332,81	36638,66
7	15,4	0,0406	11916	2931	352	32529,65	33951,86
8	21,3	0,0746	19956	5311	351	29696,30	33482,91
9	24,2	0,0154	5316	1446	353	38221,05	44155,54
10	25,6	0,1006	25800	6009	83	28333,28	27941,01
11	27,9	0,0978	25944	6058	143	29449,26	29119,13
12	30,4	0,0444	12024	2956	351	30008,08	31298,82
13	32,3	0,1068	25668	6083	142	26658,69	26742,60

Tabla 12. Datos de perforación en lutitas tipo 2, fluido base aceite, barrena tipo 1.

Prueba 5, datos de perforación en lutita tipo 2.

Barrena 8,5 Tipo 1 **Lodo** 12 lb/gal
Toberas 4) 11/32" 0.37 pg² **Base Agua**

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	p=Rop/N (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabia (lb/pg ²) Ecuación 11
1	3,8	0,0504	10344	2571	80	22725,63	23958,07
2	5,6	0,0996	20460	5054	80	22743,74	23783,53
3	7,7	0,1382	28728	7616	82	23014,77	25779,65
4	8,7	0,0234	6372	2475	141	30189,85	49764,71
5	10,6	0,0647	15036	4937	142	25784,15	35859,54
6	13	0,1276	28368	7450	141	24736,52	27462,75
7	15,7	0,0336	8340	2412	351	27511,53	33763,19
8	18,2	0,0789	17436	4372	347	24526,99	26055,54
9	20,7	0,0456	11508	3248	351	28010,93	33530,82
10	23,1	0,0701	15144	3956	351	23995,42	26562,53
11	24,5	0,0835	17520	5093	81	23197,75	28549,00
12	26,4	0,075	17376	5063	140	25742,37	31767,84
13	28,8	0,0426	10920	2900	352	28425,47	32025,10
14	30,6	0,0999	21216	5014	140	23580,12	23595,29
15	32,6	0,0942	20352	5032	140	23989,53	25115,15

Tabla 13. Datos de perforación en lutitas tipo 2, fluido base agua, barrena tipo 1.

Prueba 9, datos de perforación en lutita tipo 2.

Barrena 8,5 Tipo II Lodo 12 lb/gal
 Toberas 4) 11/32" 0.37 pg² Base Agua

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	p=Rop/N (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabia (lb/pg ²) Ecuación 11
1	2	0,0109	6504	3082	81	66342,33	133498,40
2	2,8	0,0292	14820	6156	80	56209,98	99040,72
3	4,1	0,0415	20460	9206	80	54424,92	103766,11
4	5,1	0,0121	6144	3081	141	56479,55	120254,95
5	6,5	0,0291	13404	6126	140	51035,70	98920,42
6	7,9	0,0432	18888	9227	140	48638,88	100645,11
7	9,6	0,0157	6984	3043	350	49264,57	91127,27
8	12	0,0342	14160	6121	351	45968,63	84253,76
9	14,9	0,0488	20520	9124	351	46798,85	88132,76
10	16,8	0,0397	14784	6132	80	41550,66	73054,36
11	18,7	0,0357	14412	6151	140	44790,58	81048,47
12	22,2	0,0343	13884	6121	350	44946,62	84013,73
13	23,9	0,0432	16056	6172	140	41180,68	67099,98
14	25,6	0,0348	14928	6204	141	47673,16	84010,95
15	27,2	0,0352	13560	6149	141	42790,80	82258,92
16	28,9	0,036	13764	6156	140	42275,64	80152,52
17	29,6	0,0225	8052	3124	82	39788,11	65516,11
18	30,3	0,0373	15456	6180	81	46010,45	78002,34
19	31,5	0,0489	21876	9227	80	49596,40	88614,65

Tabla 14. Datos de perforación en lutitas tipo 2, fluido base agua, barrena tipo 2.

