

01174

5
20



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
División de Estudios de Postgrado

DISEÑO DE LOS APAREJOS DE FONDO
PARA EL CONTROL DE LA DESVIACION

TESIS DE MAESTRIA

Que para obtener el Título de
MAESTRO EN INGENIERIA PETROLERA

p r e s e n t a

DAVID MANUEL HERNANDEZ MORALES



Asesor. Dr. Daniel García Gavito

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Ciudad Universitaria, Octubre 1994

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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 está 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.

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**DISEÑO DE LOS APAREJOS DE FONDO PARA
EL CONTROL DE LA DESVIACIÓN**

DAVID MANUEL HERNÁNDEZ MORALES

**DR. DANIEL GARCÍA GAVITO
ASESOR**

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO 1994.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

RECIBI COPIA DE:

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

() TRABAJO ESCRITO
(XXX) TESIS


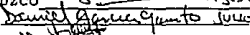


DESARROLLADO POR EL ALUMNO: DAVID MANUEL HERNANDEZ MORALES

PARA PRESENTAR EXAMEN:

() DE ESPECIALIDAD


(XX) DE GRADO

EN INGENIERIA: PETROLERA

	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE:	DR. FERNANDO SAMANIEGO VERDUZCO	 Agosto 11, 1994
VOCAL:	M EN C DANIEL GARCIA GAVITO	 Julio 94
SECRETARIO:	M EN I FILEMON RIOS CHAVEZ	 10 Julio 94
SUPLENTE:	ING. EUSEBIO CAPITANACHI GONZALEZ	 11/05/94
SUPLENTE:	ING. HORACIO ZUÑIGA PUENTE	

APROBACION DEL TRABAJO DE TESIS POR EL DEPARTAMENTO DE
EXPLORACION Y EXPLOTACION DE RECURSOS ENERGETICOS DEL SUBSUELO

PROMEDIO EN CREDITOS: — Aprobado con 10 (diez) créditos —


DR. FERNANDO RODRIGUEZ DE LA GARZA;
JEFE DE LA SECCION DE ING. PETROLERA.

FECHA: 11 de agosto de 1994

DEDICATORIA

Esta tesis esta dedicada con a mi esposa Alicia y mis hijos José David y Luis Daniel, porque son la fuente de energía que me alimentan día a día para seguir adelante; pero sobre todo por su amor, apoyo y comprensión que siempre me han brindado.

AGRADECIMIENTOS

A mi Padre

Como un pequeño reconocimiento a su memoria, que este donde este, lo único que puedo manifestarle con un fuerte abrazo, es decirle gracias por todas sus enseñanzas.

A mi Madre

Por su dedicación, apoyo y comprensión que siempre me ha brindado pero sobre todo por su amor y sus sabios consejos.

A mi Hermano y su Familia

Por su apoyo y consejos que me has dado como hermano, amigo, hombre y Padre. Asimismo, deseo que mis sobrinos pronto alcancen metas similares.

A Familiares y Amigos

Por su confianza y apoyo incondicional que siempre y a todo momento me han manifestado.

Al Dr. Daniel García Gavito

Por su amistad, apoyo y conocimientos aportados para la realización de esta tesis.

A Profesores y Escuelas

A todos aquellos Profesores(as) que tuve durante mi desarrollo, como una muestra de mi más sincero agradecimiento por su dedicación y empeño a su labor docente. Asimismo, a todas mis Escuelas.

A Petróleos Mexicanos

Por su confianza y apoyo que me brindo para alcanzar esta meta.

RESUMEN

Los aparejos de fondo son una parte muy importante de la sarta de perforación que afecta la trayectoria de la barrena y como consecuencia al agujero perforado.

En un principio los aparejos de fondo lisos (barrena y lastrabarrenas) fueron los más comunes. Los primeros investigadores fueron Lubinski y Wood en donde diseñaron los aparejos tipo péndulo los cuales son actualmente muy utilizados para el control de la desviación.

En la práctica los aparejos de fondo han sido analizados desde el punto de vista cualitativo y en la mayoría de los casos han presentado resultados satisfactorios. Sin embargo, cuando las condiciones geológicas del área por perforar son altamente severas los aparejos de fondo reaccionan de una manera diferente.

En esta Tesis se presentan los factores que afectan el comportamiento del aparejo de fondo; los cuales varían desde los parámetros controlables hasta las condiciones presentes en la naturaleza.

En el año de 1982 Bai Jiazhi presenta la primera solución analítica en dos dimensiones para condiciones estáticas; posteriormente aparecieron los métodos numéricos para condiciones dinámicas en tres dimensiones. En la actualidad existen un gran número de métodos que pueden predecir el comportamiento de los aparejos de fondo. Sin embargo, estos métodos arrojan resultados de la magnitud de la fuerza en la barrena al perforar a una profundidad determinada. En el año de 1991 Paul Arthur Larson de la Universidad de Tulsa, E.U.A. desarrollo un programa de simulación del comportamiento del aparejo de fondo en tres dimensiones para condiciones semi-dinámicas, el cual permite simular el cambio de ángulo y rumbo al perforar un intervalo determinado con base en las condiciones de operación, geológicas y en la propia configuración del aparejo.

Por otro lado, se presenta el manejo del programa de simulación desarrollado por P.A. Larson. Asimismo fue cuidadosamente seleccionado un ejemplo práctico de campo del área de la sierra de Chiapas, donde las condiciones geológicas son altamente severas. El programa de pozo: Nazareth 1, fue el de perforar verticalmente a la profundidad de 4100 m dentro de la formación Cretácico inferior. Sin embargo, durante la perforación del mismo se alcanzó un ángulo máximo de desviación de $8^{\circ}40'$, con un desplazamiento de la vertical de 284.84 m a la profundidad vertical de 4085 m. Es importante mencionar que se utilizaron diversos arreglos de aparejos de fondo sin obtener resultados satisfactorios.

Finalmente se presenta una solución a los problemas de la desviación en los pozos. La cual se basa en la variación de la posición del primer estabilizador para diferentes configuraciones de aparejos de fondo; con base en un estudio de sensibilidad fueron seleccionados los parámetros de mayor influencia; posteriormente se busco su correspondiente relación para obtener ocho gráficas prácticas del cambio del ángulo de desviación del agujero contra el echado de la formación para diferentes configuraciones de aparejos de fondo y cargas. axiales. El uso de estas gráficas contribuyen a la selección de una manera rápida y segura del aparejo de fondo más adecuado para satisfacer los requerimientos de verticalidad en la perforación de los pozos.

CONTENIDO

		Página
CAPÍTULO		
1	INTRODUCCIÓN	1
	Revisión de la Literatura	3
2	CONCEPTOS FUNDAMENTALES	7
	2.1 Introducción.	7
	2.2 Principios Básicos.	8
	2.3 Parámetros que influyen en el comportamiento del aparejo de fondo.	10
	2.3.1 Forma y dimensiones de cada componente.	10
	2.3.2 Módulo de Elasticidad de cada componente (Ley de Hooke)	12
	2.3.3 Momento de Inercia de cada componente	15
	2.3.4 Rigidez	19
	2.3.5 Peso de cada componente	21
	2.3.6 Densidad del fluido de perforación	21
	2.3.7 Carga Axial	22
	2.3.8 Inclinación y Dirección del agujero	22
	2.3.9 Echado y Buzamiento de la formación	23
	2.3.10 Diámetro de la barrena	24
3	ANÁLISIS DE LOS APAREJOS DE FONDO	26
	3.1 Introducción	26
	3.2 Aparejo de fondo liso	26
	3.3 Aparejo de fondo con un estabilizador	29
	3.4 Aparejo de fondo con dos estabilizadores	33
4	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	37
	4.1 Introducción	37
	4.2 Análisis de resultados	42
5	DESARROLLO DEL TEMA	47
	5.1 Introducción	47
	5.2 Desarrollo	48
	5.3 Ejemplos	68

	Página
CAPÍTULO	
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
NOMENCLATURA	73
REFERENCIAS	75
APÉNDICE A PROGRAMAS DE COMPUTACIÓN	78
A.1 Programa de cómputo para aparejos de fondo lisos	78
A.2 Programa de cómputo para aparejos de fondo con un estabilizador	80
A.3 Programa de cómputo para aparejos de fondo con dos estabilizadores	82
A.4 Diagrama de flujo para el análisis de los aparejos de fondo	86
A.5 Ejemplo práctico de un aparejo de fondo liso	87
A.6 Ejemplo práctico de un aparejo de fondo con un estabilizador	89
A.7 Ejemplo práctico de un aparejo de fondo con dos estabilizadores	91
APÉNDICE B CÁLCULO DE LA TRAYECTORIA DEL POZO NAZARETH 1	93
APÉNDICE C MANEJO DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN	98
C.1 Introducción	98
C.2 Campo de datos Tudrpdam.dat	98
C.3 Campo de datos Isot	103
C.4 Ejemplo	105
APÉNDICE D GRÁFICAS DE LA DESVIACIÓN DEL POZO CONTRA PROFUNDIDAD DE LOS APAREJOS DE FONDO UTILIZADOS EN EL POZO:NAZARETH 1	107
APÉNDICE E APAREJOS DE FONDO UTILIZADOS EN EL POZO. NAZARETH 1	130

LISTA DE TABLAS

		Página
TABLA		
2.1	PROPIEDADES ELÁSTICAS DE ALGUNAS ALEACIONES	12
A.5	EJEMPLO PRÁCTICO DE UN APAREJO DE FONDO LISO	87
A.6	EJEMPLO PRÁCTICO DE UN APAREJO DE FONDO CON UN ESTABILIZADOR	89
A.7	EJEMPLO PRÁCTICO DE UN APAREJO DE FONDO CON DOS ESTABILIZADORES	91
APÉNDICE B	CÁLCULO DE LA TRAYECTORIA DEL POZO: NAZARETH 1	93
C.4	EJEMPLO DEL MANEJO DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN	106

LISTA DE FIGURAS

Página

No. DE FIGURA

2.1	APAREJO DE FONDO LISO Y COMPLICADO	7
2.2	LONGITUD DE TANGENCIA Y FUERZA NEGATIVA O DE PÉNDULO	8
2.3	INCLINACIÓN DE LA BARRENA	9
2.4	CILINDRO HUECO DE ACERO	11
2.5	LEY DE HOOKE	13
2.6	MOMENTO DE INERCIA	15
2.7	MOMENTO DE INERCIA DE UN LASTRABARRENAS REDONDO	17
2.8	RIGIDEZ DE ALGUNOS LASTRABARRENAS MAS COMUNES	20
2.9	UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA ECHADO Y BUZAMIENTO DE LA FORMACIÓN	24
3.1	APAREJO DE FONDO LISO Y CON UN ESTABILIZADOR	27
3.2	APAREJO DE FONDO CON UN ESTABILIZADOR	30
3.3	APAREJO DE FONDO CON DOS ESTABILIZADORES	34
4.1	ESTADO MECÁNICO DEL POZO: NAZARETH 1	39
4.2	PROFUNDIDAD CONTRA DESPLAZAMIENTO DEL POZO: NAZARETH 1	40
4.3	DIRECCIÓN DEL POZO: NAZARETH 1	41
5.1	APAREJO DE FONDO MÁS UTILIZADO EN EL POZO. NAZARETH 1	50
5.2	EFFECTO DEL ÁNGULO DEL ECHADO DE LA FORMACIÓN	51
5.3	EFFECTO DEL PESO SOBRE LA BARRENA	53
5.4	EFFECTO DEL CALIBRE DEL AGUJERO	54
5.5	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO DE FONDO: PBE, S/DCC, 1, 2	55
5.6	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO DE FONDO: S/1, 2	56
5.7	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO DE FONDO: S/2, 3	56
5.8	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO DE FONDO: S/3, 4	57
5.9	GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA RITMO EN GRADOS/1000 m PARA DIÁMETROS DE BARRENA DE 12" Y APAREJO: PBE, S/DCC, 1, 2	60
5.10	GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA RITMO EN GRADOS/1000 m PARA DIÁMETROS DE BARRENA DE 12" Y APAREJO: S/1, 2	61
5.11	GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA RITMO EN GRADOS/1000 m PARA DIÁMETROS DE BARRENA DE 12" Y APAREJO: S/2, 3	62
5.12	GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA RITMO EN GRADOS/1000 m PARA DIÁMETROS DE BARRENA DE 12" Y APAREJO: S/3, 4	63

No. DE FIGURA

5.13	GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA RITMO EN GRADOS/1000 m PARA DIÁMETROS DE BARRENA DE 8 3/8" Y APAREJO: PBE, S/DCC, 1, 2	64
5.14	GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA RITMO EN GRADOS/1000 m PARA DIÁMETROS DE BARRENA DE 8 3/8" Y APAREJO: S/1, 2	65
5.15	GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA RITMO EN GRADOS/1000 m PARA DIÁMETROS DE BARRENA DE 8 3/8" Y APAREJO: S/2, 3	66
5.16	GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA RITMO EN GRADOS/1000 m PARA DIÁMETROS DE BARRENA DE 8 3/8" Y APAREJO: S/3, 4	67
A.4	DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SECUENCIA DE CÁLCULO DE LOS ANÁLISIS DE LOS APAREJOS DE FONDO POR EL MÉTODO ANALÍTICO	86
D1	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 1	108
D2	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 2	109
D3	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 3	110
D4	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 4	111
D5	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 5	112
D6	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 6	113
D7	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 7	114
D8	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 8	115
D9	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 9	116

No. DE FIGURA

D10	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 10	117
D11	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 11	118
D12	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 12	119
D13	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 13	120
D14	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 14	121
D15	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 15	122
D16	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 16	123
D17	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 17	124
D18	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 18	125
D19	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 19	126
D20	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 20	127
D21	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 21	128
D22	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SIMULADOR Y COMPARADOS CON LOS REALES, DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN CONTRA LA PROFUNDIDAD DEL APAREJO No. 22	129
E1	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 1	131
E2	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 2	132
E3	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 3	133
E4	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 4	134
E5	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 5	135
E6	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 6	136

No. DE FIGURA

E7	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 7	137
E8	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 8	138
E9	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 9	139
E10	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 10	140
E11	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 11	141
E12	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 12	142
E13	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 13	143
E14	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 14	144
E15	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 15	145
E16	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 16	146
E17	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 17	147
E18	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 18	148
E19	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 19	149
E20	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 20	150
E21	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 21	151
E22	CONFIGURACIÓN DEL APAREJO No. 22	152

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Para la perforación de un pozo, se requiere de la aplicación de un conjunto de conocimientos que deben de satisfacer los requerimientos de seguridad, calidad, costo y el cuidado al el entorno ecológico.

La desviación de los pozos debe de ser un parámetro importante a considerar durante la planeación y perforación del pozo, con la finalidad de obtener un agujero calibrado, libre de patas de perro y ojos de llave. Esto es, aplicar la Filosofía de calidad desde el punto de vista mecánico del pozo.

Cuando la desviación en el agujero no es considerada, se pueden generar problemas muy serios durante la perforación del pozo, tales como: atrapamientos, pegaduras, arrastres, patas de perro, ojos de llave, pescados, etc. y en el caso más crítico la pérdida total del pozo. Independientemente de los problemas que se presenten; estos causan que los tiempos y costos de perforación se incrementen considerablemente.

En un principio la solución a los problemas de la desviación de los pozos fue una necesidad legal, al observarse que a la profundidad objetivo no se encontraba dentro del terreno concesionado; por lo que las soluciones inmediatas fueron de ensaye y error con base en la experiencia de campo. Durante los años 50, Lubinski y otros autores iniciaron a estudiar las causas de la desviación de los pozos y el comportamiento de los aparejos de fondo. Sin embargo, hasta los años 80, se inician las primeras soluciones analíticas

y numéricas del comportamiento de los aparejos de fondo y en la actualidad se realizan esfuerzos para conjuntar cada vez más parámetros que intervienen, siempre con el firme propósito de obtener modelos más completos que presenten resultados muy satisfactorios al compararse con los obtenidos en el campo.

El estudio y análisis de los aparejos de fondo es muy complejo; puesto que intervienen un gran número de parámetros de tipo controlable y otros que se encuentran presentes en la naturaleza. Esta situación nos obliga a variar los parámetros controlables para minimizar las condiciones geológicas y asegurar la perforación de un pozo de calidad.

En esta Tesis presentamos una solución para la selección del aparejo de fondo, de acuerdo con las condiciones de operación que serán aplicadas y geológicas esperadas; contribuyendo de esta manera, al desarrollo de nuevas concepciones técnicas de los aparejos de fondo en el País.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

A. Lubinski y H. Wood en 1954, realizan las primeras investigaciones respecto a las causas y soluciones a los problemas de la desviación de los pozos; indicando que el diámetro de los lastrarrenas es el factor limitador del movimiento lateral en la barrena. Asimismo, calculan el diámetro mínimo efectivo del pozo como el promedio aritmético del diámetro de la barrena más el diámetro exterior de los lastrarrenas.^{1,2,3}

H. E. Treickler en los años 1957-1959, explica que el movimiento lateral de la barrena de un aparejo de fondo liso genera agujeros en espiral cuando se perfora en formaciones carentes de buzamiento.^{4,5}

Posteriormente surge la Teoría de Robert S. Hoch en 1962, mostrando que cuando se perfora con una barrena no estabilizada, el ángulo de la desviación del agujero puede cambiar abruptamente si se presentan formaciones duras, generando una pata de perro y como consecuencia problemas durante la introducción de la tubería de revestimiento. Para solucionar este problema, propone una ecuación modificada de A. Lubinski y H. Wood; indicando que el diámetro exterior mínimo permisible de los lastrarrenas debe de ser siempre mayor que el doble del diámetro exterior del cople de la tubería de revestimiento que se instalará, menos el diámetro de la barrena.⁶

A. Lubinski expresó su Teoría basándose en la suposición de que la sarta de perforación se recuesta sobre el lado bajo de un pozo inclinado. Si a un

aparejo de fondo no se le aplica peso sobre la barrena en un agujero desviado, la única fuerza que actúa sobre la barrena será la porción comprendida entre la barrena y el punto de tangencia, esta fuerza tiende a regresar al pozo a la vertical. Cuando se aplica el peso sobre la barrena, la fuerza resultante tiende a desviar el pozo. Asimismo, indicó que el cambio de ángulo del pozo debe ser la preocupación principal y no el ángulo máximo.⁷

En 1974, Wolfson L. presenta un estudio de los aparejos de fondo considerando que la barrena tiende a perforar en la dirección de la fuerza resultante sobre la barrena. Esta fuerza es calculada por un modelo que utiliza el método del elemento finito. La configuración del equilibrio es determinada utilizando el concepto de minimización de energía potencial.⁸

En 1980, Keith K. Millheim y Michael C. Apostol, presentan un modelo de computadora que utiliza el método del elemento finito sobre el efecto dinámico del aparejo de fondo sobre la trayectoria de la barrena, en condiciones dinámicas en tres dimensiones. Este análisis incluye la velocidad de rotación de la sarta y los resultados proporcionados por el modelo, es la resultante de la magnitud de la fuerza en la barrena a una profundidad predeterminada.⁹

En 1982, Bai Jiazhi¹⁰, presenta la primera solución analítica para los aparejos de fondo lisos, con un estabilizador y con dos estabilizadores para condiciones estáticas en dos dimensiones, apoyándose en la Teoría de vigas de Timoshenko¹¹. Este método proporciona la magnitud de la fuerza en la barrena a una profundidad determinada.

En el año de 1986, Brakel J. D. y Azar J. J. presentan en la Universidad de Tulsa un modelo que nos permite predecir la trayectoria del agujero considerando la configuración del aparejo de fondo y la dinámica en la barrena; también este modelo utiliza el elemento finito para determinar la magnitud de la fuerza en la barrena.¹²

En el año de 1991, P. A. Larson¹³ desarrollo un modelo de simulación que permite predecir el comportamiento del aparejo de fondo al perforar un intervalo determinado. El modelo también utiliza el elemento finito y lo resuelve para condiciones semi-dinámicas en tres dimensiones. La diferencia fundamental que presenta este modelo con respecto a los anteriores es que es posible determinar el cambio de ángulo en el agujero al simular la perforación de intervalo determinado de acuerdo con la configuración del aparejo de fondo, condiciones geológicas y parámetros de operación.

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1. INTRODUCCIÓN

El aparejo de fondo es una parte importante de la sarta de perforación que afecta la trayectoria de la barrena y por consecuencia al agujero perforado. Los aparejos de fondo pueden ser sencillos: al utilizar barrena y lastrarbarrenas, ó bien muy complicados cuando se usa barrena, amortiguador de vibraciones, lastrarbarrenas antimagnéticos, unidad telemétrica, lastrarbarrenas normales, estabilizadores, rimas, junta de seguridad, martillo y tubería de perforación pesada. (Fig. 2.1)

En un principio los aparejos de fondo lisos (barrena y lastrarbarrenas) fueron los más comunes. Posteriormente Lubinski y Wood^{1,2,3} diseñaron el aparejo tipo péndulo el cual es muy usado para el control de la desviación. Más tarde los aparejos multiestabilizados se volvieron populares en la perforación direccional y algunos de éstos se utilizaron para el control de la desviación.

En general, los aparejos de fondo deben de ser diseñados de acuerdo con las características geológicas del área y a las condiciones de operación a las que van a ser sometidos, para proporcionar la rigidez necesaria y la adecuada posición de las herramientas de contacto con la pared del pozo, para forzar a la barrena a seguir perforando en la dirección vertical; en la que

solo ocurrirán cambios graduales de ángulo y el resultado será un pozo de pleno calibre, libres de patas de perro y ojos de llave. ¹⁴

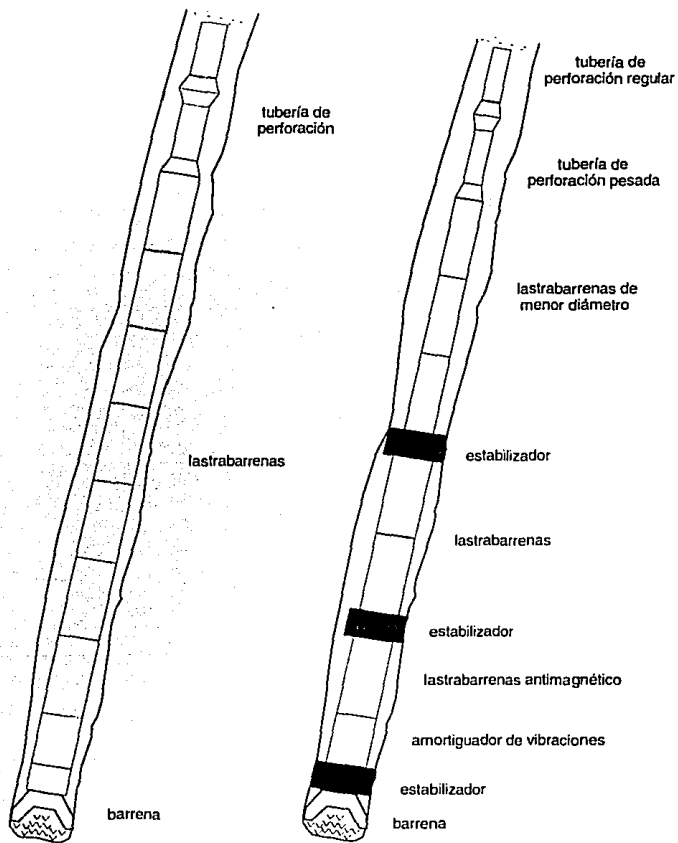


Figura 2.1 APAREJO DE FONDO LISO Y COMPLICADO¹⁵

2.2. PRINCIPIOS BÁSICOS

Todos los aparejos de fondo causan una fuerza a la barrena, que genera que la barrena incremente, descienda o mantenga el ángulo de inclinación, así como el giro a la derecha o izquierda.

La distancia que existe entre la barrena y el siguiente punto de contacto con la pared del pozo se define como la longitud de tangencia. Esta sección activa del aparato de fondo es la que determina cuanta fuerza negativa o de péndulo está disponible para disminuir el ángulo de inclinación. (Fig. 2.2).

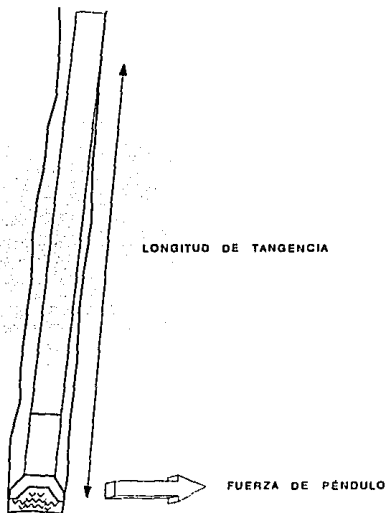


Figura.2.2 LONGITUD DE TANGENCIA Y FUERZA NEGATIVA O DE PÉNDULO¹⁵

El ángulo que se forma entre la línea central del agujero y la línea central de la barrena y el aparejo es llamado inclinación de la barrena, esta es una fuerza positiva que incrementa el ángulo de inclinación. (Fig. 2.3).¹⁵

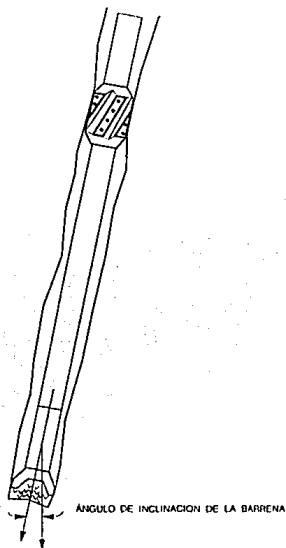


Figura 2.3 INCLINACIÓN DE LA BARRENA¹⁵

En la perforación de rocas suaves predomina la inclinación de la barrena, mientras que para rocas duras la magnitud de la fuerza es de mayor importancia en la trayectoria del agujero.

2.3. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DEL APAREJO DE FONDO.

Existen un gran número de parámetros que influyen en el comportamiento del aparejo de fondo. Sin embargo, se presentan a continuación aquellos de mayor importancia:

- Forma y Dimensiones de cada componente.
- Módulo de elasticidad de cada componente.
- Momento de Inercia de cada componente.
- Rigidez.
- Peso de cada componente.
- Densidad del fluido de perforación.
- Carga Axial.
- Inclinación y dirección del agujero.
- Echado y Buzamiento de la formación.
- Diámetro de la barrena.

2.3.1. Forma y dimensiones de cada componente. 15

Es muy importante conocer la forma y dimensiones de cada componente para determinar el Momento de Inercia Axial (I) y el Momento de Inercia Polar (J).

El componente más sencillo en el aparejo de fondo es el lastrabarrenas redondo, puesto que el área de sección transversal es constante en toda su

longitud. Sin embargo, para componentes como estabilizadores, rimas, motores, amortiguadores, martillos y otras herramientas es más complejo; puesto que el área de la sección transversal generalmente varía con la longitud. Estos pueden ser representados por un cilindro hueco de acero (Figura 2.4), en donde el peso y la longitud de cada componente son conocidas; y suponiendo el diámetro exterior es posible obtener el diámetro interior mediante la ecuación:

$$d = \left[D^2 - \frac{W}{2.67L} \right]^{0.5} \quad \text{--- (2.1)}$$

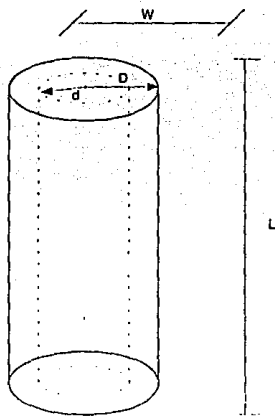


Figura 2.4. CILINDRO HUECO DE ACERO

2.3.2. Módulo de Elasticidad de cada componente (Ley de Hooke).

En cualquier aparejo de fondo, los tipos de metales que componen los lastrabarrenas y otras herramientas, son los que dictan su peso y su comportamiento elástico.

En la tabla 2.1 se presentan las propiedades elásticas de algunas aleaciones y metales de mayor uso en la Industria Petrolera.

TABLA 2.1¹⁵

M E T A L	DENSIDAD (lb/pie³)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (10⁶ psi)
------------------	--	---

ALEACIÓN A BASE DE HIERRO

Acero bajo en carbón	491	29.0
Acero fundido	449	21.0
Acero Cr-Mo	491	29.9
Acero Cr-12	484	29.2
Acero Inoxidable 304	501	27.4
Acero Inoxidable 316	501	28.1

ALEACIÓN A BASE DE NÍQUEL

Monel	551	26.0
Monel K-500	529	26.0
Níquel	556	30.0

OTROS METALES

Aluminio	170	10.6
Tungsteno	1,205	51.5

Ley de Hooke:

La Ley de Hooke establece que si una barra de longitud L se somete a una fuerza de tensión P , la deformación longitudinal δ es proporcional a la fuerza aplicada P e inversamente proporcional al área de sección transversal de dicha barra. (Figura 2.5).

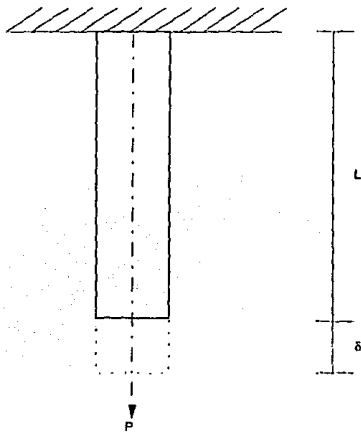


Figura 2.5 LEY DE HOOKE¹⁴

Por lo que matemáticamente se expresa como:

$$\delta \propto \frac{PL}{A}$$

--- (2.2)

Introduciendo una constante de proporcionalidad E, característica de cada material, conocido como Módulo de Elasticidad ó Módulo de Young, la ecuación se expresará como:

$$\delta = \frac{PL}{EA} \quad \text{--- (2.3)}$$

Despejando el Módulo de elasticidad de la ecuación (2.3), tenemos:

$$E = \frac{PL}{\delta A} \quad \text{--- (2.4)}$$

Ahora, la deformación axial unitaria está definida como la deformación longitudinal que sufre la barra al someterse a la fuerza P, dividida entre la longitud original de dicha barra.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad \text{--- (2.5)}$$

De manera similar el esfuerzo axial unitario, será:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{--- (2.6)}$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.5) y (2.6) en la (2.4) se obtiene, que el Módulo de Elasticidad es el cociente entre el esfuerzo axial unitario y la deformación axial unitaria; por lo que:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

--- (2.7)

2.3.3. Momento de Inercia de cada componente.

El momento de inercia con respecto a un eje X o a un punto O, es la suma de los elementos de longitud, área, volumen o masa por el cuadrado de su distancia al eje o al punto. (Figura 2.6).

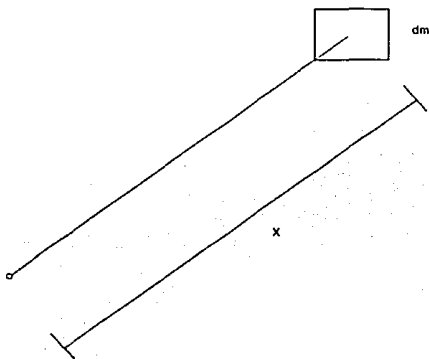


Figura 2.6 MOMENTO DE INERCIA¹⁶

Momento de Inercia Axial

El momento de inercia axial ó también llamado momento rectangular de inercia es denominado por el símbolo I . El momento de inercia axial es cuando los eje de referencia están sobre el plano del área y es igual a la suma de los productos de los elementos de área dA por el cuadrado de la distancia del eje respectivo.

Por lo que la expresión matemática para cada uno de los eje es:

$$I_x = \int Y^2 dA \quad \text{--- (2.8)}$$

$$I_x = \int X^2 dA \quad \text{--- (2.9)}$$

Momento de Inercia Polar

El momento de inercia polar es denominado por el símbolo J . El momento de inercia polar es cuando el eje de referencia es normal al plano del área y es igual a la suma de los productos de los elementos de área dA por el cuadrado de la distancia r a dicho punto (polo).

Por lo que la expresión matemática será:

$$J = \int r^2 dA \quad \text{--- (2.10)}$$

Se puede observar que si los ejes de referencia del momento de inercia axial (I) son perpendiculares y se interceptan en el punto O (polo), existe la siguiente relación entre ambos momentos:

$$J = \int r^2 dA = \int (X^2 + Y^2) dA = \int X^2 dA + \int Y^2 dA$$

$$J = I_x + I_y$$

$$J = 2I$$

Momento de Inercia Axial de un lastrabarrenas redondo 17 (Figura 2.7).

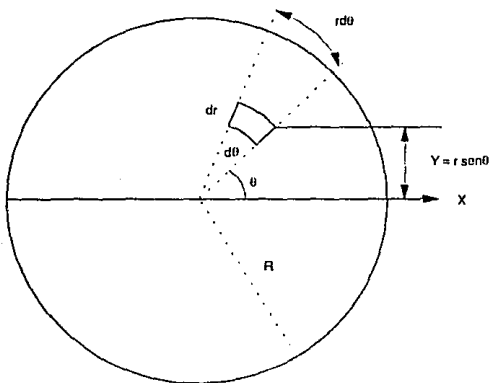


Figura 2.7 MOMENTO DE INERCIA DE UN LASTRABARRENAS REDONDO¹⁷

A partir del momento de inercia axial respecto al eje X y desarrollando matemáticamente, tenemos¹⁷:

$$dI_x = \int Y^2 dA$$

$$I_x = \iint (r \operatorname{sen} \theta)^2 dr (r d\theta) = \iint r \operatorname{sen}^2 \theta dr d\theta$$

$$I_x = \int_0^{2\pi} \int_0^R r^3 \operatorname{sen}^2 \theta dr d\theta = \int_0^{2\pi} r^3 dr \int \operatorname{sen}^2 \theta d\theta$$

$$I_x = \frac{r^4}{4} \Big|_0^R \int_0^{2\pi} \frac{1 - \cos 2\theta}{2} d\theta = \frac{R^4}{4} \int_0^{2\pi} \frac{1 - \cos 2\theta}{2} d\theta$$

$$I_x = \frac{R^4}{4} \left[\frac{\theta}{2} - \frac{\operatorname{sen} 2\theta}{4} \right] = \frac{R^4}{4} \left[\frac{2\pi}{2} - \frac{\operatorname{sen} 4\pi}{4} \right]$$

$$I_x = \frac{R^4}{4} \left[\pi - \frac{\operatorname{sen} 4\pi}{4} \right]$$

$$I_x = \frac{\pi R^4}{4} \quad \text{--- (2.12)}$$

Puesto que se requiere el momento de inercia axial en función de los diámetros:

$$R = \frac{D}{2}$$

$$R^4 = \frac{D^4}{16} \quad \text{--- (2.13)}$$

Sustituyendo la ecuación (2.13) en la (2.12), tenemos:

$$I_x = \frac{\pi D^4}{(4)(16)} = \frac{\pi D^4}{64}$$

Finalmente:

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} \quad \text{--- (2.14)}$$

2.3.4. Rigidez¹⁵

El tipo de material y el área de sección transversal de los lastrabarrenas u otras herramientas son los que dictan la rigidez del aparejo de fondo. Es decir, el producto del momento de inercia y el módulo de elasticidad es llamado rigidez.

Por lo que matemáticamente se expresa:

$$R = E I$$

En la figura 2.8 se presenta gráficamente el cálculo de la rigidez de algunos lastrabarrenas de mayor uso en la Industria Petrolera.

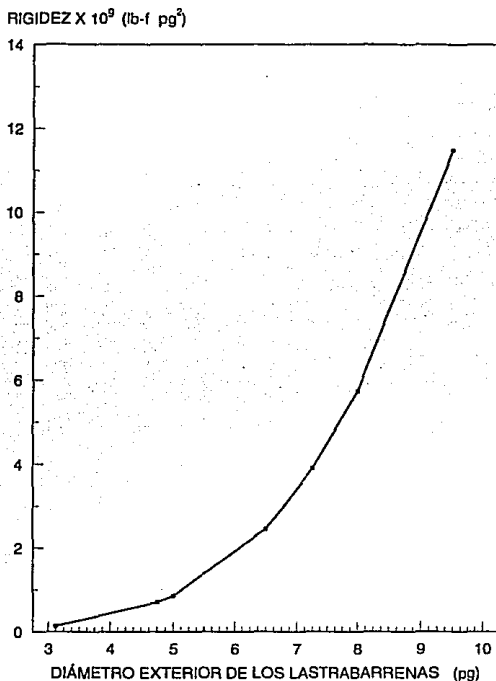


Figura 2.8 RIGIDEZ DE ALGUNOS LASTRABARRENAS MAS COMUNES UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA.

2.3.5 Peso de cada componente.

El peso en el aire de cualquier componente puede ser determinado, si la densidad, área de sección transversal y su longitud son conocidas. Sin embargo, los componentes pueden pesar menos de lo calculado, debido a que los componentes se desgastan no uniformemente en el diámetro exterior, por lo que el área de la sección transversal es más elíptica que circular.

El peso en el aire de un componente circular puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$W = \frac{\delta L(D^2 - d^2)}{183.35} \quad \text{--- (2.16)}$$

2.3.6. Densidad del fluido de perforación

Cuando un componente del aparejo de fondo es colocado en un agujero lleno de fluido de perforación, el peso del componente en el aire se reduce por el efecto de flotación que es determinado por la siguiente ecuación.

$$\beta = 1 - \frac{W_m}{\delta_a} \quad \text{--- (2.17)}$$

2.3.7 Carga Axial

La carga Axial ó el peso sobre la barrena, es la fuerza suministrada por el peso flotado de los lastrabarrenas.

2.3.8 Inclinación y Dirección del agujero

Para ubicar de un pozo en el espacio, es necesario contar con la información de la inclinación y dirección del agujero.

La inclinación se define como el ángulo formado entre la línea central del agujero y el plano vertical, en grados. La dirección se define como el ángulo formado entre la línea central del agujero y el plano horizontal, medido en grados a partir del Norte en sentido de las manecillas del reloj.

Actualmente existen un gran número de métodos para el cálculo de la trayectoria del pozo, siendo los más comunes:¹⁵

- Método de ángulo promedio.
- Método de radio de curvatura.
- Método de curvatura mínima.

2.3.9 Echado y Buzamiento de la formación. 18

Estos conceptos son los más sobresalientes respecto a las características geológicas del área por perforar. Algunos autores han manifestado que el echado y buzamientos de las formaciones, son los factores predominantes que ocasionan la desviación de los pozos. Estos, no pueden ser modificados, pero deben de considerarse en el análisis, siendo necesario manipular los parámetros variables para contrarrestar estas fuerzas geológicas.

Para representar la posición de un pliegue en un mapa geológico, es necesario orientarlo en la misma posición relativa que ocupa en la superficie del suelo, por lo que es necesario medir la inclinación y dirección de los estratos.

La inclinación o el echado, es el ángulo formado entre la estratificación y un plano horizontal, pero se mide en un plano vertical cuyo rumbo es perpendicular al de la estratificación.

El rumbo de un estrato, es la dirección medida sobre la superficie horizontal. Más precisamente, el rumbo puede definirse como la dirección de una línea formada por la intersección de la estratificación y un plano horizontal.

El buzamiento, es el ángulo de máxima inclinación del estrato medido con respecto al plano horizontal y su sentido es la dirección en la que está inclinado el estrato en el plano del buzamiento; esta dirección es perpendicular al rumbo del estrato. (Figura 2.9).

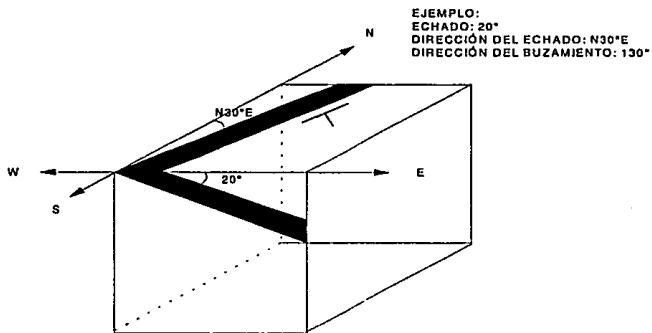


Figura 2.9 ECHADO Y BUZAMIENTO DE LA FORMACIÓN¹⁸

2.3.10 Diámetro de la barrena.

El diámetro de la barrena, así como el calibre del agujero desempeñan un papel importante para los aparejos de fondo.

El tipo de material y el área de sección transversal de los lastrabarrenas son los que dictan la rigidez del aparejo de fondo, pero a su vez el diámetro exterior de los lastrabarrenas son una función del diámetro de la barrena. Entre mayor sea el diámetro de la barrena la rigidez del aparejo de fondo también lo será.

Por otro lado, si un agujero esta descalibrado (derrumbes, erosión, etc.), al aplicarse la carga axial a los lastrabarrenas, los estabilizadores no realizarán el contacto adecuado con la pared del pozo y la fuerza de flexión se incrementará causando un aumento en la magnitud de la fuerza positiva, es decir un incremento en el ángulo de inclinación del agujero.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LOS APAREJOS DE FONDO

(ECUACIONES DE JIAZHI. CONDICIONES ESTÁTICAS EN DOS DIMENSIONES)

3.1. INTRODUCCIÓN

En el año de 1982 Bai Jiazhi presentó las ecuaciones para la solución de los aparejos de fondo lisos con un estabilizador y con dos estabilizadores por medio de la Teoría de vigas, basándose en el método de Timoshenko de tres ecuaciones de momento en condiciones estáticas en dos dimensiones.¹⁰ Este análisis arroja resultados finales de la magnitud de la fuerza en la barrena.

3.2. APAREJO DE FONDO LISO.^{10, 15}

En la figura 3.1 se muestra un aparejo de fondo liso y un aparejo tipo péndulo. Ambos generan una magnitud de la fuerza negativa (F_B) causada por la gravedad. Esta fuerza está dada por la siguiente ecuación:

$$F_B = -0.5W_v L_T \beta \text{sen} \alpha \quad \text{--- (3.1)}$$

Cuando se aplica la carga axial a la barrena se genera una fuerza de flexión llamada magnitud de la fuerza positiva, que es la causante de que el ángulo de inclinación se incremente. La magnitud de la fuerza positiva en el aparejo de fondo se genera por el momento de flexión que ocurre sobre la sección

activa. La sección activa se refiere a todos los componentes del aparejo de fondo por debajo del punto de tangencia principal.

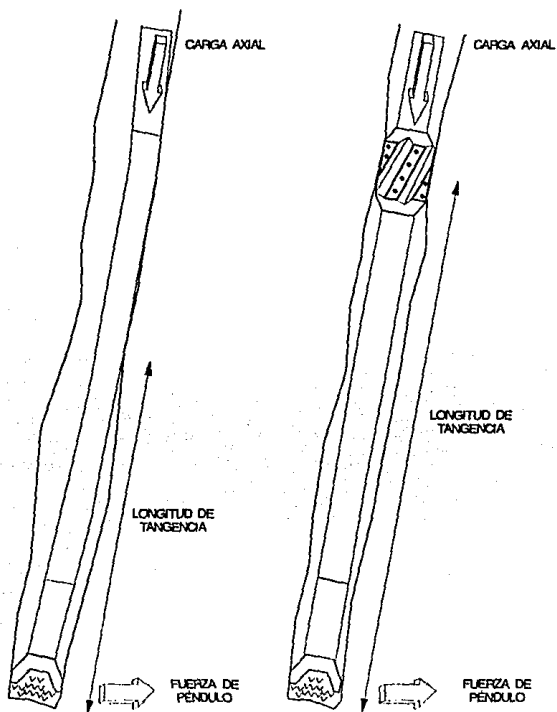


Figura 3.1 APAREJO DE FONDO LISO Y CON UN ESTABILIZADOR¹⁵

De acuerdo con la solución presentada por Jiazhi y basada en el Método de Timoshenko de "Tres ecuaciones de momento",¹¹ se involucran las magnitudes de las fuerzas positivas y negativas las cuales son función de la carga axial.

Por lo que la magnitud de la fuerza en la barrena está dada por la expresión:

$$F_B = -0.5W_o L_T \beta \sin \alpha + \frac{(P_B - 0.5W_o L_T \beta \cos \alpha) dr}{L_T} \quad \text{--- (3.2)}$$

La distancia radial, es definida como el claro radial que existe entre la barrena y los lastrabarrenas por lado, cuya expresión es:

$$dr = \frac{0.5(D_b - D_3)}{12} \quad \text{--- (3.3)}$$

De acuerdo con la solución de Jiazhi, en un principio se supone un valor para la longitud de tangencia, si este valor no concuerda con lo calculado, se tomará el promedio aritmético de ambos y se iniciará una nueva iteración, hasta obtener la longitud de tangencia correcta. Finalmente, se calculará la magnitud de la fuerza en la barrena.