Prueba 14, datos de perforación en lutita tipo 2.

Barrena 8,5 Tipo II Lodo 12 lb/gal
 Toberas 4) 11/32" 0.37 pg² Base Aceite

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	p=Rop/N (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabia (lb/pg ²) Ecuación 11
1	3	0,0384	10776	2814	80	31041,55	34395,72
2	4,3	0,0568	18084	5666	80	35229,33	46778,12
3	5,9	0,0677	24828	8563	81	40637,96	59345,71
4	7,2	0,0283	9204	2806	140	36079,23	46683,30
5	9,3	0,052	17928	5673	141	38442,46	51564,42
6	11,1	0,0557	22116	8624	140	44105,34	72842,23
7	13,1	0,0182	7572	2789	351	46031,36	71980,81
8	15,8	0,0502	17220	5633	350	38016,85	52715,24
9	18,6	0,0541	20724	8524	351	42541,76	74103,38
10	20,2	0,0433	16020	5703	80	41114,16	62052,36
11	21,9	0,0484	16692	5658	139	38216,42	54910,94
12	24,8	0,0396	15192	5748	349	42581,29	68308,57
13	26,3	0,0514	17880	5719	142	38611,81	52351,20
14	27,9	0,043	15792	5732	141	40920,87	62969,38
15	29,3	0,0377	15816	5715	140	46535,44	71310,16
16	30,9	0,0384	15360	5680	141	44508,86	69793,46
17	31,5	0,032	10740	2778	81	34698,43	38090,22
18	32,2	0,0461	19440	5710	82	46549,87	57983,90
19	33	0,0624	24720	9219	80	43957,07	69413,65

Tabla 15. Datos de perforación en lutitas tipo 2, fluido base aceite, barrena tipo 2.

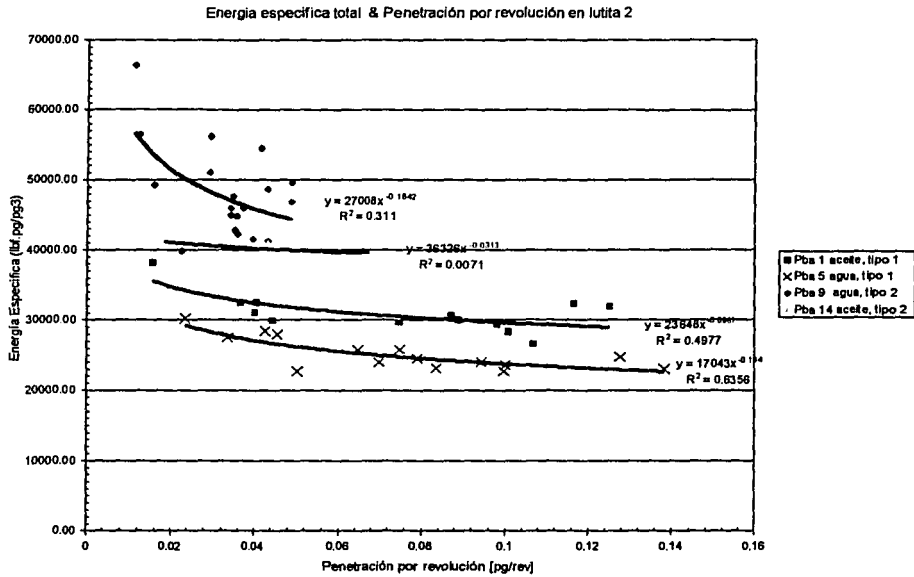


Figura 39. Energía específica como una función de la penetración por revolución Rop (pg/rev), en lutitas tipo 2.