La longitud de tangencia esta definida por la siguiente ecuación:

$$L_T' = \frac{24Eldr}{144W_o \beta X \sin \alpha} \quad \text{--- (3.4)}$$

La función trascendental X está definida por:

$$X = \frac{3(\tan U - U)}{U^3} \quad \text{--- (3.5)}$$

Pero:

$$U = \frac{L_T}{2} \left[\frac{144P_c}{EI} \right]^{0.5} \quad \text{--- (3.6)}$$

Finalmente la carga compresiva de los lastrabarreras es determinada por la ecuación:

$$P_c = P_b - 0.5W_u L_T \beta \cos \alpha \quad \text{--- (3.7)}$$

3.3. APAREJO DE FONDO CON UN ESTABILIZADOR. ¹⁵

El mismo análisis realizado para el aparejo de fondo liso, puede ser aplicado para un aparejo de fondo con un estabilizador. La figura 3.2 presenta un aparejo de fondo con un estabilizador. Nuevamente se estimará una longitud de tangencia y de forma iterativa se obtendrá la longitud de tangencia correcta; la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$L_T^4 = \frac{24EI_3(dr_3 - dr_1)}{144q_3X_3} - \frac{4m_1L_T^2Y_3}{q_3X_3} \quad \text{--- (3.8)}$$

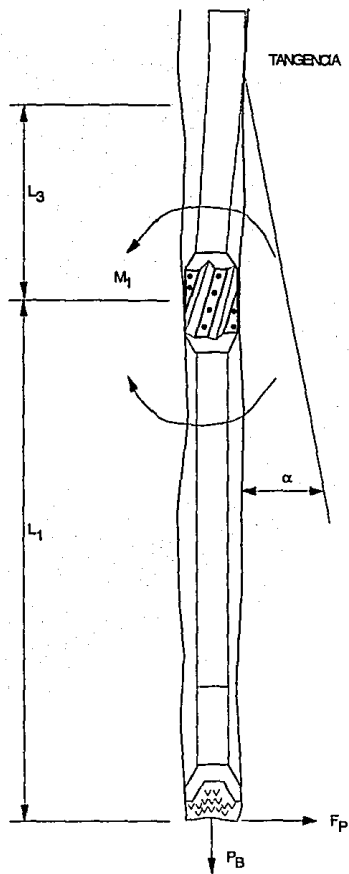


Figura 3.2 APAREJO DE FONDO CON UN ESTABILIZADOR¹⁵

Las distancias radiales serán:

$$dr_1 = \frac{0.5(Db - Ds_1)}{12} \quad \text{--- (3.9)}$$

$$dr_3 = \frac{0.5(Db - D_2)}{12} \quad \text{--- (3.10)}$$

El momento de flexión "m" es calculado por la expresión:

$$2m \left[V_1 + \frac{l_1 L_3}{l_3 L_1} (V_2) \right] = -\frac{q_1 L_1^2}{4} (X_1) - \frac{q_3 L_3^2 l_1}{4 L_1 l_3} (X_3) + \frac{6EI_1 dr_1}{144L_1^2} + \frac{6EI_1 (dr_1 - dr_3)}{144L_1 L_2} \quad \text{--- (3.11)}$$

Ahora los coeficientes V_i y Y_3 son calculados por las expresiones:

$$Y_3 = \frac{3}{U_3} \left[\frac{1}{\text{sen}(2U_3)} - \frac{1}{2U_3} \right] \quad \text{--- (3.12)}$$

$$V_i = \frac{3}{2U_i} \left[\frac{1}{2U_i} - \frac{1}{\tan(2U_i)} \right] \quad \text{--- (3.13)}$$

Donde U:

$$U_i = \frac{L_i}{2} \left[\frac{144Pc_i}{EI_i} \right]^{0.5} \quad \text{--- (3.14)}$$

La función Trascendental X está dada por:

$$X_i = \frac{3(\tan U_i - U_i)}{U_i^3} \quad \text{--- (3.15)}$$

Donde $i = 1$ ó 2

La carga compresiva de los lastrabarrenas para la primera sección es calculada por la ecuación:

$$P_{C1} = P_B - 0.5L_1W_1\beta\cos\alpha \quad \text{--- (3.16)}$$

La carga compresiva de los lastrabarrenas para la segunda sección es calculada por la ecuación:

$$P_{C3} = P_B - [(W_1\beta L_1) + (0.5W_3\beta L_3)]\cos\alpha \quad \text{--- (3.17)}$$

Finalmente si el valor estimado de L_2 es igual a L_T ; entonces, la magnitud de la fuerza en la barra deberá calcularse con la ecuación:

$$F_B = -0.5W_1\beta L_1\sin\alpha + \frac{P_{C1}d r_1}{L_1} - \frac{m_1}{L_1} \quad \text{--- (3.18)}$$

Si el valor estimado de L_2 no concuerda con el valor de L_T , se supone un nuevo valor con base en el promedio aritmético de L_2 y L_T , repitiéndose el mismo procedimiento de cálculo hasta que L_2 sea igual a L_T .

3.4. APAREJO DE FONDO CON DOS ESTABILIZADORES.¹⁵

Un aparejo de fondo con dos estabilizadores también puede resolverse con la Técnica de Jiazhi. En la figura 3.3 se presenta un aparejo de fondo con dos estabilizadores. L_1 y L_2 son longitudes conocidas entre la barrena y el primer estabilizador, y entre el primero y segundo estabilizador respectivamente. La longitud L_3 entre el segundo estabilizador y el punto de tangencia no es conocido y de la misma manera que en el caso del análisis del aparejo de fondo liso y con un estabilizador L_3 debe ser estimado inicialmente, la cual se calcula con la expresión siguiente:

$$L_1^4 = \frac{24EI_3(dr_3 - dr_2)}{144q_3X_3} - \frac{4m_2L_3^2Y_3}{q_3X_3} \quad \text{--- (3.19)}$$

Las distancias radiales están dadas por:

$$dr_1 = \frac{0.5(Db - Ds_1)}{12} \quad \text{--- (3.20)}$$

$$dr_2 = \frac{0.5(Db - Ds_2)}{12} \quad \text{--- (3.21)}$$

$$dr_3 = \frac{0.5(Db - D_3)}{12} \quad \text{--- (3.22)}$$

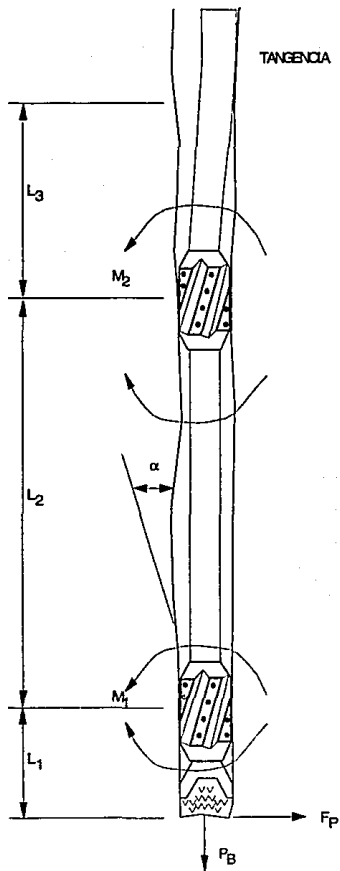


Figura 3.3 APAREJO DE FONDO CON DOS ESTABILIZADORES¹⁵

El primer momento de flexión está dado por la expresión 3.23:

$$2m_1 \left[V_1 + \frac{l_1 L_2}{l_2 L_1} V_2 \right] + m_2 \frac{l_2 L_2}{l_2 L_1} Y_3 = -\frac{q_1 L_1^2}{4} X_1 - \frac{q_2 L_2^2 l_1}{4 L_1 l_2} X_2 + \frac{6 E I_1 d r_1}{144 L_1^2} + \frac{6 E I_1 (d r_1 - d r_2)}{L_1^2}$$

El segundo momento de flexión está dado por la expresión 3.24:

$$m_1 Y_2 + 2m_2 \left[V_2 + \frac{l_2 L_3}{l_2 L_2} \right] = \frac{q_2 L_2^2}{4} X_2 - \frac{q_3 L_3^2 l_2}{4 L_2 l_3} X_3 - \frac{6 E I_2 (d r_1 - d r_2)}{144 L_2^2} + \frac{6 E I_2 (d r_3 - d r_2)}{144 L_2 L_3}$$

Ahora los coeficientes V_i y Y_i son calculados por:

$$Y_i = \frac{3}{U_i} \left[\frac{1}{\sin 2U_i} - \frac{1}{2U_i} \right] \quad \text{--- (3.25)}$$

$$V_i = \frac{3}{2U_i} \left[\frac{1}{2U_i} - \frac{1}{\tan 2U_i} \right] \quad \text{--- (3.26)}$$

Donde U_i :

$$U_i = \frac{L_i}{2} \left[\frac{144 P_{c_i}}{E I_i} \right] \quad \text{--- (3.27)}$$

La función Trascendental X es calculada por:

$$X_i = \frac{3(\tan U_i - U_i)}{U_i^3} \quad \text{--- (3.28)}$$

Donde $i = 1, 2 \text{ ó } 3$.

La carga compresiva de los lastrabarrenas para la primera sección es calculada por:

$$P_{C1} = P_B - 0.5W_1L_1\beta \cos \alpha \quad \text{--- (3.29)}$$

La carga compresiva para la segunda sección es calcula por:

$$P_{C2} = P_B - [(W_1L_1\beta) + (0.5W_2L_2)] \cos \alpha \quad \text{--- (3.30)}$$

La carga compresiva para la tercera sección es calcula por:

$$P_{C3} = P_B - [(W_1L_1\beta) + (W_2L_2\beta) + (0.5W_3L_3\beta)] \cos \alpha \quad \text{--- (3.31)}$$

Finalmente si el valor estimado de L_2 es igual a L_T , la magnitud de la fuerza en la barrena, podrá ser estimada por la ecuación:

$$F_B = -0.5W_1L_1\beta \sin \alpha + \frac{P_{C1}dr_1}{L_1} - \frac{m_1}{L_1} \quad \text{--- (3.32)}$$

En el Apéndice A se presenta el diagrama de flujo de la secuencia de cálculo y programas de cómputo en Lenguaje Basic para los aparejos de fondo lisos, con un estabilizador y con dos estabilizadores; así como ejemplos prácticos de campo.

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En 1991 Paul Arthur Larson de la Universidad de Tulsa, E.U.A, desarrollo un programa de simulación para aparejos de fondo en tres dimensiones para condiciones semi-dinámicas, el cual permite predecir el comportamiento del aparejo de fondo al perforar un intervalo determinado.

En el Apéndice C se presenta la manera de utilizar el programa de simulación; en donde se incluyen los datos necesarios para el procesamiento de los mismos, a través del método del elemento finito. Asimismo se presenta un ejemplo para observar la entrada de datos y la salida de los resultados, que corresponden a la simulación de la profundidad de perforación contra el ángulo de desviación del pozo.

Para el ejemplo práctico de campo fue seleccionado el pozo: Nazareth 1; el cual se localiza geográficamente en el Municipio de Ocosingo, Chis. y dirigido operativamente de la Región Sur de Petróleos Mexicanos. De antemano se conoce que los problemas de desviación en esta área son comunes; así como la presencia de formaciones duras, echados pronunciados, pérdidas totales de circulación, fatiga prematura de las herramientas tubulares, etc.

El pozo: Nazareth 1 perforó a la profundidad desarrollada de 4,100 m atravesando las formaciones de Paleoceno, Cretácico Superior y Cretácico inferior. En la figura 4.1 se muestra el estado mecánico del pozo. La planeación de pozo fue de perforarse verticalmente. Sin embargo, se alcanzó un ángulo máximo de $8^{\circ} 40'$ y un desplazamiento horizontal de 282.84 m, con dirección Norte-Este (Figuras 4.2 y 4.3). La trayectoria del agujero fue procesada a través de los datos obtenidos de los Registros de desviación-calibración y desviación múltiple; y calculados con el método del ángulo promedio, los cuales son presentados en el Apéndice B.

En el Apéndice D se presentan las gráficas de profundidad contra el ángulo de desviación de los veintidós aparejos de fondo, utilizados en el pozo: Nazareth 1; donde se muestran los resultados obtenidos con el simulador y son comparados con los reales de campo.

La configuración del aparejo de fondo y los parámetros operativos de perforación tales como el peso sobre la barrena, revoluciones por minuto y densidad del fluido de perforación fueron obtenidos del reporte diario de perforación y de la bitácora del pozo; los cuales son detallados en el Apéndice E.

La desviación del pozo fue analizada en un rango de 30 a 50 m y determinada de acuerdo con los registros de desviación-calibración y múltiple de desviación.

De acuerdo con la interpretación del registro de echados, fue determinado un echado y buzamiento promedio de la formación, para cada intervalo donde intervinieron los aparejos de fondo.

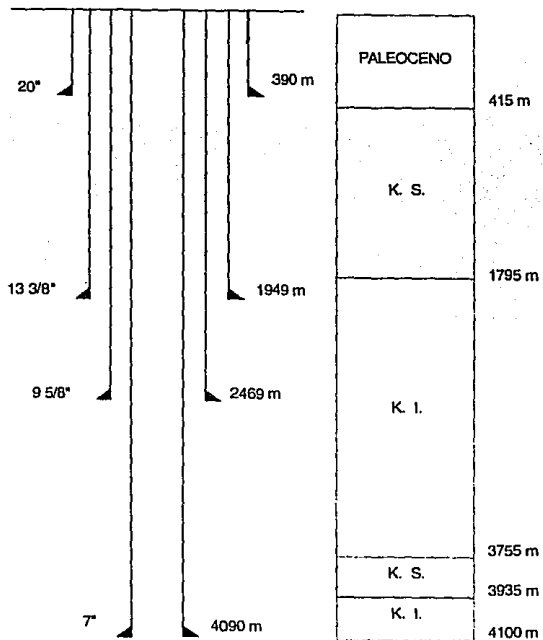


Figura 4.1 ESTADO MECÁNICO DEL POZO: NAZARETH 1

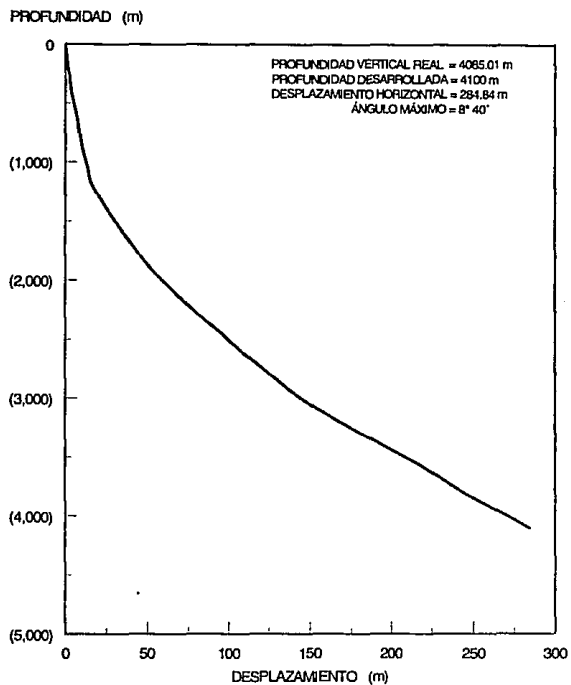


Figura 4.2 PROFUNDIDAD CONTRA DESPLAZAMIENTO DEL POZO: NAZARETH 1

NORTE (m)

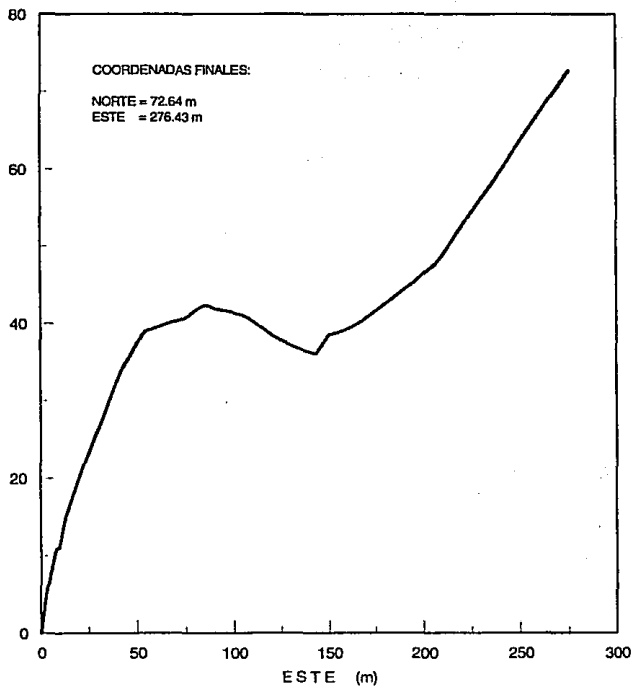


Figura 4.3 DIRECCIÓN DEL POZO: NAZARETH 1

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- **Aparejo No. 1** Debido a la verticalidad del pozo en este intervalo únicamente fueron simulados 300 pies.(Figuras D1 y E1).
- **Aparejo No. 2** Los resultados obtenidos presentan un comportamiento constante con respecto al ángulo de inclinación durante todo el intervalo, mientras que en el comportamiento real, el ángulo de inclinación disminuye en 0.50° . La diferencia se sustenta porque los parámetros operativos se mantienen constantes durante la simulación; mientras que en la práctica operativa estos son variables con la finalidad de optimizar los tiempos de perforación.(Figuras D2 y E2).
- **Aparejo No. 3** Los resultados de la simulación muestran un incremento en forma gradual en el ángulo de inclinación de 0.24° , mientras que el comportamiento real fue de 0.25° durante el intervalo perforado. (Figuras D3 y E3).
- **Aparejo No. 4** Los resultados de simulación indica un incremento en forma gradual del ángulo de inclinación de 0.21° durante el intervalo perforado, mientras que los resultados reales presentan un incremento de 0.25° , por lo que la diferencia presentada es insignificante. (Figuras D4 y E4).
- **Aparejo No. 5** Como puede observarse, los resultados arrojados por el simulador son similares a los resultados reales. (Figuras D5 y E5).

- **Aparejo No. 6** El aparejo de fondo fue utilizado para perforar 720 pies. Sin embargo, únicamente fueron simulados 300 pies, puesto que el que el comportamiento real del pozo muestra cambios muy bruscos en el ángulo de inclinación. Esto fue causado por la variación en los parámetros de perforación del peso sobre la barrena, revoluciones por minuto y cambios en el ángulo del echado y buzamiento de la formación. (Figuras D6 y E6).
- **Aparejo No. 7** Como puede observarse, los resultados arrojados por el simulador son similares a los resultados reales. (Figuras D7 y E7).
- **Aparejo No. 8** Los resultados presentados por el simulador incrementan en forma gradual el ángulo de inclinación en 0.26° en el intervalo de 480 pies, mientras que en los resultados reales se incrementa el ángulo de inclinación en 0.25° en un intervalo de 100 pies y posteriormente se mantiene constante hasta finalizar el intervalo perforado. (Figuras D8 y E8).
- **Aparejo No. 9** De acuerdo con la longitud considerable de este intervalo (850 pies) fue simulado en tres partes. Los resultados presentados por el simulador incrementan en forma constante el ángulo de inclinación en 0.25° durante todo el intervalo, mientras que el comportamiento real también incrementa el ángulo de inclinación en 0.25° en un intervalo de 110 pies y posteriormente se mantiene contante. (Figura D8 y E8).

- **Aparejo No. 10** Como puede observarse, los resultados arrojados por el simulador son similares a los resultados reales. (Figuras D10 y E10).
- **Aparejo No. 11** Como puede observarse, los resultados arrojados por el simulador son similares a los resultados reales. (Figuras D11 y E11).
- **Aparejo No. 12** De acuerdo con la longitud del intervalo (890 pies) la simulación fue realizada en tres partes; y como puede observarse los resultados arrojados por el simulador son similares a los resultados reales. (Figuras D12 y E12).
- **Aparejo No. 13** De acuerdo con la longitud del intervalo (1,260 pies) la simulación fue realizada en tres partes. Los resultados presentados por el simulador incrementan en forma gradual el ángulo de inclinación en 0.50° durante todo el intervalo, mientras que el comportamiento real muestra cambios muy bruscos del ángulo de inclinación, causados por la variación los parámetros de perforación en el campo; así como cambios considerables en el ángulo del echado y buzamiento de la formación. Sin embargo, al finalizar el intervalo, el simulador alcanzan la misma desviación que en el caso real. (Figura D13 y E13).
- **Aparejo No. 14** Como puede observarse los resultados arrojados por el simulador son similares a los resultados reales. (Figuras D14 y E14).
- **Aparejo No. 15** Los resultados proporcionados por el simulador incrementan en forma gradual el ángulo de inclinación, mientras que el

comportamiento real del pozo también lo incrementa en forma más brusca. Sin embargo, los cambios son insignificantes. (Figura D15 y E15).

- **Aparejo No. 16** Los resultados proporcionados por el simulador disminuyen el ángulo de inclinación en 0.14° durante todo el intervalo perforado, mientras que el comportamiento real también disminuyó pero en 0.25° . Sin embargo, la variación es insignificante (Figura D16 y E16).
- **Aparejo No. 17** Durante la simulación de intervalo no se presentan cambios significativos. Sin embargo, en el comportamiento real del pozo se muestra una disminución del ángulo de inclinación de 0.25° en el intervalo perforado. (Figura D17 y E17).
- **Aparejo No. 18** De acuerdo con la longitud del intervalo (1,360 pies) la simulación también fue realizada en tres partes. Los resultados presentados por el simulador presentan un incremento en forma gradual del ángulo de inclinación de 1.67° , mientras que el comportamiento real muestra cambios muy bruscos del ángulo de inclinación; causados por la variación en los parámetros de perforación en el campo, sobre todo en el peso sobre la barrena y revoluciones por minuto; así como cambios en el ángulo del echado y buzamiento de la formación. Sin embargo, al finalizar el intervalo el simulador alcanza la misma desviación que se presentó en el campo. (Figura D18 y E18).
- **Aparejo No. 19** De acuerdo con la longitud del intervalo (770 pies) la simulación fue realizada en tres partes. Los resultados presentados por el simulador presentan un incremento en forma gradual del ángulo de

inclinación, mientras que el comportamiento real muestra cambios bruscos del ángulo de inclinación. Sin embargo, al finalizar el intervalo el simulador alcanza la misma desviación que en el caso real. (Figura D19 y E19).

- **Aparejo No. 20** En este intervalo se utilizó motor de fondo, por lo que no es confiable los resultados de la simulación. (Figura D20 y E20).
- **Aparejo No. 21** Como puede observarse los resultados arrojados por el simulador son similares a los resultados reales. (Figuras D21 y E21).
- **Aparejo No. 22** Como puede observarse los resultados arrojados por el simulador son similares a los resultados reales. (Figuras D22 y E22).

CAPÍTULO 5

DESARROLLO DEL TEMA

5.1. INTRODUCCIÓN

Para diseñar un aparejo de fondo que cumpla con el propósito de proporcionar a la barrena la fuerza necesaria para perforar y mantener el agujero perforado dentro de un mínimo de desviación, se requiere de un gran número de datos y parámetros operativos; para apoyarse en cualesquiera de los métodos analíticos y numéricos, conocidos en la actualidad. Asimismo es necesario capitalizar las experiencias de campo, para que en conjunto se decida la configuración del aparejo de fondo más apropiado para nuestras necesidades.

Precisamente, esta Tesis proporciona un método gráfico, para que de una manera rápida y segura se seleccione el aparejo de fondo más apropiado, sin involucrarse en análisis y cálculos muy complejos que se requieren para determinar el comportamiento de los aparejos de fondo. Es importante mencionar, que el método gráfico esta basado en cientos de corridas de simulación a través del programa de computación elaborado por P. A. Larson.

5.2. DESARROLLO

El primer paso fue clasificar y seleccionar todos aquellos factores que afectan el comportamiento de los aparejos de fondo de la siguiente manera:

Configuración del aparejo de fondo:

- Diámetro exterior e interior de los componentes.
- Diámetro exterior e interior del cuerpo y de las aletas de los estabilizadores.
- Diámetro de la barrena.

Condiciones de operación:

- Carga axial.
- Revoluciones por minuto.
- Densidad del fluido de perforación.
- Coeficiente de fricción.

Condiciones Geológicas:

- Ángulo del echado de la formación.
- Buzamiento de la formación.

Interacción roca-barrena

El segundo paso fue el de realizar una análisis de sensibilidad a través de una serie de simulaciones, con un gran número de variaciones en los parámetros, con la finalidad de discretizar y obtener los factores que en su

variación afectan de una manera importante el comportamiento de los aparejos de fondo; obteniéndose los siguientes, sin importar el orden:

Configuración del aparejo de fondo.

Ángulo del echado de la formación.

Carga Axial (Peso sobre la barrena).

Calibre del agujero.

Desviación y dirección del agujero inicial.

Densidad del fluido de perforación.

El tercer paso fue el de realizar un análisis de sensibilidad a través de una serie de simulaciones, con los factores que afectan de una manera importante al comportamiento de los aparejos de fondo; obteniéndose los siguientes resultados:

a) Se seleccionó la configuración del aparejo de fondo, que más fue utilizado en el pozo: Nazareth 1, el cual es presentado en la figura 5.1 en donde se incluye la descripción de cada componente.

Este aparejo fue corrido en el intervalo 6840 - 7140 pies, con una desviación inicial de 4.5° y una desviación final alcanzada por el aparejo de 5°. El registro de echados mostró un ángulo promedio de 10°. De tal manera, que como puede observarse en la figura 5.2, donde se presenta el análisis de sensibilidad de efecto del echado; se presenta una relación directa que al incrementarse el ángulo del echado bajo la misma carga axial sobre el aparejo, el ángulo de desviación tiende a incrementarse. Es decir, que si la

misma formación presentará un ángulo del echado de 40°, el ángulo de inclinación del agujero sería al final del intervalo de más de 9.5°.

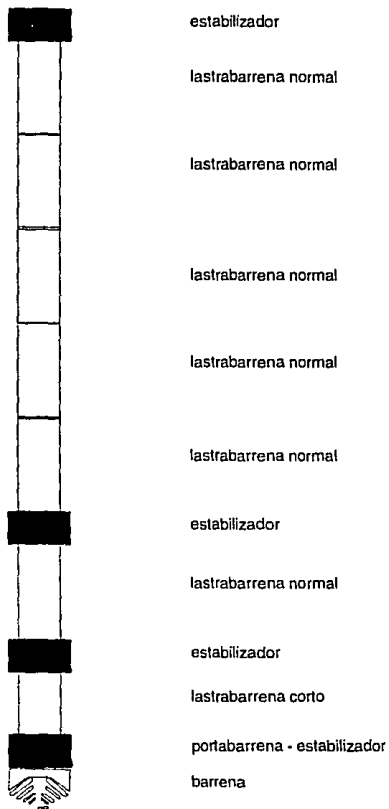


Figura 5.1 APAREJO DE FONDO MÁS UTILIZADO EN EL POZO: NAZARETH 1

EFFECTO DEL ECHADO

POZO: NAZARETH 1

ANGULO DE INCLINACION (grados)

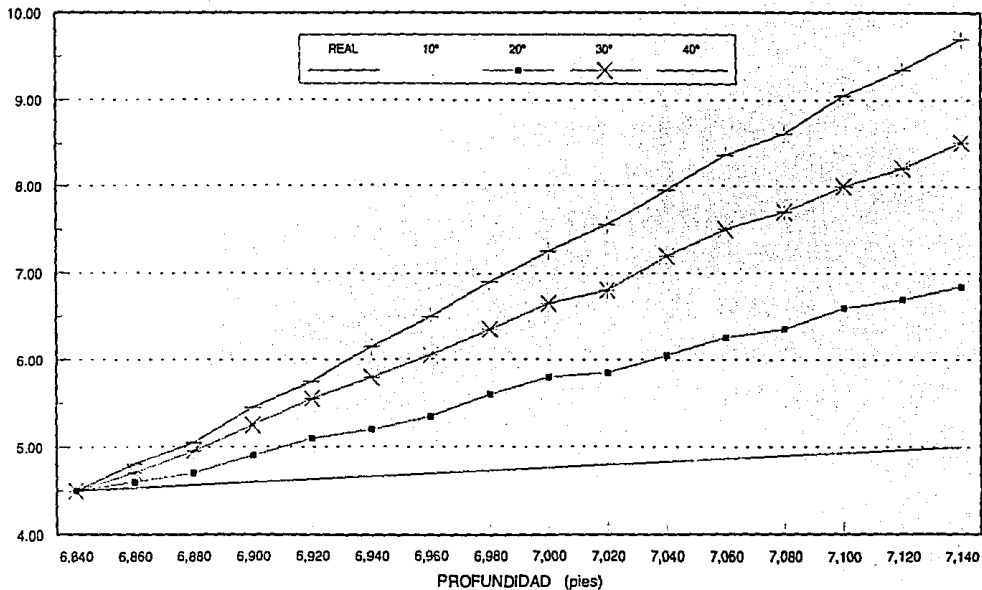


Figura 5.2

b) Con el mismo aparejo de fondo, se realizó un análisis de sensibilidad, pero ahora manteniendo constante el ángulo del echado de la formación de 10° y el resto de los parámetros constantes, variando únicamente la carga axial sobre la barrena desde 8 hasta 20 toneladas. Como puede observarse en la figura 5.3, donde se presenta el efecto del peso sobre la barrena, existe una relación directa que entre mayor sea el peso sobre la barrena, el ángulo de inclinación tiende a incrementarse. Esto es que al aplicarse mayor carga axial sobre el aparejo, la fuerza de péndulo se reduce, mientras que la fuerza de flexión se incrementa generando una resultante con tendencia a incrementar el ángulo de desviación, este argumento está fundamentado ampliamente en el capítulo 2. Sin embargo, este efecto importante no es tan significativo cuando se compara con el efecto del echado.

c) Con el mismo aparejo de fondo, se realizó un análisis de sensibilidad, manteniendo constante el ángulo del echado de la formación de 10° , peso sobre la barrena y el resto de los parámetros, variando únicamente el calibre del agujero desde 12" (calibre) hasta 20". Como puede observarse en la figura 5.4, donde se presenta el efecto del calibre del agujero, se puede observar que las variaciones son insignificantes más no despreciables.

EFFECTO DEL PESO SOBRE LA BARRENA

POZO: NAZARETH 1

ANGULO DE INCLINACION (grados)

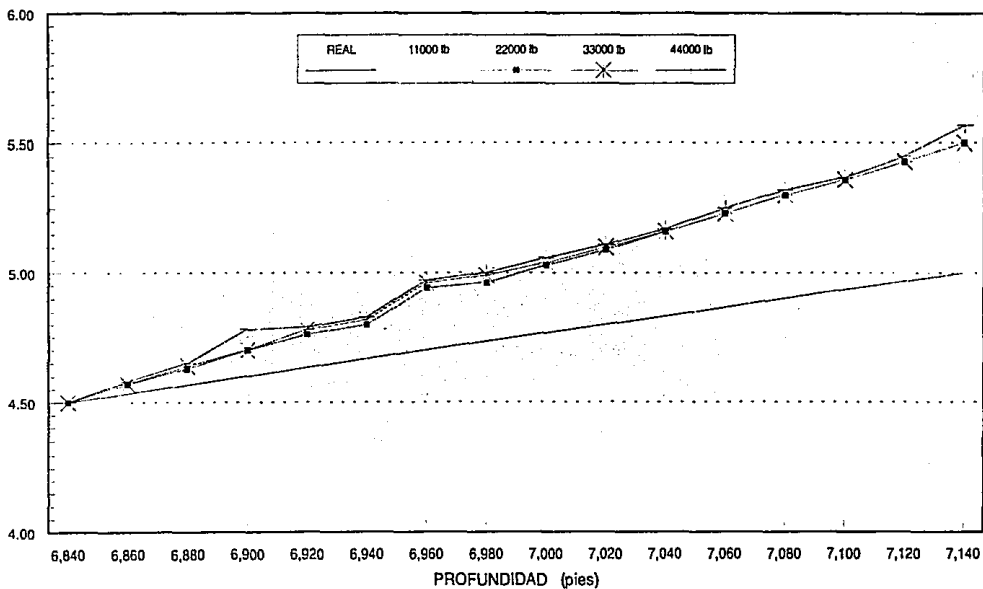


Figura 5.3

EFECTO DEL CALIBRE DEL AGUERO

POZO: NAZARETH 1

ANGULO DE INCLINACION (grados)

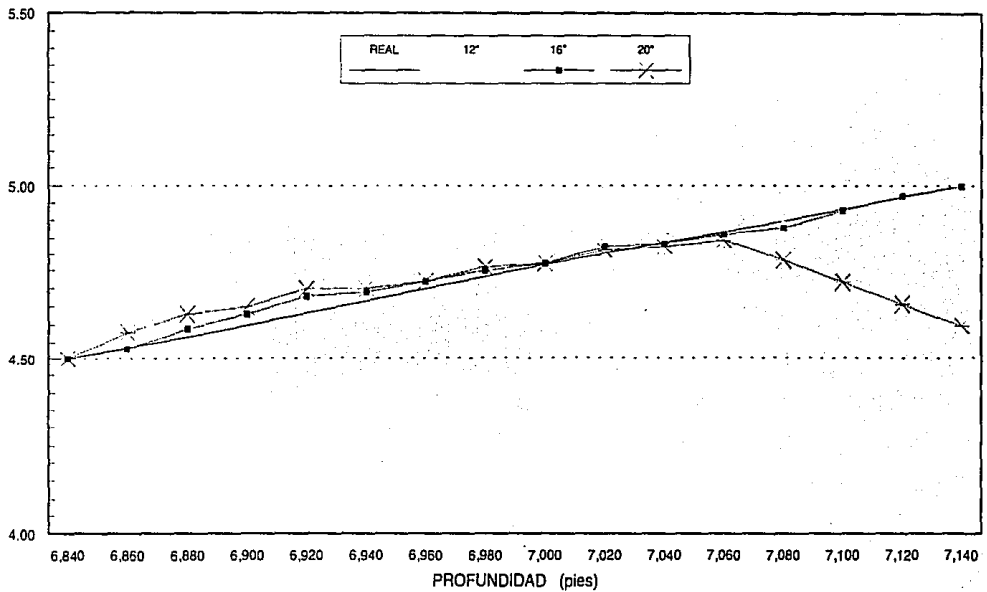


Figura 5.4

Para realizar las ocho gráficas prácticas, fueron seleccionadas las etapas de perforación que presentan mayor problema de la desviación en la Región Sur, siendo estas 12" y 8 3/8", donde en la mayoría de los casos atraviesan las formaciones Deposito, Oligoceno, Eoceno, Paleoceno, Cretácico Superior, Cretácico Medio, Cretácico Inferior y en ocasiones Jurásico Superior. Asimismo se tienen estandarizados los diámetros de lastrabarreras correspondientes a las etapas mencionadas, siendo estos de 8" y 6 1/2" respectivamente. Por otro lado, se seleccionaron cuatro diferentes configuraciones de aparejos de fondo comúnmente usados, los cuales son descritos en forma práctica de campo en la parte superior de cada gráfica y mostrados explícitamente en las figuras de la 5.5 a la 5.8.

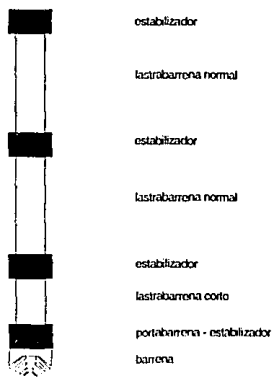


Figura 5.5 CONFIGURACIÓN DEL APAREJO DE FONDO: PBE, S/DCC, 1, 2.

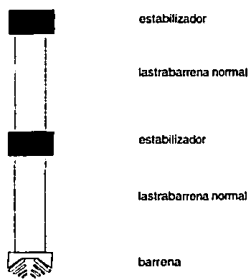


Figura 5.6 CONFIGURACIÓN DEL APAREJO DE FONDO: S/ 1, 2.

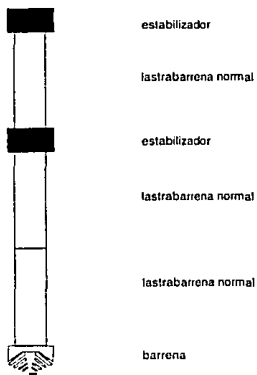


Figura 5.7 CONFIGURACIÓN DEL APAREJO DE FONDO: S/2, 3.

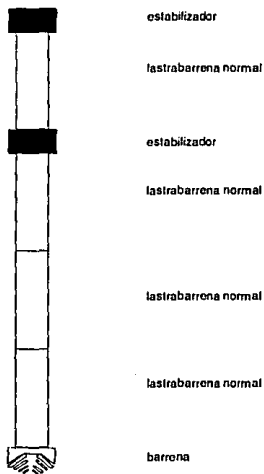


Figura 5.8 CONFIGURACIÓN DEL APAREJO DE FONDO: S/3, 4.

Con base en los análisis de sensibilidad fueron seleccionados el ángulo del echado y el peso sobre la barrena como variables principales.

Los parámetros de la densidad del fluido de perforación, calibre del agujero y ángulo de inclinación del agujero inicial, se mantuvieron constantes durante las corridas de simulación.

Para el caso de la densidad del fluido de perforación se utilizó un rango de densidad de 1.80 a 2.00 gr/cc para la etapa de perforación de 12" y de 1.50 a 1.65 gr/cc para la etapa de 8 3/8". Estos valores están fundamentados en la experiencia de perforación en los campos desarrollados en la Región Sur.

Para el caso del calibre del agujero fue considerado en todas las corridas un valor igual al diámetro de la barrena; es decir a pleno calibre. Esto, está fundamentado con base en el análisis de sensibilidad, donde el efecto del calibre del agujero muestra cambios importantes, pero insignificante al ser comparados con la configuración del aparejo de fondo, ángulo del echado de la formación y peso sobre la barrena.

Para el ángulo de inclinación del agujero inicial se consideró 3° como ángulo inicial. Esto, también se encuentra sustentado en la experiencia de perforación en los campos desarrollados en la Región Sur, al permitirse como máximo un ángulo de desviación de 5° a la profundidad objetivo.

La secuencia gráfica para determinar el aparejo de fondo más apropiado para satisfacer nuestras necesidades, es la siguiente:

1. Se seleccionan la cuatro gráficas de acuerdo con el diámetro de la barrena y lastrabarreras que se utilizarán en el pozo. (Figuras de la 5.9 a la 5.16).
2. En el eje de las abscisas se selecciona el ángulo del echado, con base en registros de pozos de correlación y se sube una línea vertical hasta interceptar la línea del peso sobre la barrena que se pretende utilizar.

3. Finalmente se traza una línea horizontal hasta interceptar el eje de las ordenas denominado ritmo en grados por cada 1000 metros perforados. El resultado es el incremento o decremento del ángulo de inclinación que presentará el aparejo de fondo que se describe en la parte superior de cada gráfica.

Cuando la magnitud del ritmo sea positivo, el aparejo de fondo tenderá a incrementar el ángulo de inclinación; en caso contrario el aparejo de fondo tenderá a disminuir el ángulo de inclinación ó bien el cero, el ángulo de inclinación se mantendrá.

Para el caso de un pozo vertical donde el agujero inicia a desviarse, es muy importante tomar acciones y estrategias inmediatas para la pronta corrección del ángulo de inclinación a través de los propios aparejos de fondo o bien mediante la aplicación de motores de fondo navegables. Si se selecciona la aplicación de los aparejos de fondo para verticalizar el pozo, debe tenerse presente que la respuesta del aparejo de fondo no es inmediata y se requiere de un control estricto en la aplicación de los parámetros operativos de perforación. Por lo que se recomienda que durante la planeación del pozo, deberán analizarse adecuadamente la configuración del aparejo de fondo a utilizarse por cada barrena o bien por cada etapa, para proponer diversas alternativas de solución a estos problemas con la finalidad de obtener un pozo de calidad.

APAREJO: PBE, S/DCC, 1,2

DIÁMETRO DE LA BARRENAS: 12"

DIÁMETRO DE LOS LASTRABARRENAS: 8"

RITMO (grados/1000 m)

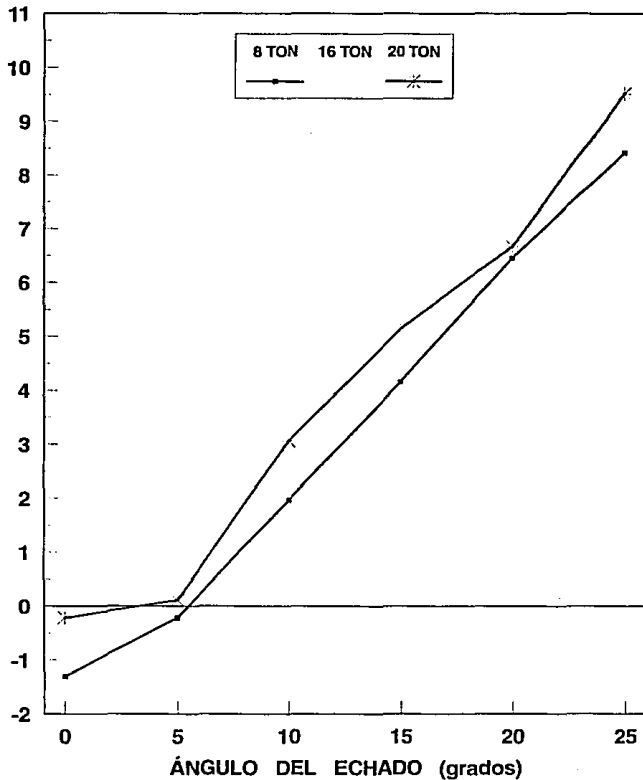


Figura 5.9 GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA EL RITMO EN GRADOS POR CADA 1000 m, PARA DIÁMETRO DE BARRENA DE 12" Y APAREJO: PBE, S/DCC, 1, 2.

APAREJO: S/ 1,2

DIÁMETRO DE LA BARRENAS: 12"

DIÁMETRO DE LOS LASTRABARRENAS: 8"

RITMO (grados/1000 m)

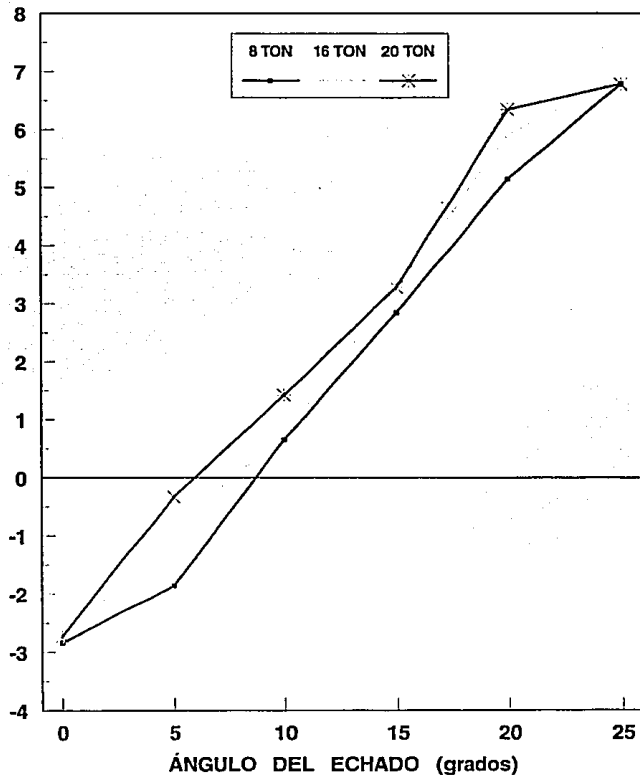


Figura 5.10 GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA EL RITMO EN GRADOS POR CADA 1000 m, PARA DIÁMETRO DE BARRENA DE 12" Y APAREJO: S/1, 2.

APAREJO: S/2,3

DIÁMETRO DE LA BARRENAS: 12"

DIÁMETRO DE LOS LASTRABARRENAS: 8"

RITMO (grados/1000 m)

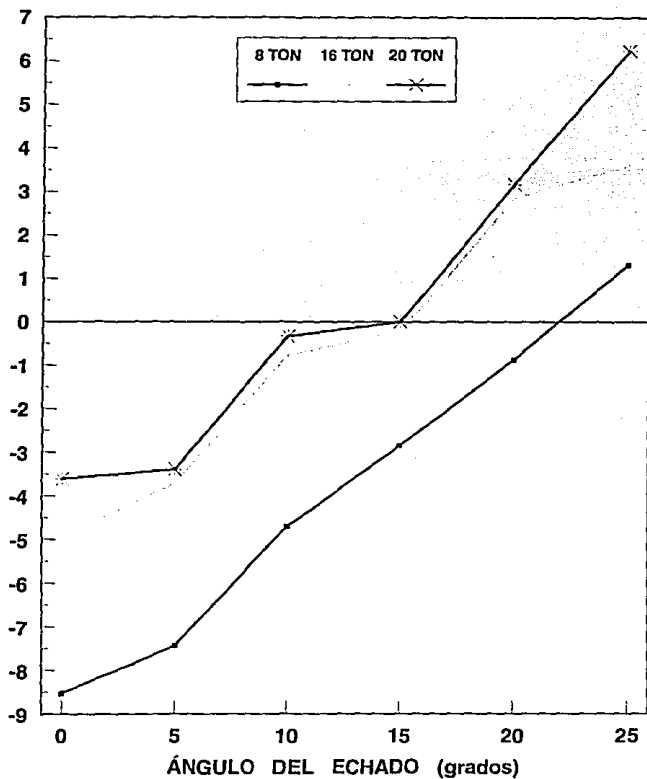


Figura 5.11 GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA EL RITMO EN GRADOS POR CADA 1000 m, PARA DIÁMETRO DE BARRENA DE 12" Y APAREJO: S/2, 3.