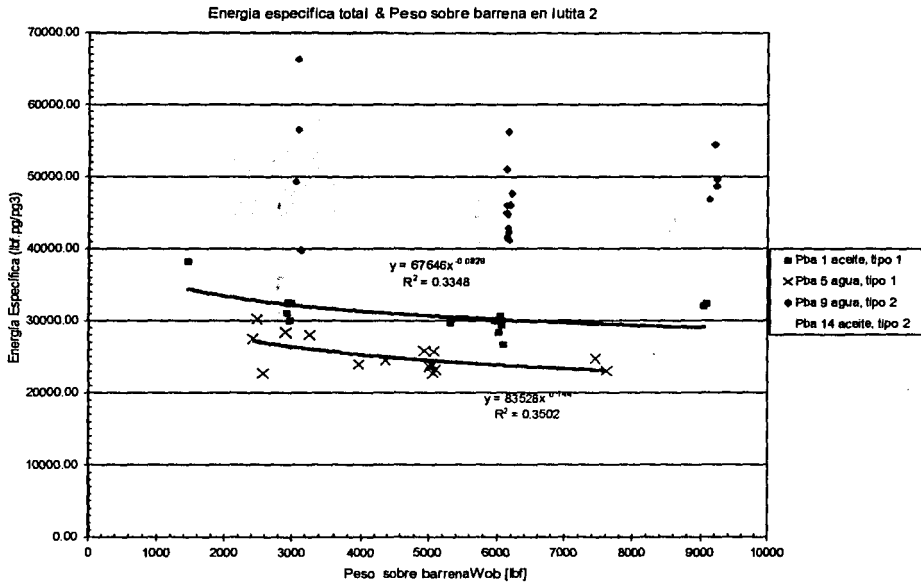
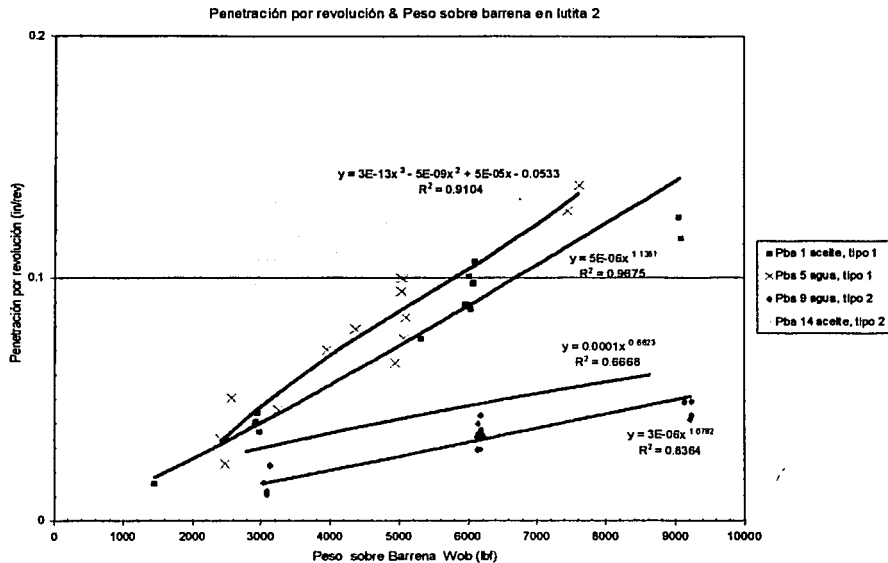


Figura 40. Energía específica como una función del peso sobre barrena Wob (lbf), en lutitas tipo 2.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Figura 41. penetración por revolución como una función del peso sobre barrena Wob (lbf), en lutitas tipo 2.