APAREJO: S/3, 4

DIÁMETRO DE LA BARRENAS: 12"

DIÁMETRO DE LOS LASTRABARRENAS: 8"

RITMO (grados/1000 m)

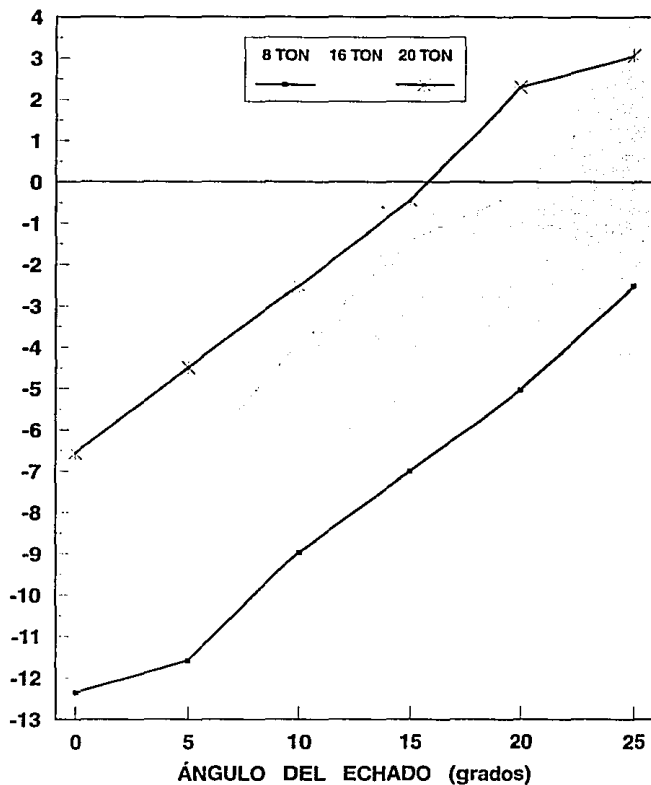


Figura 5.12 GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA EL RITMO EN GRADOS POR CADA 1000 m, PARA DIÁMETRO DE BARRENA DE 12" Y APAREJO: S/3, 4.

APAREJO: PBE, S/DCC, 1, 2

DIÁMETRO DE LA BARRENAS: 8 3/8"

DIÁMETRO DE LOS LASTRABARRENAS: 6 1/2"

RITMO (grados/1000 m)

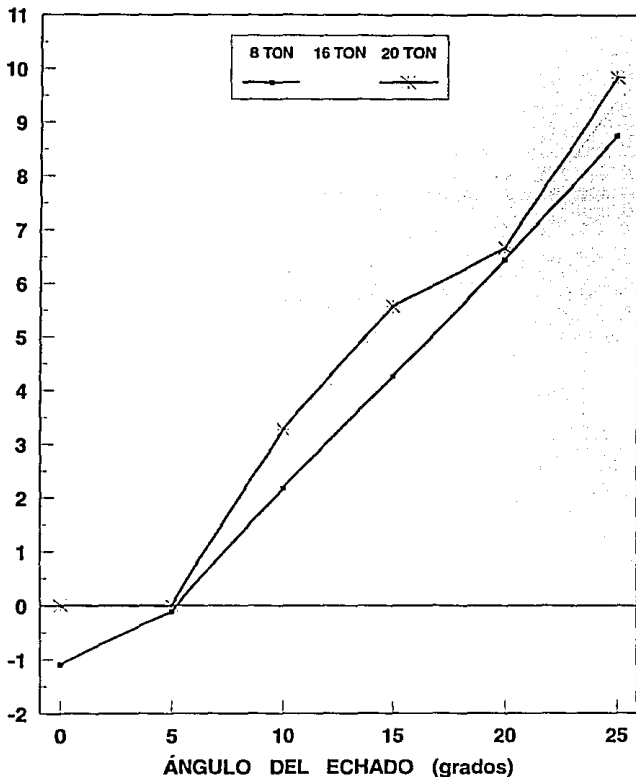


Figura 5.13 GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA EL RITMO EN GRADOS POR CADA 1000 m, PARA DIÁMETRO DE BARRENA DE 8 3/8" Y APAREJO: PBE, S/DCC, 1,2.

APAREJO: S/1, 2

DIÁMETRO DE LA BARRENAS: 8 3/8"

DIÁMETRO DE LOS LASTRABARRENAS: 6 1/2"

RITMO (grados/1000 m)

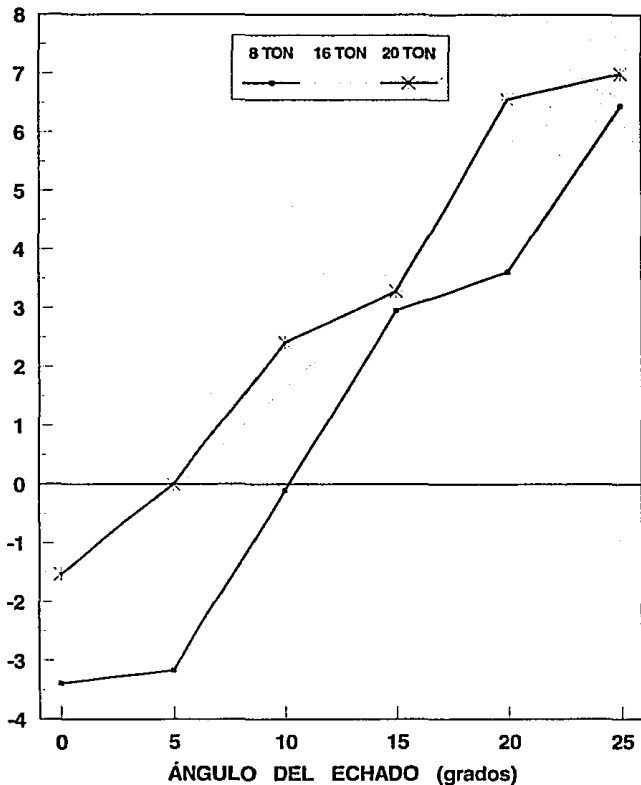


Figura 5.14 GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA EL RITMO EN GRADOS POR CADA 1000 m, PARA DIÁMETRO DE BARRENA DE 8 3/8" Y APAREJO: S/1, 2.

APAREJO: S/2, 3

DIÁMETRO DE LA BARRENAS: 8 3/8"

DIÁMETRO DE LOS LASTRABARRENAS: 6 1/2"

RITMO (grados/1000 m)

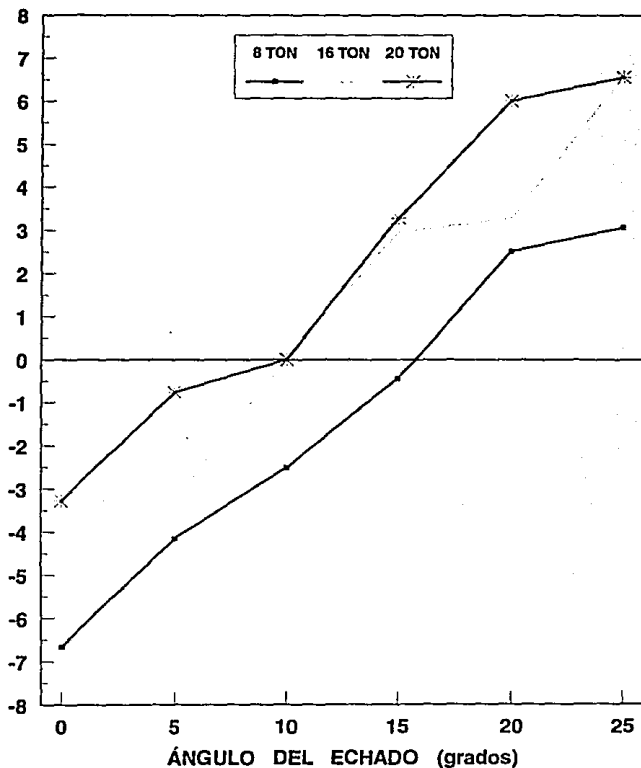


Figura 5.15 GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA EL RITMO EN GRADOS POR CADA 1000 m, PARA DIÁMETRO DE BARRENA 8 3/8" Y APAREJO: S/2, 3.

APAREJO: S/3, 4

DIÁMETRO DE LA BARRENAS: 8 3/8"

DIÁMETRO DE LOS LASTRABARRENAS: 6 1/2"

RITMO (grados/1000 m)

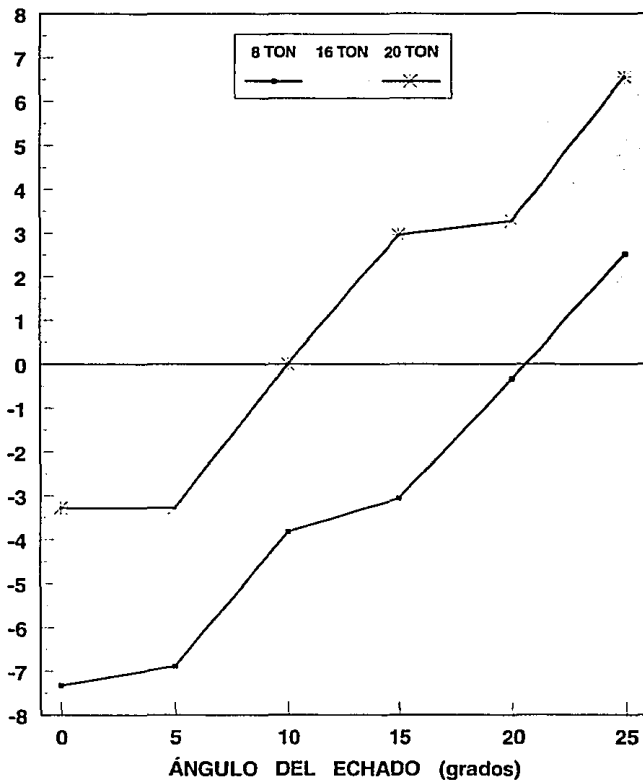


Figura 5.16 GRÁFICA DEL ÁNGULO DEL ECHADO CONTRA EL RITMO EN GRADOS POR CADA 1000 m, PARA DIÁMETRO DE BARRENA 8 3/8" Y APAREJO: S/3, 4.

5.3 EJEMPLOS

5.3.1) Se desea disminuir el ángulo de inclinación en 3° en una longitud de 1000 m, en la etapa de 12" y por correlación de pozos vecinos se espera un echado de la formación de 15° y se desea aplicar un peso a la barrena de 8 Toneladas.

Seleccionamos las cuatro gráficas correspondientes a la etapa de 12" y procedemos a analizar cada uno de los aparejos de fondo propuestos:

a) Configuración del aparejo de fondo: PBE, S/DCC, 1, 2. Figura 5.9

Iniciando con el ángulo del echado en el eje de las abscisas de 15° e interceptando el peso sobre la barrena de 8 Ton, obtenemos que el aparejo de fondo presentará un comportamiento a incrementar el ángulo del agujero en 4.2° por cada 1000 m perforados.

b) Configuración del aparejo de fondo: S/ 1, 2. Figura 5.10.

Iniciando con el ángulo del echado en el eje de las abscisas de 15° e interceptando el peso sobre la barrena de 8 Ton, obtenemos que el aparejo de fondo presentará un comportamiento a incrementar el ángulo del agujero en 2.75° por cada 1000 m perforados.

c) Configuración del aparejo de fondo: S/ 2, 3. Figura 5.11.

Iniciando con el ángulo del echado en el eje de las abscisas de 15° e interceptando el peso sobre la barrena de 8 Ton, obtenemos que el aparejo de fondo presentará un comportamiento a disminuir el ángulo del agujero en 3° por cada 1000 m perforados.

d) Configuración del aparejo de fondo: S/ 3, 4. Figura 5.12.

Iniciando con el ángulo del echado en el eje de las abscisas de 15° e interceptando el peso sobre la barrena de 8 Ton, obtenemos que el aparejo de fondo presentará un comportamiento a incrementar el ángulo del agujero en 7° por cada 1000 m perforados.

De tal manera que el aparejo de fondo más recomendable para este caso es el péndulo de 60 pies.

5.3.2) Se desea mantener el ángulo de desviación en la etapa de $8\ 3/8''$ y por correlación de pozos vecinos se espera un echado de la formación de 20° y se desea aplicar un peso a la barrena de 8 Toneladas.

Seleccionamos las cuatro gráficas correspondientes a la etapa de $8\ 3/8''$ y procedemos a analizar cada uno de los aparejos de fondo propuestos:

a) Configuración del aparejo de fondo: PBE, S/DCC, 1, 2. Figura 5.13.

Iniciando con el ángulo del echado en el eje de las abscisas de 20° e interceptando el peso sobre la barrena de 8 Ton, obtenemos que el aparejo de fondo presentará un comportamiento a incrementar el ángulo del agujero en 6.5° por cada 1000 m perforados.

b) Configuración del aparejo de fondo: S/ 1, 2. Figura 5.14.

Iniciando con el ángulo del echado en el eje de las abscisas de 20° e interceptando el peso sobre la barrena de 8 Ton, obtenemos que el aparejo

de fondo presentará un comportamiento a incrementar el ángulo del agujero en 3.6° por cada 1000 m perforados.

c) Configuración del aparejo de fondo: S/ 2, 3. Figura 5.15.

Iniciando con el ángulo del echado en el eje de las abscisas de 20° e interceptando el peso sobre la barrena de 8 Ton, obtenemos que el aparejo de fondo presentará un comportamiento a incrementar el ángulo del agujero en 2.5° por cada 1000 m perforados.

d) Configuración del aparejo de fondo: S/ 3, 4. Figura 5.16.

Iniciando con el ángulo del echado en el eje de las abscisas de 20° e interceptando el peso sobre la barrena de 8 Ton, obtenemos que el aparejo de fondo presentará un comportamiento a disminuir el ángulo del agujero en 0.25° por cada 1000 m perforados.

De tal manera que el aparejo de fondo más recomendable para este caso es el péndulo de 90 pies.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ◆ De acuerdo con los análisis de sensibilidad fueron determinados que la configuración del aparejo de fondo, el ángulo del echado de la formación y el peso sobre la barrena son los factores que afectan notablemente el comportamiento del aparejo de fondo.

- ◆ Las variables que se manejan en las gráficas prácticas de campo, son la configuración del aparejo de fondo, el ángulo del echado de la formación y del peso sobre la barrena; mientras que el resto de los parámetros permanecen constante, con base en la historia de la perforación en los campos desarrollados en la Región Sur.

- ◆ Las gráficas prácticas consideran únicamente diámetro de barrenas de 12" y 8 3/8", puesto que en estas etapas de perforación se presentan los mayores problemas en la desviación de los pozos. Asimismo, se consideran cuatro diferentes configuraciones de aparejos de fondo comúnmente utilizados.

- ◆ Las gráficas pueden ser utilizadas para la planeación y durante la perforación del pozo, permitiéndonos determinar el cambio de ángulo en una longitud perforada de 1000 m, de acuerdo con la configuración del aparejo de fondo. Asimismo, pueden ser utilizadas para la perforación direccional.

- ◆ Las gráficas prácticas para la selección del aparejo de fondo, fueron realizadas para los campos de la Región Sur. Sin embargo, pueden ser extendidas a otras áreas modificando los parámetros operativos, condiciones geológicas y problemática de los campos.

- ◆ Al seleccionarse la aplicación del aparejo de fondo para disminuir el ángulo de inclinación, debe tenerse presente que la respuesta del aparejo no es inmediata y se requiere de un control estricto en los parámetros operativos de perforación.

NOMENCLATURA

- D** = Diámetro exterior del componente o lastrabarrenas (pg).
- d** = Diámetro interior del componente o lastrabarrenas (pg).
- Db** = Diámetro de la barrena (pg).
- Ds₁** = Diámetro de las aletas del primer estabilizador (pg).
- Ds₂** = Diámetro de las aletas del segundo estabilizador (pg).
- D₃** = Diámetro exterior de lastrabarrenas que realizan la tangencia (pg).
- E** = Módulo de elasticidad (lb-f/pg²).
- F_B** = Magnitud de la fuerza en la barrena (lb-f).
- I** = Momento de inercia Axial (pg⁴).
- I₁** = Momento de Inercia Axial de los lastrabarrenas de la barrena al primer estabilizador (pg⁴).
- I₂** = Momento de Inercia Axial de los lastrabarrenas del primer estabilizador al segundo estabilizador (pg⁴).
- I₃** = Momento de Inercia Axial de los lastrabarrenas del último estabilizador al punto de tangencia (pg⁴).
- dr** = Distancia radial (pies).
- dr₁** = Distancia radial (barrena-primer estabilizador) (pies).
- dr₂** = Distancia radial (barrena-último estabilizador) (pies).
- dr₃** = Distancia radial (barrena-lastrabarrenas) (pies).
- L** = Longitud del componente o lastrabarrenas (pies).
- L₁** = Longitud de la barrena al primer estabilizador (pies).
- L₂** = Longitud del primer estabilizador al segundo estabilizador (pies).
- L₃** = Longitud del último estabilizador al punto de tangencia (pies).

- L_T = Longitud entre la barrena y el punto de tangencia (pies).
 m_1 = Momento de flexión del primer estabilizador (lb-f - pie).
 m_2 = Momento de flexión del segundo estabilizador (lb-f - pie)
 P_B = Carga Axial (lb-f).
 P_C = Carga compresiva de los lastrabarrenas (lb-f).
 q_1 = Peso unitario flotado de los lastrabarrenas desde la barrenas al primer estabilizador (lb-f/pie).
 q_2 = Peso unitario flotado de los lastrabarrenas desde el primero al segundo (lb-f/pie).
 q_3 = Peso unitario flotado de los lastrabarrenas desde el último estabilizador al punto de tangencia (lb-f/pie).
 q_i = $W_m \beta \sin \alpha$ donde $i = 1, 2 \text{ ó } 3$
 R = Rigidez (lb-f pg^2).
 U = Funcionalidad (radianes).
 V_i = Coeficiente (adimensional).
 W = Peso del componente en el aire (lb-f).
 W_m = Densidad del fluido de perforación (lb-m/gal). Aire = 0.010 lb/gal.
 W_u = Peso unitario de los lastrabarrenas (lb-f/pie).
 W_i = Coeficiente (adimensional).
 X_i = Coeficiente (adimensional).
 δ = Densidad del metal (lb-m/pie³). Para el acero = 490 lb-m/pie³.
 δ_a = Densidad del metal (lb-m/gal). Para el acero = 65.5 lb-m/gal.
 α = Angulo de inclinación (grados).
 β = Factor de flotación (adimensional).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Wood H. B. and Lubinski A., "Practical Charts for solving problems in hole deviation".
Spring Mt, Mid-continent Dist. of Prod., Oklahoma city, Okla., march 1954.
2. Wood H. B. and Lubinski A., "How to determine best hole and drill collar size", Oil and Gas Journal, junio 1954.
3. Wood H. B. and Lubinski A., "Use of estabilizers in controlling hole deviation", API Drilling and Production Practice, 1955.
4. Treichler H. E., Jr "Is a straight hole really straight?", Drilling 1957.
5. Treichler H. E., Jr "Penetration rate increases with large drill collar", World Oil, october 1959.
6. Hoch R. S. "A review of the crooked-hole problem and an analysis of packed bottom hole drill collar assemblies", API Drilling and Production Practice, 1962.
7. Lubinski A., "Maximum permissible doglegs in rotary borcholes", Jour, Petr. Tech., february 1961.

8. Wolfson L. "Tree-Dimensional Analysis of Constrained Directional Drilling Assemblies in a curved Hole", M. S. Thesis, the University of Tulsa. Department of Petroleum Engineering 1974.
9. Keith K. Millheim and Michael C. Apostol "The effect of Bottomhole Assembly Dynamics on the trajectory of a bit". Paper SPE 9222 presented at the 55 Annual Fall Conference of the SPE, Dallas, september 21-24, 1980.
10. Jiazhi B. "Bottomhole Assembly Problems Solved Beam-Column Theory". SPE 10561 (1982).
11. Timoshenko S. "Theory of Elastic Stability". McGraw-Hill, New York 1936.
12. Brakel J. D. and Azar J. J. "Prediction of Wellbore trajectory considering Bottomhole Assembly and Drill Bit Dynamics". Ph D. Dissertation. The University of Tulsa, Department of Petroleum Engineering 1986.
13. Paul A. Larson "Three-Dimensional, Quasi-Static, Drill Ahead BHA Model for Wellbore Trajectory Prediction and control" and "Operation Manual". Universidad de Tulsa (marzo 1991).
14. Hernández M. D. "Diseño de los Aparejos de Fondo en la Perforación de Pozos Petroleros". Tesis Profesional (octubre 1986).
15. Bourgoyne A. T. Jr., Millheim K. K., Chevenert M. E., Jung F. S. Jr, "Applied Drilling Engineering". Primera Edición, Richardson Tx. 1986.

16. William A. Nash "Resistencia de Materiales". Serie Schaums.
17. Archie Higdon, Edward H. Ohlsen, William B. Stiles, Jonh A. Weese, William F. Riley. "Mechanics of Materials". Tercera Edición (1976).
18. Marland P. Billing. "Geología Estructural".
19. PEMEX "Expediente, Consecutivo y Registros del pozo: Nazareth 1". Villahermosa, Tabasco, México.

APÉNDICE A

PROGRAMAS DE COMPUTACIÓN

A.1. PROGRAMA DE CÁLCULO PARA APAREJOS DE FONDO LISOS

```
10 PRINT "APAREJO DE FONDO LISO":PAUSE
20 !LECTURA DE DATOS!
30 INPUT "DIÁMETRO DE LA BARRENA (pg) = ";B
40 INPUT "DIÁMETRO EXTERIOR DE LASTRABARRENAS (pg) = ";DO
50 INPUT "DIÁMETRO INTERIOR DE LASTRABARRENAS (pg) = ";DI
60 INPUT "DENSIDAD DEL LODO (lb/gal) = ";D
70 INPUT "ÁNGULO DE INCLINACIÓN (grados) = ";A
80 INPUT "LONGITUD DE TANGENCIA PROPUESTO (pies) = ";LT
90 INPUT "PESO SOBRE LA BARRENA (lb) = ";PB
100 !CÁLCULO DEL PESO UNITARIO DE LOS LASTRABARRENAS!
110  $W = 2.67 * ((DO^2) - (DI^2))$ 
120 !CÁLCULO PESO UNITARIO FLOTADO DE LASTRABARRENAS!
130  $W1 = W * (1 - (D/65.5))$ 
140 !CÁLCULO DE LA DISTANCIA RADIAL!
150  $L = (B - DO) / 24$ 
160 !CÁLCULO DEL MOMENTO DE INERCIA AXIAL!
170  $I = PI * ((DO^4) - (DI^4)) / 64$ 
180 !CÁLCULO DE CARGA COMPRESIVA DE LOS LASTRABARRENAS!
```

```

190 PC = PB - (.5*W1*LT*COS(A))
200 ICÁLCULO DE LA FUNCIÓN DE UI
210 U = ((PC/(I*29E+06))^.5)*LT*6
220 C = U*180/PI
230 ICÁLCULO DE XI
240 X = 3*(TAN(C)-U)/(U^3)
250 ICÁLCULO DE LA LONGITUD DE TANGENCIAI
260 L2 = ((I*29E+06*L)/(6*W1*X*SIN(A)))^25
270 IF ABS (L2-LT) <= 0.1 THEN GOTO 320
280 L3 = (LT+L2)/2
290 LET LT = L3
300 GOTO 190
310 ICÁLCULO DE LA FUERZA EN LA BARRENAI
320 FB = -.5*W1*L2*SIN(A)+((PB-.5*W1*L2*COS(A)*L)/12
-330 IRESULTADOS!
340 PRINT USING "PESO FLOTADO = ####.## lb/pie";W1:PAUSE
350 PRINT USING "DISTANCIA RADIAL = ##.### pie";L:PAUSE
360 PRINT USING "MOMENTO INERCIA AXIAL = ####.## pg4";I:PAUSE
370 PRINT USING "CARGA COMPRESIVA = #####.## lb";PC:PAUSE
380 PRINT USING "LONGITUD TANGENCIA = ####.## pies";L2:PAUSE
390 PRINT USING "FUERZA EN LA BARRENA = ####.## lb";FB:PAUSE
400 INPUT "DESEA OTRO PESO SOBRE BARRENA SI(1), NO(2) = ";Z
410 IF Z = 1 THEN GOTO 90
420 END

```


A.2. PROGRAMA DE CÓMPUTO PARA APAREJOS DE FONDO CON UN ESTABILIZADOR.

```
10 PRINT "APAREJO DE FONDO CON UN ESTABILIZADOR":PAUSE
20 ILECTURA DE DATOS!
30 INPUT "DIÁMETRO DE LA BARRENA (pg) = ";B
40 INPUT "DIÁMETRO EXTERIOR DE LASTRABARRENAS (pg) = ";DO
50 INPUT "DIÁMETRO INTERIOR DE LASTRABARRENAS (pg) = ";DI
60 INPUT "DIÁMETRO DE ALETAS DEL ESTABILIZADOR (pg) = ";S
70 INPUT "LONGITUD DEL ESTABILIZADOR (pies) = ";L1
80 INPUT "DENSIDAD DEL LODO (lb/gal) = ";D
90 INPUT "ÁNGULO DE INCLINACIÓN (grados) = ";A
100 INPUT "LONGITUD DE TANGENCIA PROPUESTO (pies) = ";LT
110 INPUT "PESO SOBRE LA BARRENA (lb) = ";PB
120 ICÁLCULO DEL PESO UNITARIO DE LOS LASTRABARRENAS!
130  $W = 2.67 * ((DO^2) - (DI^2))$ 
140 ICÁLCULO PESO UNITARIO FLOTADO DE LASTRABARRENAS!
150  $W1 = W * (1 - (D/65.5))$ 
160  $W2 = W1 * SIN(A)$ 
170 ICÁLCULO DE LA DISTANCIA RADIAL!
180  $D1 = (B - S) / 24$ 
190  $D2 = (B - DO) / 24$ 
200 ICÁLCULO DEL MOMENTO DE INERCIA AXIAL!
210  $I = PI * ((DO^4) - (DI^4)) / 64$ 
220 ICÁLCULO DE CARGA COMPRESIVA DE LOS LASTRABARRENAS!
230  $PC1 = PB - (.5 * W1 * L1 * COS(A))$ 
```

```

240  PC2 = PB - ((W1*L1)+(0.5*W1*LT))*COS(A)
250  PT = PC1 + PC2
260  ICÁLCULO DE LA FUNCION DE U!
270  U1 = ((PC1/(I*29E+06))^0.5)*L1*6
280  C1 = U1*180/PI
290  U2 = ((PC2/(I*29E+06))^0.5)*LT*6
300  C2 = U2*180/PI
310  ICÁLCULO DE X!
320  X1 = 3*(TAN(C1)-U1/(U1^3))
330  X2 = 3*(TAN(C2)-U2/(U2^3))
340  ICÁLCULO DE Y!
350  Y2 = 3*((1/SIN(2*C2))-(1/(2*U2)))/U2
360  ICÁLCULO DE V!
370  V1 = 3*((1/(2*U1))-(1/(TAN(2*C1))))/(2*U1)
380  V2 = 3*((1/(2*U2))-(1/(TAN(2*C2))))/(2*U2)
390  ICÁLCULO DEL MOMENTO DE FLEXIÓN!
400  M1 = W2*X1*(L1^2)/4
410  M2 = W2*X2*(LT^3)/(4*L1)
420  M3 = I*D1*29E+06/(24*(L1^2))
430  M4 = I*(D1-D2)*29E+06/(24*L1*LT)
440  M5 = 2*(V1+(LT*V2/L1))
450  M = (-M1-M2+M3-M4)/M5
460  ICÁLCULO DE LA LONGITUD DE TANGENCIA!
470  L2 = ((I*29E+06*(D2-D1)/(6*W2*X2))-(4*M*Y2*(LT^2)/(W2*X2)))^0.25
480  IF ABS (L2-LT) <= 0.1 THEN GOTO 530
490  L3 = (LT+L2)/2
500  LET LT = L3

```

```

510 GOTO 240
520 ICÁLCULO DE LA FUERZA EN LA BARRENA!
530 FB = (-.5*W2*L1)+(PC1*D1/L1)+(PC1*D1/L1)-(ML1)
540 IRESULTADOS!
550 PRINT USING "PESO FLOTADO = ####.## lb/pie";W1:PAUSE
560 PRINT USING "MOMENTO INERCIA AXIAL = ####.## pg4";I:PAUSE
570 PRINT USING "CARGA COMPRESIVA = #####.## lb";PT:PAUSE
580 PRINT USING "MOMENTO FLEXIÓN= #####.## lb-pie";M:PAUSE
590 PRINT USING "LONGITUD TANGENCIA = ####.## pies";L2:PAUSE
600 PRINT USING "FUERZA EN LA BARRENA = ####.## lb";FB:PAUSE
610 INPUT "DESEA OTRO PESO SOBRE BARRENA SI(1), NO(2) = ";Z
620 IF Z = 1 THEN GOTO 110
630 END

```

A.3. PROGRAMA DE COMPUTO PARA APAREJOS DE FONDO CON DOS ESTABILIZADORES.

```

10 PRINT "APAREJO FONDO CON DOS ESTABILIZADORES":PAUSE
20 ILECTURA DE DATOS!
30 INPUT "DIÁMETRO DE LA BARRENA (pg) = ";B
40 INPUT "DIÁMETRO EXTERIOR DE LASTRABARRENAS (pg) = ";DO
50 INPUT "DIÁMETRO INTERIOR DE LASTRABARRENAS (pg) = ";DI
60 INPUT "DIÁMETRO ALETAS PRIMER ESTABILIZADOR (pg) = ";S1
70 INPUT "LONGITUD AL PRIMER ESTABILIZADOR (pies) = ";L1

```

80 INPUT "DIÁMETRO ALETAS SEGUNDO ESTABILIZADOR (pg)= ";S2
 90 INPUT "LONGITUD AL SEGUNDO ESTABILIZADOR (pies) = ";L2
 100 INPUT "DENSIDAD DEL LODO (lb/gal) = ";D
 110 INPUT "ÁNGULO DE INCLINACIÓN (grados) = ";A
 120 INPUT "LONGITUD DE TANGENCIA PROPUESTO (pies) = ";LT
 130 INPUT "PESO SOBRE LA BARRENA (lb) = ";PB
 140 !CÁLCULO DEL PESO UNITARIO DE LOS LASTRABARRENAS!
 150 $W = 2.67 * ((DO^2) - (D1^2))$
 160 !CÁLCULO PESO UNITARIO FLOTADO DE LASTRABARRENAS!
 170 $W1 = W * (1 - (D/65.5))$
 180 $W2 = W1 * SIN(A)$
 190 !CÁLCULO DE LA DISTANCIA RADIAL!
 200 $D1 = (B - S1) / 24$
 210 $D2 = (B - S2) / 24$
 220 $D3 = (B - DO) / 24$
 230 !CÁLCULO DEL MOMENTO DE INERCIA AXIAL!
 240 $I = PI * ((DO^4) - (D1^4)) / 64$
 250 !CÁLCULO DE CARGA COMPRESIVA DE LOS LASTRABARRENAS!
 260 $PC1 = PB - (.5 * W1 * L1 * COS(A))$
 270 $PC2 = PB - (((W1 * L1) + (.5 * W1 * LT)) * COS(A))$
 280 $PC3 = PB - (((W1 * L1) + (W1 * L2) + (.5 * W1 * LT)) * COS(A))$
 290 $PT = PC1 + PC2 + PC3$
 300 !CÁLCULO DE LA FUNCION DE U!
 310 $U1 = ((PC1 / (1 * 29E + 06)) ^ .5) * L1 * 6$
 320 $C1 = U1 * 180 / PI$
 330 $U2 = ((PC2 / (1 * 29E + 06)) ^ .5) * L2 * 6$
 340 $C2 = U2 * 180 / PI$

350 $U3 = ((PC3/(I*29E+06))^{.5}) * LT * 6$
 360 $C3 = U3 * 180 / PI$
 370 !CÁLCULO DE X!
 380 $X1 = 3 * (TAN(C1) - U1 / (U1^3))$
 390 $X2 = 3 * (TAN(C2) - U2 / (U2^3))$
 400 $X3 = 3 * (TAN(C3) - U3 / (U3^3))$
 410 !CÁLCULO DE Y!
 420 $Y2 = 3 * ((1 / SIN(2 * C2)) - (1 / (2 * U2))) / U2$
 430 $Y3 = 3 * ((1 / SIN(2 * C3)) - (1 / (2 * U3))) / U3$
 440 !CÁLCULO DE V!
 450 $V1 = 3 * ((1 / (2 * U1)) - (1 / (TAN(2 * C1)))) / (2 * U1)$
 460 $V2 = 3 * ((1 / (2 * U2)) - (1 / (TAN(2 * C2)))) / (2 * U2)$
 470 !CÁLCULO DEL MOMENTO DE FLEXIÓN!
 480 $M1 = W2 * X1 * (L1^2) / 4$
 490 $M2 = W2 * X2 * (L2^3) / (4 * L1)$
 500 $M3 = I * D1 * 29E + 06 / (24 * (L1^2))$
 510 $M4 = I * (D1 - D2) * 29E + 06 / (24 * L1^2)$
 520 $M5 = 2 * (V1 + (L2 * V2 / L1))$
 530 $M6 = L2 / L1$
 540 $M = (-M1 - M2 + M3 - M4)$
 550 $N1 = W2 * X2 * (L2^2) / 4$
 560 $N2 = W2 * X3 * (LT^3) / (4 * L2)$
 570 $N3 = I * (D1 - D2) * 29E + 06 / (24 * (L2^2))$
 580 $N4 = I * (D3 - D2) * 29E + 06 / (24 * L2 * LT)$
 590 $N5 = 2 * (V2 + (LT / L2))$
 600 $N = (N1 - N2 - N3 - N4)$
 610 $E = N - (N5 * M / M6)$

```

620 F = (Y2*M6/M5)-N5
630 R = (M/M6)-(E/F)
640 R1 = ((N*M6)-(N5*M))/((Y2*M6)-(N5*M5))
650 ICÁLCULO DE LA LONGITUD DE TANGENCIAI
660 L5 = I*(D3-D2)*29E+07/(6*W2*X3)
670 L3 = ABS (L5-L6)^.25
680 IF ABS (L3-LT) <= 0.1 THEN GOTO 740
690 L4 = (LT+L3)/2
700 LET LT = L4
710 GOTO 280
720 ICÁLCULO DE LA FUERZA EN LA BARRENAI
730 FB = (-.5*W2*L1)+(PC1*D1/L1)-(R1/L1)
740 !RESULTADOS!
750 PRINT USING "PESO FLOTADO = ####.## lb/pie";W1:PAUSE
760 PRINT USING "MOMENTO INERCIA AXIAL = ####.## pg4";I:PAUSE
770 PRINT USING "CARGA COMPRESIVA = #####.## lb";PT:PAUSE
780 PRINT USING "MOM. FLEXIÓN 1 = #####.## lb-pie";R1:PAUSE
790 PRINT USING "MOM. FLEXIÓN 2 = #####.## lb-pie";R:PAUSE
800 PRINT USING "LONGITUD TANGENCIA = ####.## pies";L3:PAUSE
810 PRINT USING "FUERZA EN LA BARRENA = ####.## lb";FB:PAUSE
820 INPUT "DESEA OTRO PESO SOBRE BARRENA SI(1), NO(2) = ";Z
830 IF Z = 1 THEN GOTO 130
840 END

```

A.4. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SECUENCIA DE CÁLCULO DE LOS ANÁLISIS DE LOS APAREJOS DE FONDO POR EL MÉTODO ANALÍTICO.

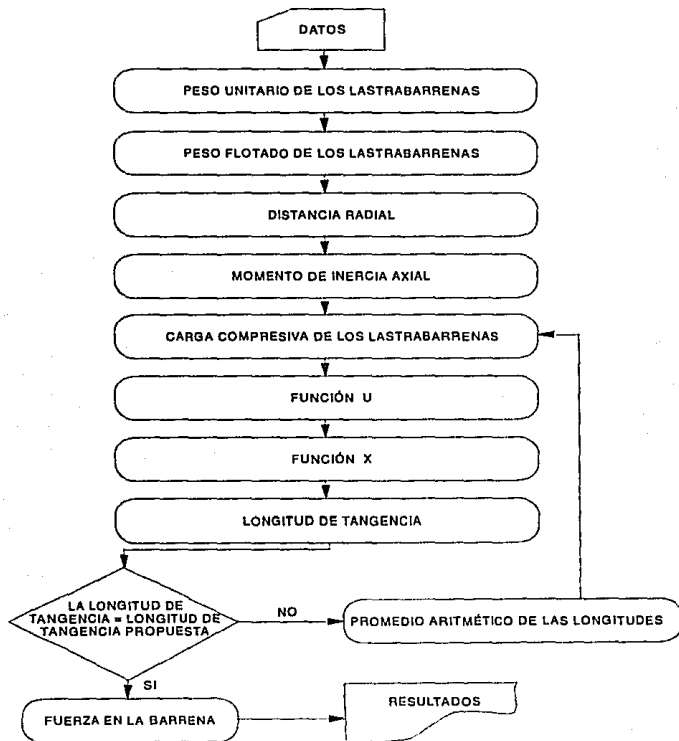


Figura A1 DIAGRAMA DE FLUJO

A.5. EJEMPLO PRÁCTICO DE UN APAREJO DE FONDO LISO

DATOS:

Diámetro de la barrena	= 12"
Diámetro exterior de lastrabarrenas	= 8"
Diámetro interior de lastrabarrenas	= 2.8125"
Ángulo de inclinación	= 4.50°
Densidad de lodo	= 0.010 lb/gal
Longitud de tangencia inicial	= 10 pies

RESULTADOS:

Peso flotado de lastrabarrenas	= 149.99 lb/pie
Distancia radial	= 0.1667 pies
Momento de Inercia Axial	= 197.99 pg4

P.S.B. (lb-f)	CARGA COMPRESIVA LASTRABARRENAS (lb-f)	LONGITUD DE TANGENCIA (m)	FUERZA EN LA BARRENA (lb-f)
11,000	6,534.87	59.78	-333.25
22,000	17,646.89	58.26	-292.07
33,000	28,757.19	56.79	-249.49
44,000	39,863.83	55.36	-205.47
55,000	50,967.25	53.98	-159.99
66,000	62,066.77	52.64	-113.01

CONCLUSIÓN

En la tabla de resultados puede observarse que para todo el rango de peso sobre la barrena, la magnitud de la fuerza en la barrena es negativa; el signo negativo indica que el aparejo presentará un comportamiento a disminuir el ángulo de inclinación. Sin embargo, debe tenerse presente la fuerza de la formación, puesto que la fuerza resultante en el aparejo será igual a la fuerza de la formación menos el valor absoluto de la fuerza en la barrena. Por ejemplo para un peso sobre la barrena de 11,000 lb se obtiene una fuerza negativa en la barrena de -333.25 lb y considerando una fuerza de la formación de 500 lb, la fuerza resultante será de 166.75 lb la cual incrementará el ángulo de inclinación.

A.6. EJEMPLO PRÁCTICO DE UN APAREJO DE FONDO CON UN ESTABILIZADOR.

DATOS:

Diámetro de la barrena	= 12"
Diámetro exterior de lastrabarrenas	= 8"
Diámetro interior de lastrabarrenas	= 2.8125"
Diámetro de las aletas del estabilizador	= 12"
Longitud al primer estabilizador	= 12 pies
Ángulo de inclinación	= 4.50°
Densidad de lodo	= 0.010 lb/gal
Longitud de tangencia inicial	= 20 pies

RESULTADOS:

Peso flotado de lastrabarrenas = 149.99 lb/pie

P.S.B. (lb-f)	CARGA COMPRESIVA LASTRABARRENAS (lb-f)	MOMENTO DE FLEXIÓN (lb-pie)	LONGITUD DE TANGENCIA (m)	FUERZA EN LA BARRENA (lb-f)
11,000	13,623	-10,431	76.14	798.65
22,000	35,709	-10,505	74.97	804.83
33,000	57,796	-10,577	73.80	810.85
44,000	79,881	-10,652	72.66	817.14
55,000	101,965	-10,730	71.55	823.61
66,000	62,067	-10,813	70.46	830.51

CONCLUSIÓN

En la tabla de resultados puede observarse que para todo el rango de peso sobre la barrena, la magnitud de la fuerza en la barrena es positiva; el signo positivo indica que el aparejo de fondo presentará un comportamiento a incrementar el ángulo de inclinación. Sin embargo, debe tenerse presente la fuerza de la formación, puesto que la fuerza resultante en el aparejo será igual a la fuerza de la formación menos el valor absoluto de la fuerza en la barrena. Por ejemplo para un peso sobre la barrena de 11,000 lb se obtiene una fuerza positiva en la barrena de 798.65 lb y considerando una fuerza de la formación de 500 lb, la fuerza resultante será de - 298.65 lb la cual disminuirá el ángulo de inclinación.

A.7. EJEMPLO PRÁCTICO DE UN APAREJO DE FONDO CON DOS ESTABILIZADORES

DATOS:

Diámetro de la barrena	= 12"
Diámetro exterior de lastrabarrenas	= 8"
Diámetro interior de lastrabarrenas	= 2.8125"
Diámetro de las aletas del primer estabilizador	= 12"
Diámetro de las aletas del segundo estabilizador	= 12"
Longitud al segundo estabilizador	= 12 pies
Ángulo de inclinación	= 4.50°
Densidad de lodo	= 0.010 lb/gal
Longitud de tangencia inicial	= 50 pies

RESULTADOS:

Peso flotado de lastrabarrenas = 149.99 lb/pie

P.S.B. (lb-f)	CARGA COMPRESIVA LASTRABARRENAS (lb-f)	MOMENTO DE FLEXIÓN (lb-pie)	LONGITUD DE TANGENCIA (m)	FUERZA EN LA BARRENA (lb-f)
11,000	24,154	-6,239.95	77.42	-4,969.55
22,000	56,912	-7,674.51	80.65	-6,161.50
33,000	80,178	-44,816.86	210.95	38,265.22
44,000	117,931	-21,593.65	147.31	18,537.86
55,000	152,701	-14,915.67	123.61	12,857.23
66,000	186,780	-11,331.58	109.17	9,809.38

CONCLUSIÓN

En la tabla de resultados puede observarse que para 33,000 lb de peso sobre la barrena, la magnitud de la fuerza en la barrena es la mayor para todo el rango; ésta causa que el aparejo de fondo tienda a incrementar el ángulo de inclinación. Por otro lado, para 11,000 lb de peso sobre la barrena la magnitud de la fuerza en la barrena es negativa por lo que el aparejo de fondo presentará un comportamiento a disminuir el ángulo de inclinación. Nuevamente, la fuerza de la formación deberá ser considerada para conocer la fuerza resultante del aparejo de fondo.