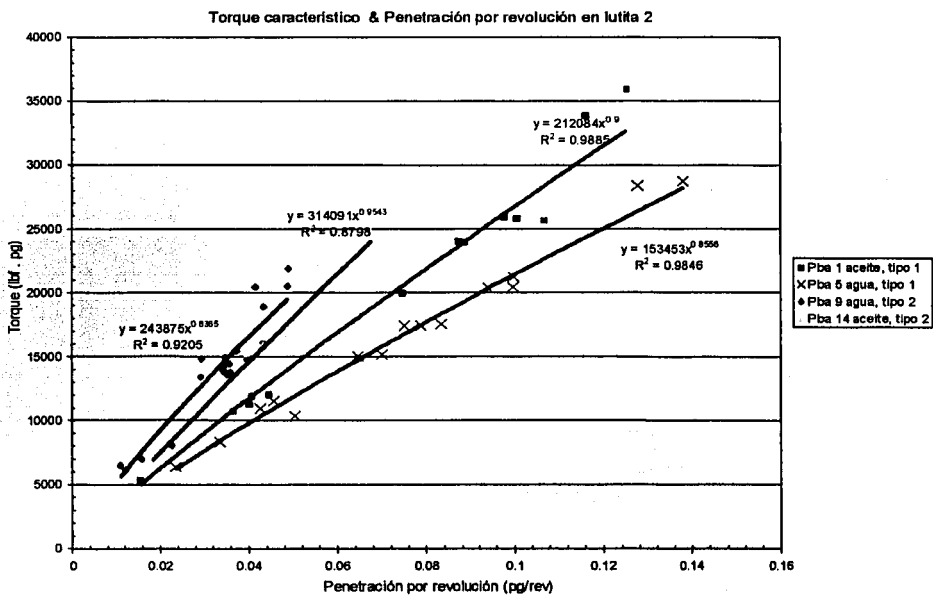


Figura 42. Torque característico como una función de la penetración por revolución Rop (pg/rev), en lutitas tipo 2.

Prueba 4, datos de perforación en arenisca.

Barrena 8,5 pg
Toberas 4) 11/32"

Tipo I
0.37 pg²

Lodo 12 lb/gal
Base Aceite

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	p=Rop/N (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabia (lb/pg ²) Ecuación 11
1	4,3	0,1101	10332	1591	80	10428,29	6806,42
2	5,8	0,1367	17928	3103	80	14491,83	10619,89
3	7,4	0,1635	25716	4590	81	17553,85	13254,55
4	9,2	0,0638	9492	1636	141	16494,77	12061,49
5	11,1	0,1104	16932	3080	138	17075,70	13159,13
6	13,3	0,1122	22080	4628	141	21899,47	19435,53
7	15,7	0,0302	8136	1662	368	29896,04	25929,67
8	18,3	0,0685	14052	3059	350	22744,57	20993,14
9	21,8	0,1194	19320	3280	80	17884,79	12862,75
10	24,9	0,1009	16884	2959	139	18613,70	13825,24
11	28,3	0,062	15132	3054	339	27101,43	23200,13
12	30,3	0,02	4176	888	350	23135,37	20894,12
13	32,7	0,1142	16956	3028	140	16481,32	12468,24

Tabla 16. Datos de perforación en areniscas, fluido base aceite, barrena tipo 1.

Prueba 7, datos de perforación en arenisca.

Barrena 8,5 pg
Toberas 4) 11/32"

Tipo I
0.37 pg²

Lodo 12 lb/gal,
Base Agua

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	p=Rop/N (pg/rev)	Torque (lbf . pg)	PSB (lb)	RPM	Energía específica de Teale (psi) Ecuación 9	Energía específica de Rabia (psi) Ecuación 10
1	3,6	0,059	6060	1434	81	11443,61	11483,34
2	6,3	0,1489	15660	2912	83	11752,15	9247,10
3	9	0,2061	27804	4458	82	14928,49	10119,20
4	10,7	0,0388	5832	1465	142	16698,11	17799,36
5	13,3	0,1222	16032	2920	142	14538,47	11214,06
6	16,3	0,1742	26328	4345	140	16803,19	11731,92
7	20,8	0,0387	6552	1488	351	18750,03	18072,25
8	23,9	0,0719	14004	2940	351	21649,68	19270,59
9	26	0,0547	9408	2259	351	19083,69	19434,04
10	28	0,0461	4956	1480	81	11974,92	15165,09
11	28,9	0,0403	4644	1306	144	12789,72	15258,74
12	31,2	0,0745	14124	2774	351	21000,41	17488,53

Tabla 17. Datos de perforación en areniscas, fluido base agua, barrena tipo 1.