APÉNDICE B

CÁLCULO DE LA TRAYECTORIA DEL POZO: NAZARETH 1

PROFUNDIDAD DESARROLLADA (m)	ÁNGULO (grados)	AZIMUT (grados)	PROF. VERTICAL (m)	DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL (grados)	DIRECCIÓN (grados)
400	1.00	30	399.98	3.49	30
425	1.00	25	424.98	3.93	30
450	1.00	30	449.97	4.36	30
475	1.00	30	474.97	4.80	30
500	1.00	30	499.96	5.23	30
525	1.00	35	524.96	5.67	30
550	1.00	40	549.96	6.10	30
575	1.00	40	574.95	6.53	31
600	1.00	35	599.95	6.97	31
626	1.00	40	624.95	7.40	32
650	0.50	40	649.94	7.73	32
675	0.50	40	674.94	7.94	32
700	0.50	40	699.94	8.16	33
725	0.50	50	724.94	8.37	33
750	0.75	40	749.94	8.64	33
775	0.75	40	774.94	8.96	34
800	0.75	40	799.93	9.29	34
825	0.75	40	824.93	9.61	34
850	0.75	40	849.93	9.94	34
875	1.00	40	874.93	10.32	34
900	1.00	40	899.92	10.75	35
925	1.00	40	924.92	11.19	35
950	1.25	50	949.92	11.67	35
975	1.00	40	974.91	12.16	36
1000	1.25	40	999.91	12.64	36

PROFUNDIDAD DESARROLLADA (m)	ÁNGULO (grados)	AZIMUT (grados)	PROF. VERTICAL (m)	DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL (grados)	DIRECCIÓN (grados)
1025	1.50	50	1024.90	13.24	36
1050	1.25	75	1049.89	13.78	37
1075	1.00	95	1074.89	14.11	38
1100	0.75	95	1099.88	14.33	40
1125	1.00	60	1124.88	14.63	41
1150	1.50	40	1149.87	15.17	41
1175	1.75	40	1174.86	15.88	41
1200	2.00	40	1199.85	16.70	41
1225	2.50	40	1224.83	17.68	41
1250	2.75	40	1249.80	18.82	41
1275	2.50	50	1274.78	19.96	41
1300	2.75	55	1299.75	21.09	42
1325	2.75	55	1324.72	22.26	43
1350	2.75	55	1349.69	23.43	43
1375	2.75	55	1374.66	24.61	44
1400	2.75	55	1399.64	25.78	44
1425	2.75	55	1424.61	26.96	45
1450	3.00	55	1449.58	28.20	45
1475	3.00	55	1474.54	29.49	46
1500	3.00	55	1499.51	30.78	46
1525	3.00	55	1524.47	32.07	46
1550	3.00	60	1549.44	33.36	47
1575	3.00	60	1574.40	34.63	47
1600	3.00	55	1599.37	35.92	48
1625	3.00	55	1624.33	37.22	48
1650	3.00	60	1649.30	38.51	48
1675	3.00	60	1674.26	39.79	49
1700	3.00	60	1699.23	41.08	49
1725	3.00	60	1724.19	42.36	49
1750	3.00	55	1749.16	43.66	50

PROFUNDIDAD DESARROLLADA (m)	ÁNGULO (grados)	AZIMUT (grados)	PROF. VERTICAL (m)	DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL (grados)	DIRECCIÓN (grados)
1775	3.00	55	1774.13	44.96	50
1800	3.00	55	1799.09	46.26	50
1825	3.25	60	1824.05	47.67	50
1850	3.50	55	1849.01	49.08	50
1875	3.75	60	1873.96	50.64	51
1900	3.75	60	1898.91	52.26	51
1925	4.00	60	1923.85	53.93	51
1950	4.25	70	1948.79	55.67	52
1975	4.50	70	1973.71	57.49	52
2000	4.50	65	1998.64	59.38	53
2025	4.50	65	2023.56	61.30	53
2050	4.50	65	2048.48	63.22	53
2075	4.50	65	2073.40	65.14	54
2100	4.75	85	2098.32	67.03	54
2125	4.75	85	2123.24	68.82	55
2150	4.75	85	2148.15	70.62	56
2175	4.75	85	2173.07	72.44	57
2200	5.00	85	2197.98	74.32	58
2225	5.00	85	2222.88	76.27	58
2250	5.00	85	2247.78	78.22	59
2275	5.25	85	2272.68	80.21	60
2300	5.25	85	2297.58	82.26	61
2325	5.50	85	2322.47	84.40	61
2350	5.50	80	2347.35	86.64	62
2375	5.50	78	2372.24	88.93	62
2400	5.75	80	2397.12	91.28	63
2425	5.75	85	2421.99	93.64	63
2443	5.50	86	2439.91	95.28	64
2471	5.00	99	2467.79	97.53	64
2499	5.50	95	2495.67	99.70	65

PROFUNDIDAD DESARROLLADA (m)	ÁNGULO (grados)	AZIMUT (grados)	PROF. VERTICAL (m)	DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL (grados)	DIRECCIÓN (grados)
2527	5.50	92	2523.54	102.70	66
2556	5.50	91	2554.41	104.58	67
2584	5.50	96	2580.28	106.98	67
2612	5.75	94	2608.15	109.41	68
2640	6.00	93	2636.00	112.00	69
2668	6.00	100	2663.85	114.60	69
2696	6.00	100	2691.69	117.12	70
2725	5.75	99	2720.54	119.71	71
2753	5.75	99	2748.40	122.19	71
2781	5.50	101	2776.26	124.60	72
2809	5.50	100	2804.14	126.96	72
2837	5.25	96	2832.01	129.33	73
2866	5.25	97	2860.89	131.77	73
2894	5.50	97	2888.77	134.18	74
2922	6.00	96	2916.63	136.77	74
2950	6.00	95	2944.47	139.50	75
2978	6.50	95	2972.31	142.37	75
3007	6.50	93	3001.12	145.48	76
3035	6.25	94	3028.95	148.44	76
3063	6.75	95	3056.78	151.51	76
3091	7.00	87	3084.57	154.82	76
3119	7.00	86	3112.37	158.17	76
3148	7.00	85	3141.15	161.66	76
3176	7.25	84	3168.93	165.09	76
3204	7.50	83	3196.70	168.66	76
3232	7.50	81	3224.46	172.30	77
3260	7.75	80	3252.21	176.00	77
3288	7.75	80	3279.96	179.77	77
3373	7.75	79	3364.18	191.22	77
3401	8.00	80	3391.92	195.05	77

PROFUNDIDAD DESARROLLADA (m)	ÁNGULO (grados)	AZIMUT (grados)	PROF. VERTICAL (m)	DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL (grados)	DIRECCIÓN (grados)
3429	8.00	80	3419.65	198.94	77
3438	8.50	80	3428.55	200.23	77
3469	8.67	75	3459.20	204.86	77
3486	8.00	79	3456.03	207.32	77
3495	8.00	79	3484.94	208.58	77
3505	8.00	79	3494.84	209.97	77
3515	7.75	75	3504.75	211.34	77
3535	8.00	72	3524.56	214.07	77
3550	7.25	70	3539.42	216.05	77
3562	7.00	70	3551.33	217.53	77
3589	6.50	70	3578.15	220.68	77
3616	6.50	70	3604.97	223.72	77
3638	6.00	70	3626.84	226.10	77
3740	6.50	70	3728.23	237.13	76
3759	6.50	70	3747.11	239.27	76
3810	7.00	70	3797.76	245.23	76
3834	7.50	70	3821.57	248.24	76
3890	8.00	70	3877.06	255.75	76
3930	8.00	70	3916.67	261.29	76
3963	8.00	70	3949.35	265.86	76
4014	8.00	70	3999.85	272.93	75
4053	8.00	70	4038.47	278.33	75
4100	8.00	70	4085.01	284.84	75

APÉNDICE C

MANEJO DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN¹³

C.1. INTRODUCCIÓN

Se requiere de dos campos de entrada de datos. El primero contiene las condiciones de operación, los parámetros de perforación y la descripción de los componentes del aparejo de fondo llamado TUDRPDAM.DAT. El segundo campo contiene los datos de la trayectoria del agujero llamado ISOT.

Los campos de entrada son de libre formato en donde se permiten espacios entre números y espacio entre las líneas de datos.

C.2. CAMPO DE DATOS TUDRPDAM.DAT

Este campo es generado por el menú del sistema, pero el usuario lo puede construir usando un editor.

El campo de entrada de datos TUDRPDAM.DAT contiene básicamente cinco líneas principales que a continuación se mencionan:

LINEA 1 NTITLE, M, DEPINC, NOINC, RLLR, LIST, ILIN, AGGR.

- NTITLE** Número de líneas deseadas para la descripción del aparejo de fondo y títulos.
- M** Número de componentes del aparejo de fondo. Con este valor se genera la malla.
- DEPINC** Incremento de profundidad deseado para perforar. Se recomienda 10 pies.
- NOINC** Número total de incrementos deseados para perforar.
La profundidad total de perforación (pies) = NOINC*DEPINC.
 $NOINC = (100 - \text{número original de estaciones})$.
- RLLR** Este parámetro únicamente puede ser igual a 1 ó 0.
Cuando se utiliza una barrena tricónica deberá asignarse RLLR = 0; lo cual permite que la barrena camine hacia la derecha. Cuando RLLR = 1, se requiere cuando se utilice una barrena PDC o bien un aparejo de fondo con un sustituto curvo (codo); esto, permita el análisis de la orientación de la cara de la herramienta.
- LIST** Este parámetro únicamente puede ser igual a 1 ó 0.
Cuando LIST = 0 el análisis del elemento finito es generado pero no gravado. Mientras que LIST = 1, todos los resultados del elemento finito son escritos en un campo llamado TUDRPDAM.OUT.
- ILIN** Este parámetro únicamente puede ser igual a 0 ó 1.
Cuando ILIN = 0 se realiza un análisis lineal y ILIN = 1 se realiza un análisis no lineal. Se recomienda ILIN = 0.
- AGGR** Este parámetro representa la agresividad.

Si $AGGR = 1$ presenta una agresividad neutral. Sin embargo, si el usuario decide que $AGGR$ se mayor a 1, origina que el aparejo de fondo reaccione más rápidamente a las magnitudes de las fuerzas en ambas direcciones (inclinación y dirección).

LINEA 2. TÍTULO DE LA INFORMACIÓN

El número de líneas asignadas en **NTITLE** son usadas para el título de la información la cual es impresa en la primera página. El Texto de la información puede ser colocada entre comillas y con un máximo de tres renglones.

LINEA 3 WOB, RHOMUD, DWB, BTQ, DIP, STRK, ANHI, ANHA.

WOB Peso aplicado a la barrena (lb-f).

RHOMUD Densidad del fluido de perforación en el pozo durante la perforación del intervalo (lb/gal).

DWD Diámetro promedio del agujero en el intervalo perforado (pg).

BTQ Es el torque aplicado a la barrena (lb-pie). No es el torque en la superficie (rotaria).

DIP Es el ángulo formado entre la estratificación y un plano horizontal (grados).

STRK Es la dirección del buzamiento en sentido de las manecillas del reloj a partir del Norte (grados). Por definición el buzamiento es

perpendicular en la dirección del echado. Una limitación es que el $0 < \text{buzamiento} < = 179^\circ$.

ANHI Es el índice anisotrópico de inclinación.

Los valores recomendados para este índice son de 0 (isotrópico) a 0.1. Cuando no se desea la inclinación en un análisis anisotrópico se asienta $\text{ANHI} = 0.0$

ANHA Es el índice anisotrópico del azimut.

Los valores recomendados para el índice son de 0 a 0.1. Cuando no se desea el azimut en un análisis anisotrópico se asiente $\text{ANHA} = 0.0$. Los índices anisotrópicos de la inclinación y del azimut son independientes y no requieren ser iguales.

LINEA 4 DO (1), CF (1).

DO(1) Diámetro de la barrena (pg).

CF(1) Coeficiente de fricción en la barrena.

LINEA 5 ITYPE, AL, DO, DI, CF.

ITYPE Este parámetro está referido a los componentes del aparejo de fondo respecto a su forma y tipo de material.

1 = cuadrado de acero.

2 = cilindro de acero.

3 = cilindro de monel.

4 = sustituto curvo (codo). Se requiere de una línea adicional.

5 = cilindro de aluminio.

25 = estabilizador de acero. Se requiere de una línea adicional.

35 = estabilizador de monel. Se requiere de una línea adicional.

AL	Longitud del componente (pies).
DO	Diámetro exterior al componente (pg).
DI	Diámetro interior del componente (pg).
CF	Coefficiente de fricción del componente (adimensional).

Si ITYPE = 4, se requiere de una línea adicional inmediatamente abajo, para la clara descripción del sustituto curvo. Los datos de esta línea serán:

BSA(1), BSOFF para el primer codo más cercano a la barrena.

BSA(2) para el segundo codo (limitado a dos curvaturas).

Donde:

BSA Es el ángulo del codo (grados)

BSOFF Es la orientación de la cara de la herramienta. Para el lado alto del pozo = 0.0 y para el lado bajo = 180°, la medición será en sentido de las manecillas del reloj a partir del lado alto del pozo.

Si ITYPE = 25 ó 35, se requiere de una línea adicional inmediatamente abajo, para la clara descripción del estabilizador. Los datos de esta línea serán:

BLDAL, BLDDO requeridos para cada estabilizador.

Donde:

BLDAL Longitud de las aletas del estabilizador (pies), lo cual no puede exceder de la longitud del cuerpo.

BLDDO Diámetro exterior de las aletas del estabilizador (pg), el cual no podrá ser más grande que el diámetro de la barrena.

Durante el desarrollo del elemento finito en el aparejo de fondo se discretiza a asignar tres elementos a cada estabilizador. Un elemento para la parte superior de las aletas, otro para la parte central de las aletas y el último para la parte baja de las aletas del estabilizador.

Cuando el usuario está construyendo el campo de datos debe tomar en cuenta que un estabilizador son tres elementos y afecta al valor M. Si no hay estabilizadores en el aparejo de fondo, M es exactamente el número de componentes y es igual al número de líneas requeridas para definir los componentes.

El valor de M permite un máximo de 30 nodos para la descripción del aparejo de fondo, por lo que se recomienda realizar la malla más adecuada para obtener la configuración total del aparejo.

C.3. CAMPO DE DATOS ISOT

Este campo contiene los datos originales de las estaciones y son reescritos una vez iniciado el análisis. El campo *.ORI mantiene los datos de las estaciones originales. Este campo *.ORI es copiado automáticamente sobre ISOT antes de comenzar la ejecución del programa.

La primera línea *.ORI contiene el número de estaciones originales a leer, cada línea siguiente de *.ORI deberá contener a ZS, DS y HS.

Donde:

ZS Profundidad desarrollada (pies).

DS Inclinación inicial del pozo desde la vertical (grados).

HS Azimut inicial del pozo a partir del Norte en sentido de la manecillas del reloj (grados).

La primera línea de ISOT contiene el número total de estaciones (originales + simulación) y cada línea siguiente de ISOT presentará a ZS, DS, HS, BRATE y TRATE.

Donde:

ZS Profundidad desarrollada (pies).

DS Predicción de la inclinación del agujero (más allá de los valores de las estaciones originales) (grados).

HS Predicción del azimut del agujero (más allá de los valores de las estaciones originales) (grados).

BRATE Predicción de la curva de la inclinación por cada incremento de perforación (grados/100 pies).

TRATE Predicción de la curvatura del azimut por cada incremento de perforación (grados/100 pies).

C.4. EJEMPLO

1	20	10	30	0	1	0	1
"APAREJO No. 9 6500 - 6800 pies"							
35200.00	15.00	13.00	0.00	15.00	135.00	0.015	0.00
	12.00			0.30			
25	5.00	8.25	2.8125	0.30			
	2.00	12.00					
2	6.00	8.00	2.8125	0.30			
2	6.00	8.00	2.8125	0.30			
25	5.00	8.25	2.8125	0.30			
	2.00	12.00					
2	10.00	8.00	2.8125	0.30			
2	10.00	8.00	2.8125	0.30			
25	5.00	8.25	2.8125	0.30			
	2.00	12.00					
2	10.00	8.00	2.8125	0.30			
2	10.00	8.00	2.8125	0.30			
2	10.00	8.00	2.8125	0.30			
25	5.00	8.25	2.8125	0.30			
	2.00	12.00					

PROFUNDIDAD (pies)	ÁNGULO DE INCLINACIÓN (grados)	
	ISOTRÓPICO	ANISOTRÓPICO
6,000	3.00	3.00
6,500	3.00	3.00
6,510	3.00	3.02
6,520	3.00	3.04
6,530	3.00	3.05
6,540	3.00	3.07
6,550	3.00	3.09
6,560	3.00	3.10
6,570	3.00	3.12
6,580	3.00	3.14
6,590	2.99	3.15
6,600	2.99	3.17
6,610	2.99	3.19
6,620	2.99	3.21
6,630	2.99	3.22
6,640	2.99	3.24
6,650	2.98	3.25
6,660	2.97	3.26
6,670	2.97	3.28
6,680	2.97	3.29
6,690	2.97	3.31
6,700	2.97	3.33
6,710	2.97	3.35
6,720	2.97	3.36
6,730	2.97	3.38
6,740	2.97	3.40
6,750	2.97	3.41
6,760	2.97	3.43
6,770	2.97	3.45
6,780	2.96	3.46
6,790	2.96	3.48
6,800	2.96	3.50

APÉNDICE D
GRÁFICAS DE LA DESVIACIÓN DEL POZO CONTRA
PROFUNDIDAD DE LOS APAREJOS DE FONDO
UTILIZADOS EN EL POZO: NAZARETH 1.

En este apéndice se presentan los resultados de la desviación del agujero, obtenidos a partir del simulador y posteriormente son comparados con los resultados reales de campo, con base en el registro de desviación-calibración.