Prueba 12, datos de perforación en arenisca.

Barrena 8,5 pg
Toberas 4) 11/32"

Tipo II
0.37 pg²

Lodo 12 lb/gal
Base Agua

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	p=Rop/N (pg/rev)	Torque (lb . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabia (lb/pg ²) Ecuación 11
1	2,3	0,034	5796	1437	80	18763,18	19744,10
2	3,1	0,0569	10104	2034	80	19837,30	16941,18
3	4,5	0,0704	14700	4366	81	23207,15	29196,78
4	6	0,0271	5436	1456	140	22201,29	25243,34
5	7,5	0,0498	10416	29,05	141	23231,85	275,36
6	9,3	0,0542	14772	4364	140	30207,37	37830,34
7	11,4	0,0183	4992	1404	651	56074,36	66996,81
8	13,5	0,0379	10836	2903	349	31774,04	36119,32
9	16,1	0,0486	15300	4371	350	34955,92	42348,79
10	18,7	0,0623	9384	2852	80	16809,27	21647,06
11	20,9	0,056	10452	2874	140	20664,40	24089,81
12	23,9	0,0386	10476	2844	350	30078,99	34646,71
13	26,1	0,0607	10944	2968	140	19964,39	22950,57
14	27,8	0,055	11472	2976	140	23088,18	25397,14
15	29,2	0,0505	10908	2974	141	23971,04	27715,40
16	30,4	0,0471	10452	2981	140	24601,64	29756,86
17	31,2	0,0389	5796	1560	81	16582,75	18937,43
18	32	0,0654	10368	2968	80	17579,23	21323,75

Tabla 18. Datos de perforación en areniscas, fluido base agua, barrena tipo 2.

Prueba 13, datos de perforación en arenisca.

Barrena 8,5 pg
Toberas 4) 11/32"

Tipo II
0.37 pg²

Lodo 12 lb/gal
Base Aceite

No de dato	Intervalo Perforado (pg)	p=Rop/N (pg/rev)	Torque (lb . pg)	Wob (lb)	RPM	Energía específica de Teale (lb/pg ²) Ecuación 10	Energía específica de Rabia (lb/pg ²) Ecuación 11
1	1,8	0,049	6024	1533	79	13608,04	14688,54
2	3	0,0719	9636	3092	79	14842,21	20166,60
3	4,3	0,0822	14256	4602	80	19331,33	26410,33
4	5,6	0,0341	5748	1525	141	18722,79	21080,88
5	6,9	0,0549	10680	2953	139	21567,21	25282,85
6	8,5	0,0629	14976	4563	139	26392,70	34072,36
7	10,2	0,0172	4752	1518	350	30618,21	41532,15
8	12,3	0,0334	10356	3030	350	34355,94	42654,60
9	15,1	0,0371	14256	4607	350	42579,78	58369,23
10	17,2	0,0556	9996	2984	80	19995,35	25301,54
11	19,3	0,049	10320	3091	140	23374,86	29685,47
12	21,8	0,0276	9120	3029	351	36594,54	51579,33
13	23,5	0,0517	11892	3082	141	25557,52	28090,63
14	25,4	0,0522	11460	3121	139	24283,15	28042,60
15	27	0,0461	11160	3093	140	26917,75	31641,94
16	28,4	0,0413	11232	3155	143	30199,07	35985,24
17	29,6	0,0571	7440	1587	80	14480,71	13102,17
18	30,8	0,0753	10836	3092	80	16052,27	19400,78
19	31,8	0,0827	15348	4656	80	20681,23	26558,29

Tabla 19. Datos de perforación en areniscas, fluido base aceite, barrena tipo 2.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

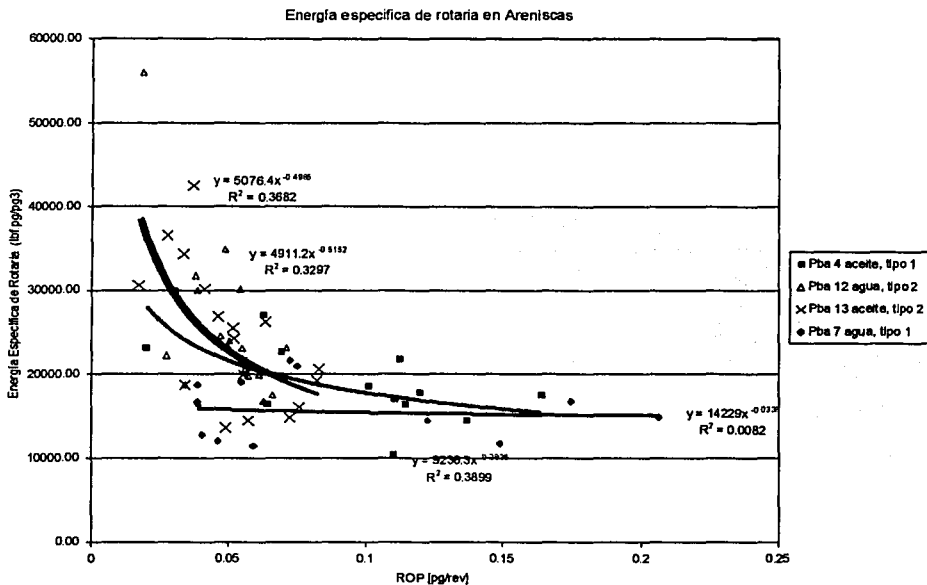


Figura 43. Energía específica como una función de la penetración por revolución Rop (pg/rev), en arenisca.

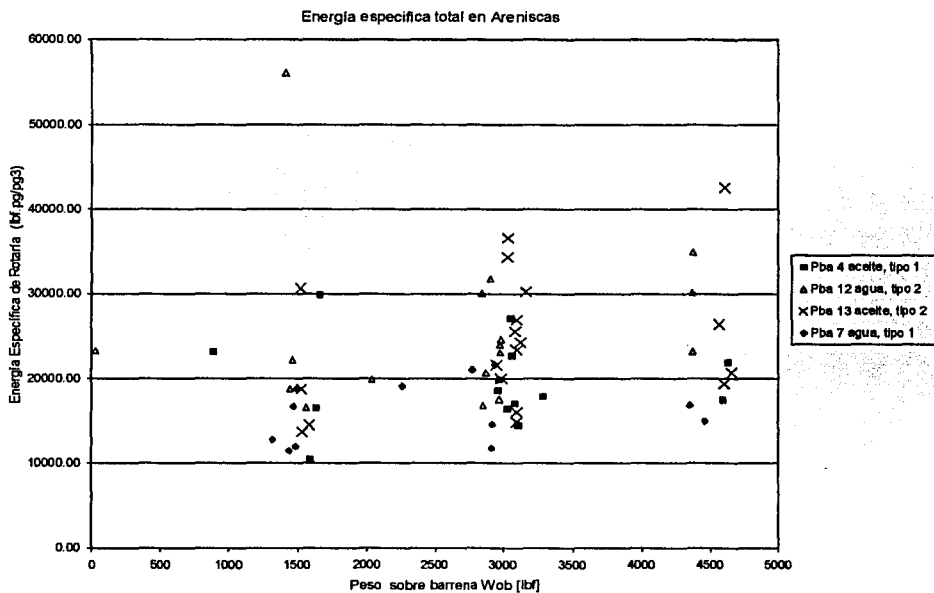


Figura 44. Energía específica como una función del peso sobre barrena Wob (lbf), en areniscas 1.

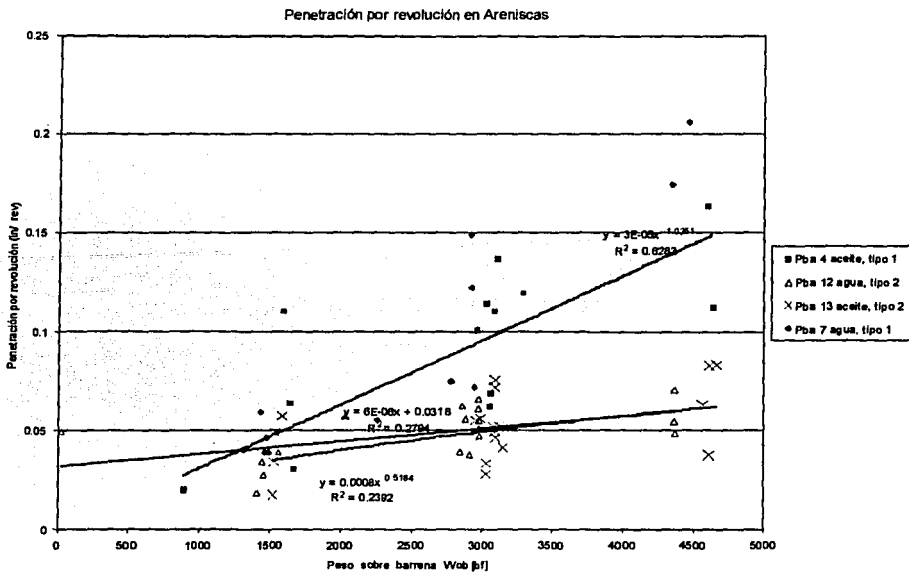


Figura 45. Penetración por revolución como una función del peso sobre barrena Wob (lb-f), en areniscas.

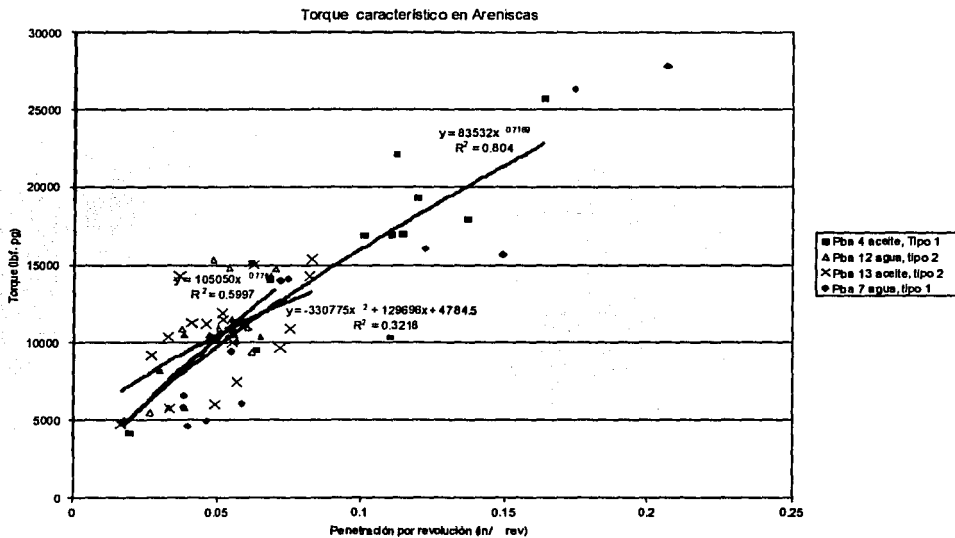


Figura 46. Torque característico como una función de la penetración por revolución Rop (pg/rev), en areniscas.