APAREJO No. 1

1,320 - 1,980 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

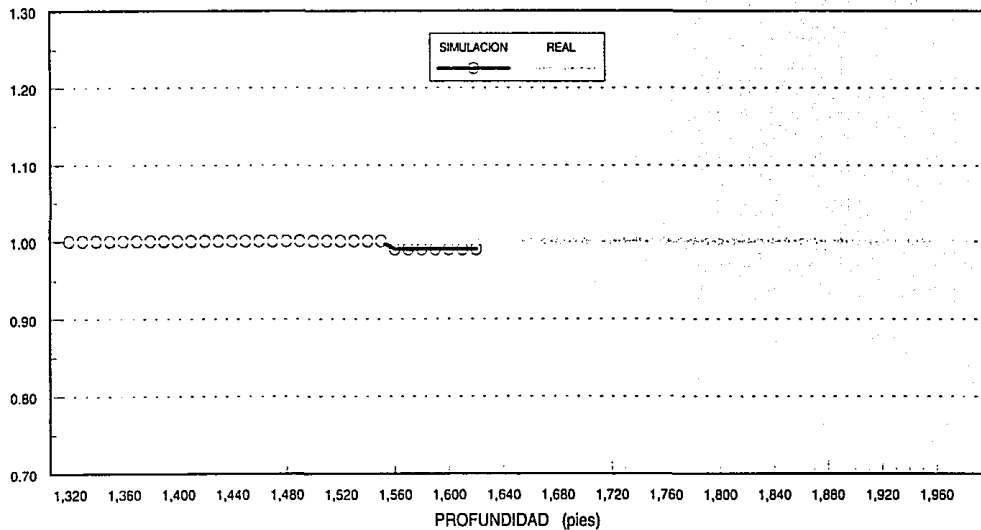


Figura D1

APAREJO No. 2

1,980 - 2,300 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

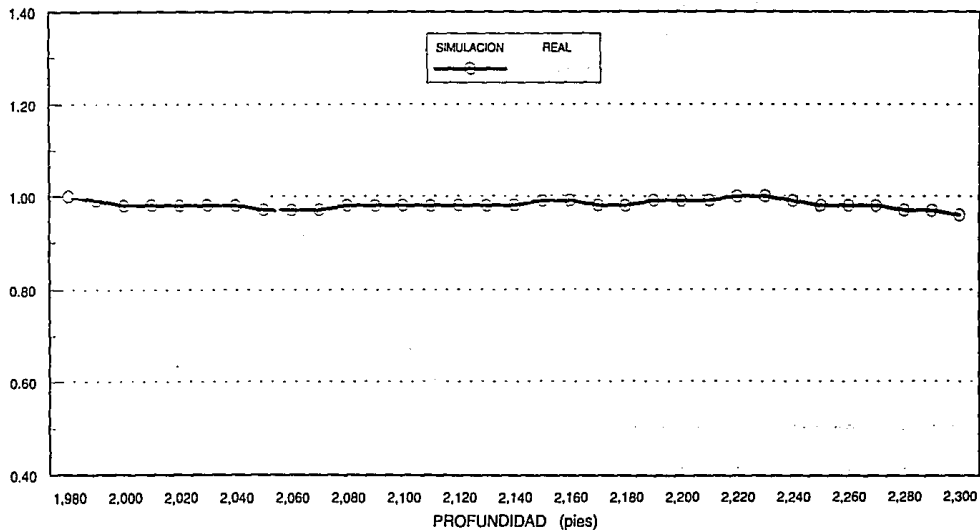


Figura D2

APAREJO No. 3

2,300 - 2,710 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

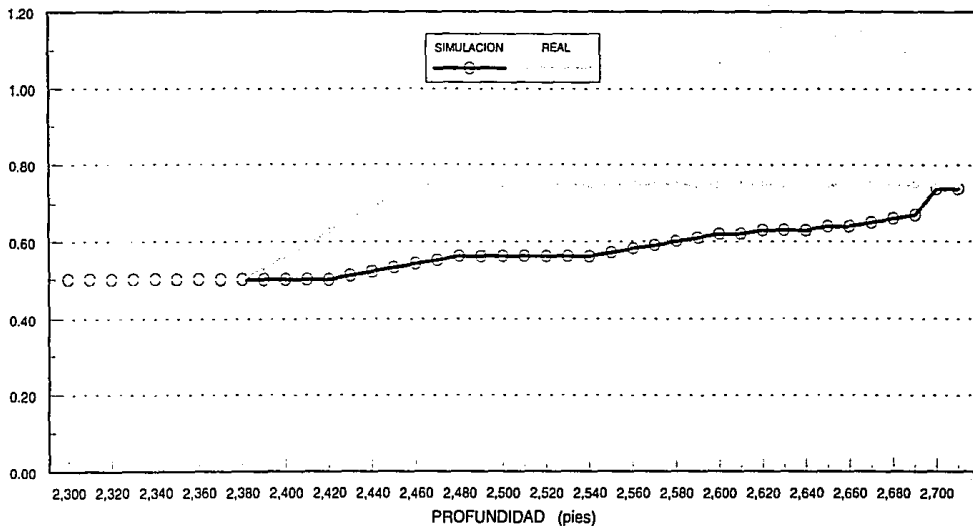


Figura D3

APAREJO No. 4

2,710 - 2,970 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

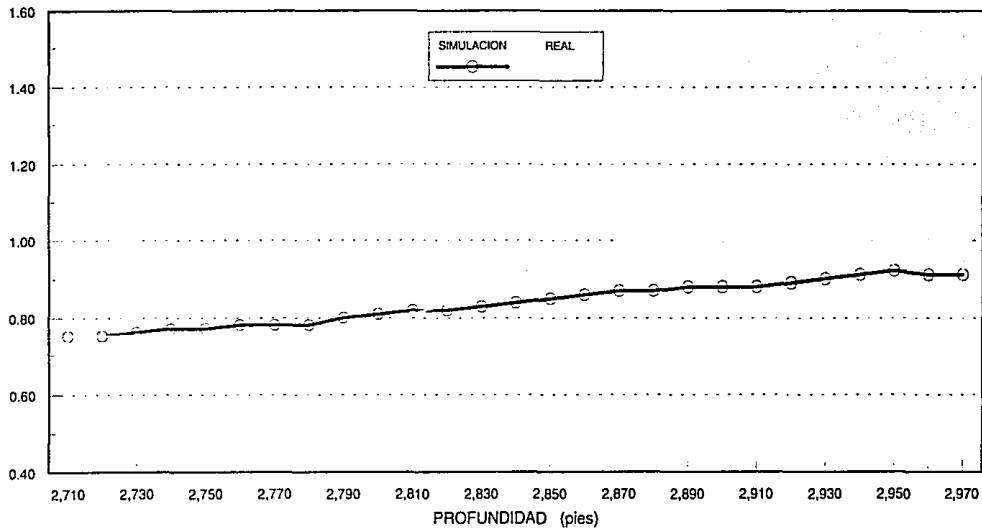


Figura D4

APAREJO No. 5

2,970 - 3,190 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

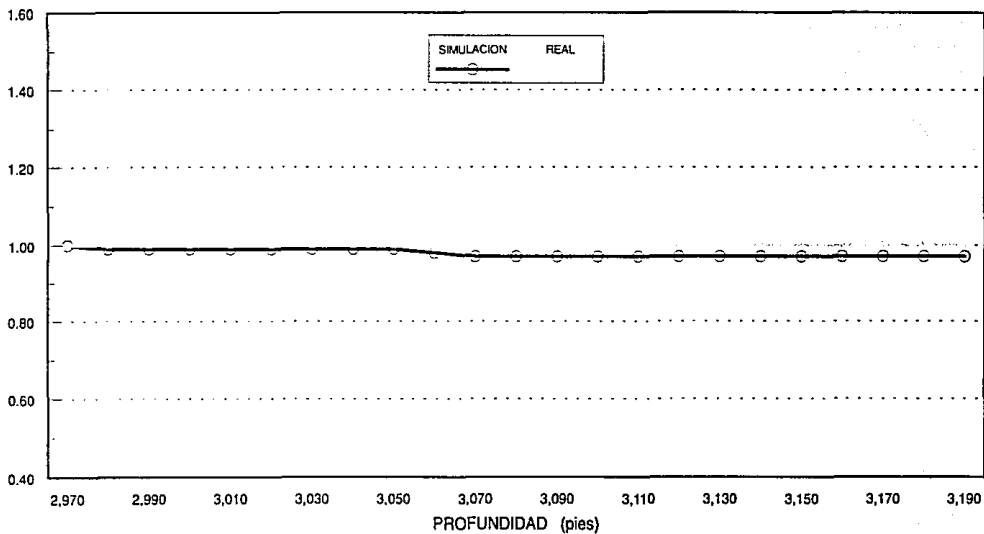


Figura D5

APAREJO No. 6

3,190 - 3,910 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

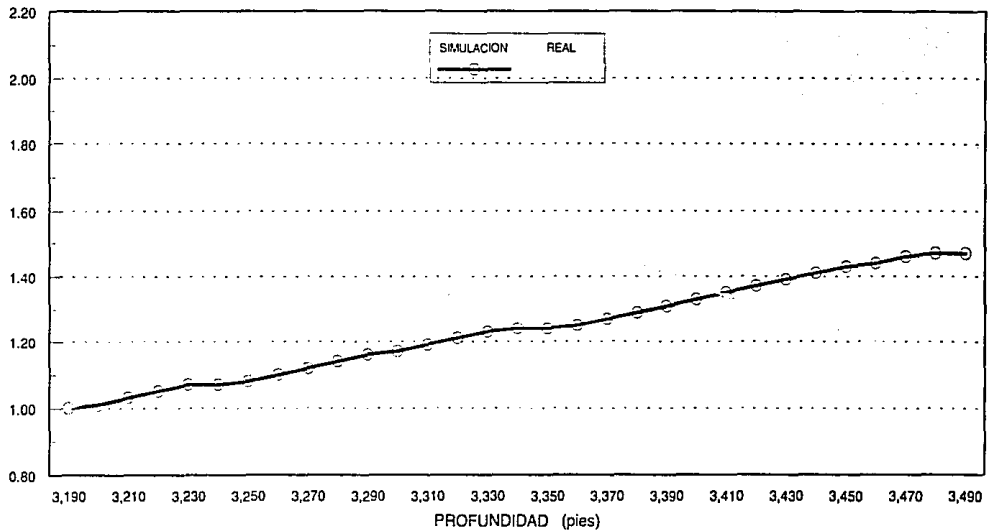


Figura D6

APAREJO No. 7

3,910 - 4,100 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

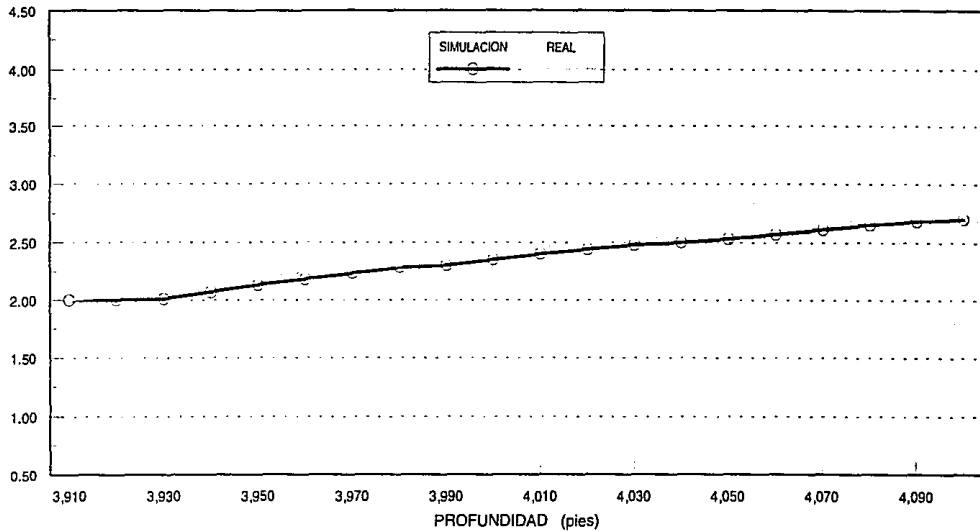


Figura D7

APAREJO No. 8

4,170 - 4,650 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

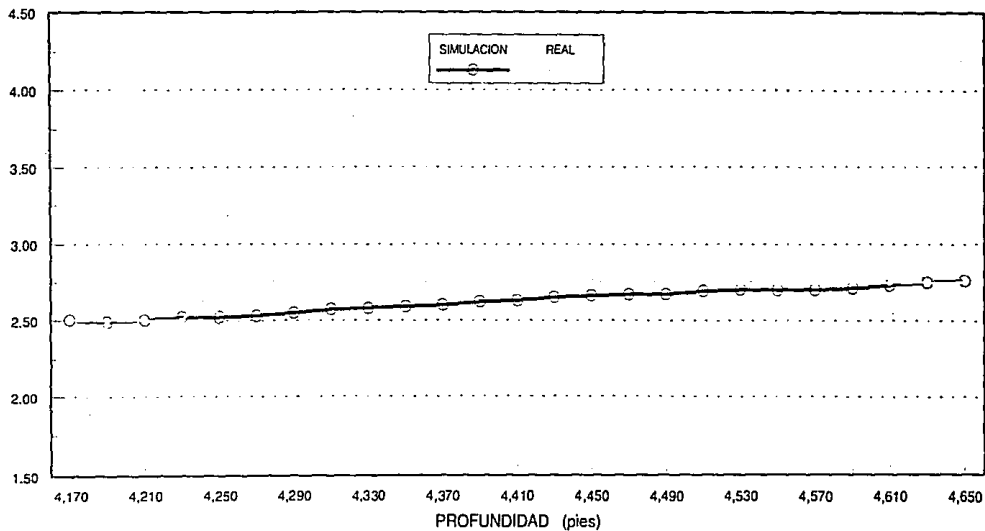


Figura D8

APAREJO No. 9

4,650 - 5,500 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

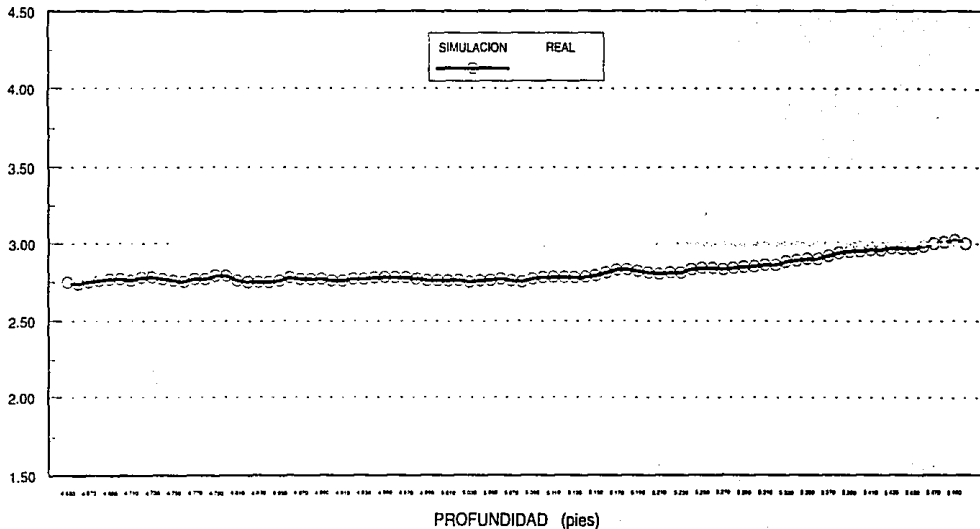


Figura D9

APAREJO No. 10

5,500 - 5,760 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

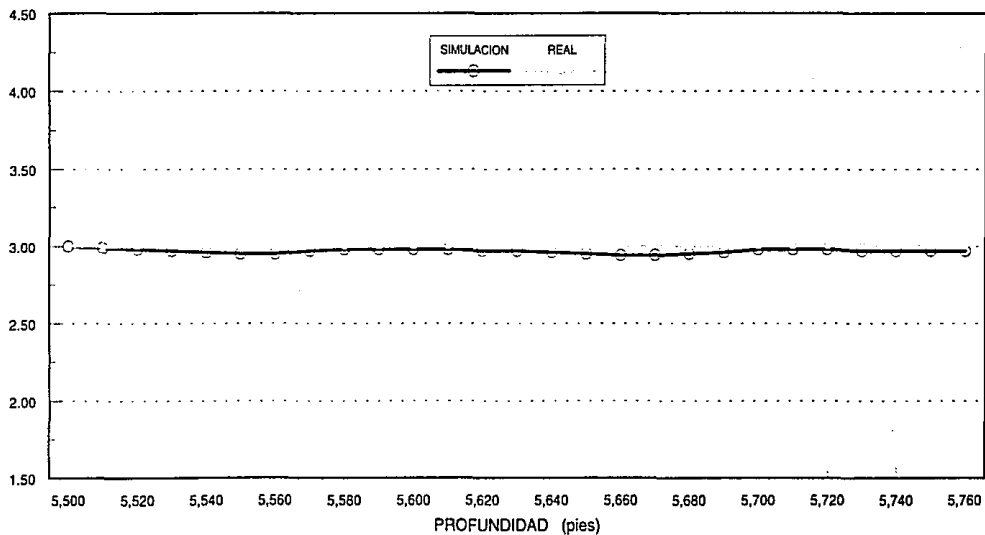


Figura D10

APAREJO No. 11

5,760 - 5,960 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

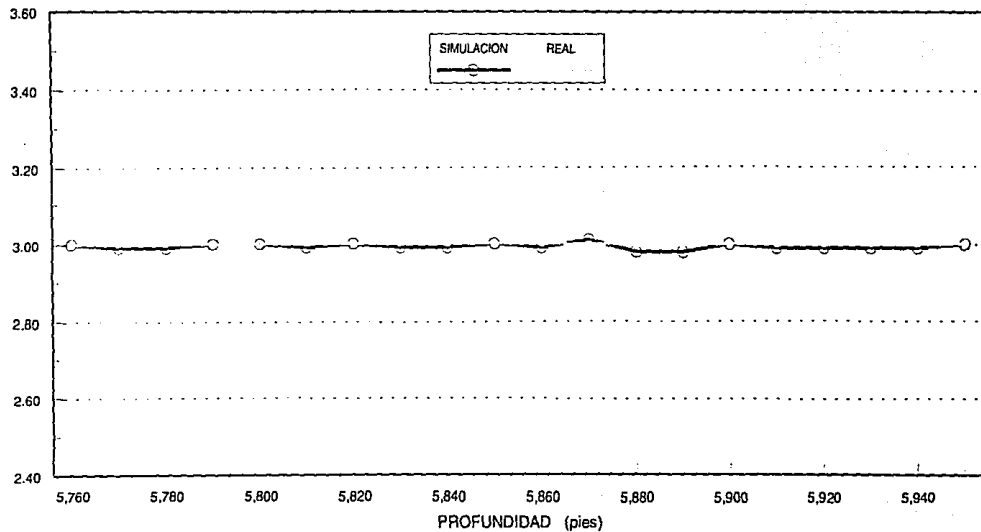


Figura D11

APAREJO No. 12

5,950 - 6,840 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

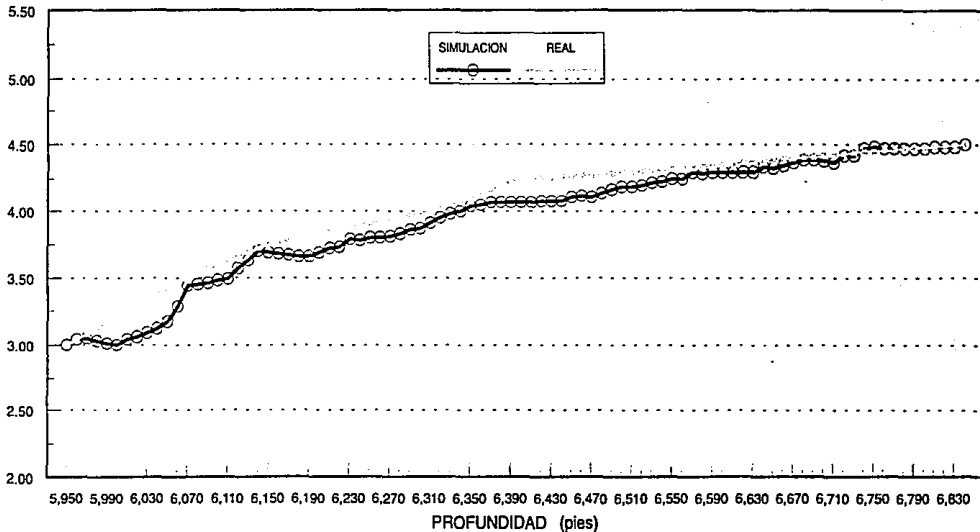


Figura D12

APAREJO No. 13

6,840 - 8,100 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

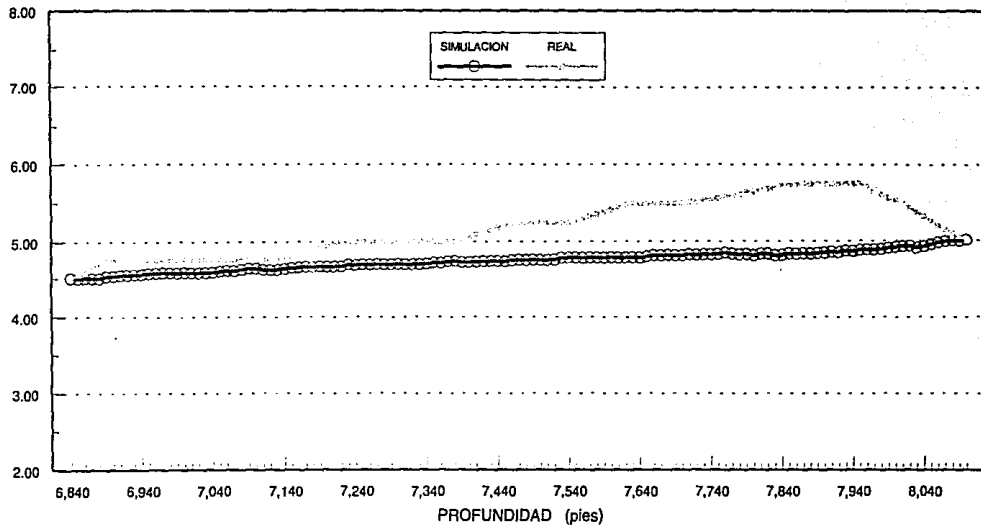


Figura D13

APAREJO No. 14

8,160 - 8,470 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

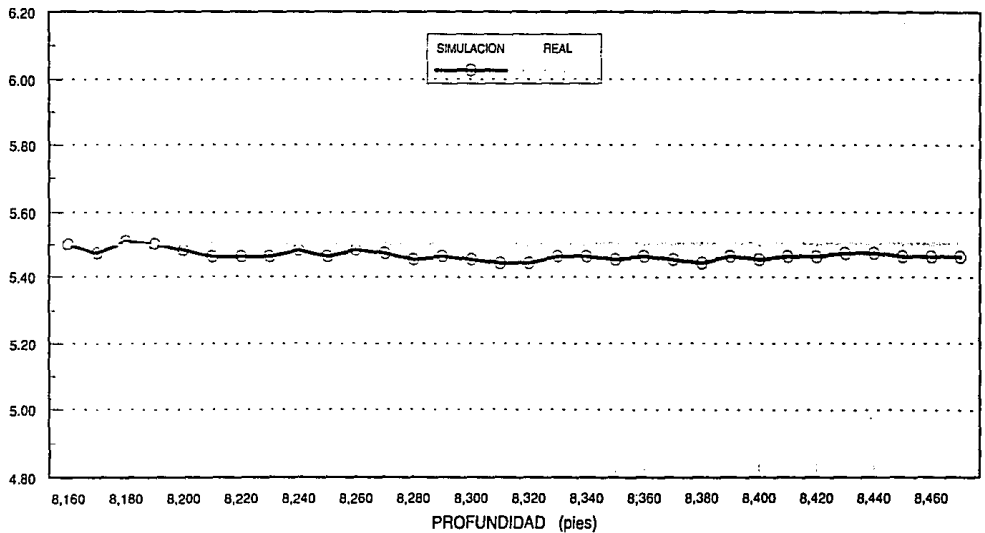


Figura D14

APAREJO No. 15

8,470 - 8,750 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

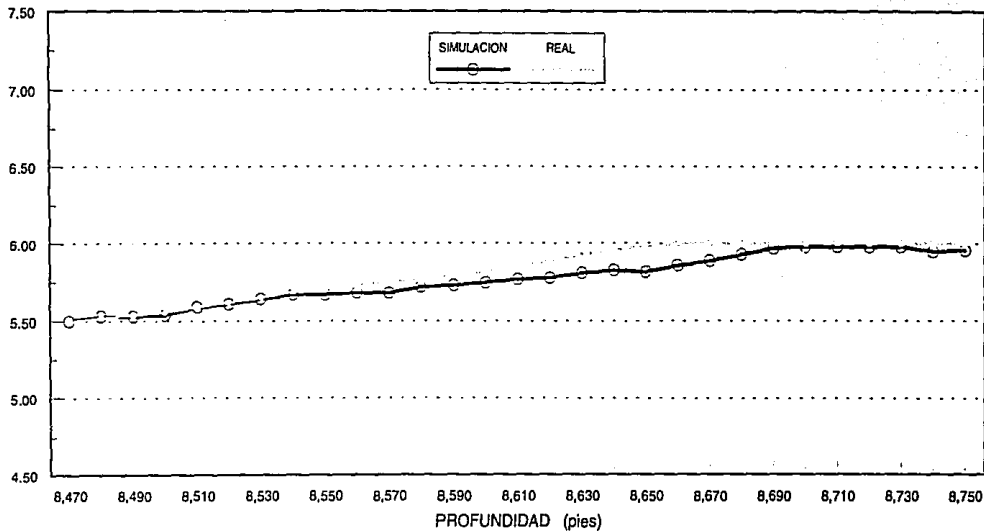


Figura D15

APAREJO No. 16

8,750 - 9,050 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

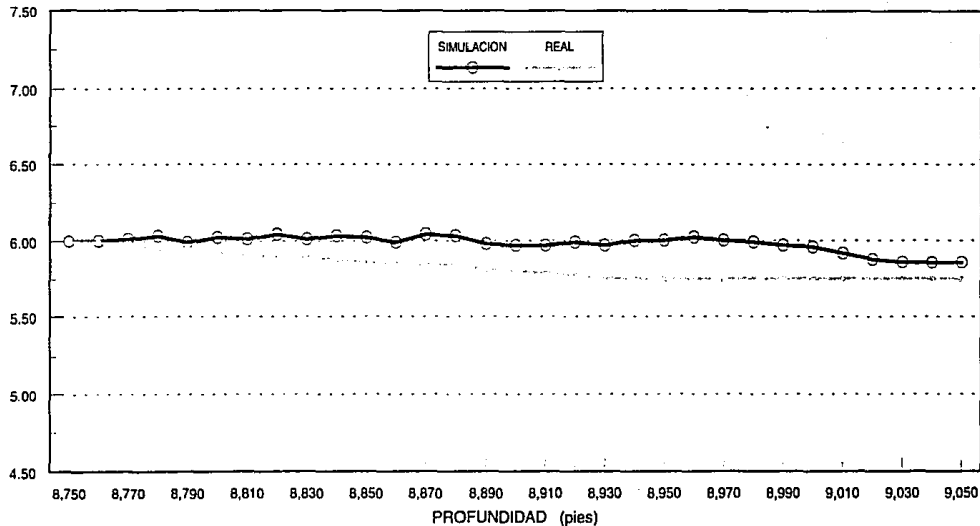


Figura D16

APAREJO No. 17

9,050 - 9,240 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

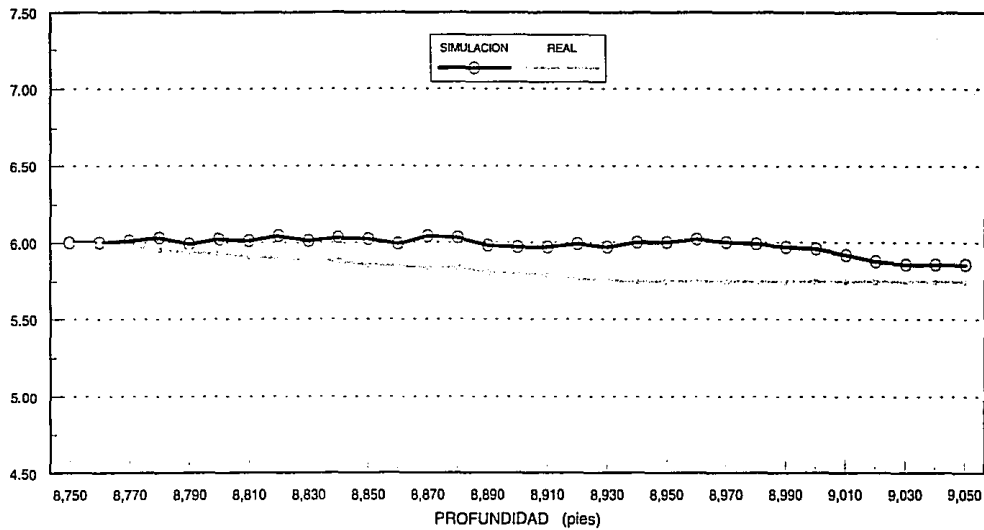


Figura D17

APAREJO No. 18

9,240 - 10,600 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

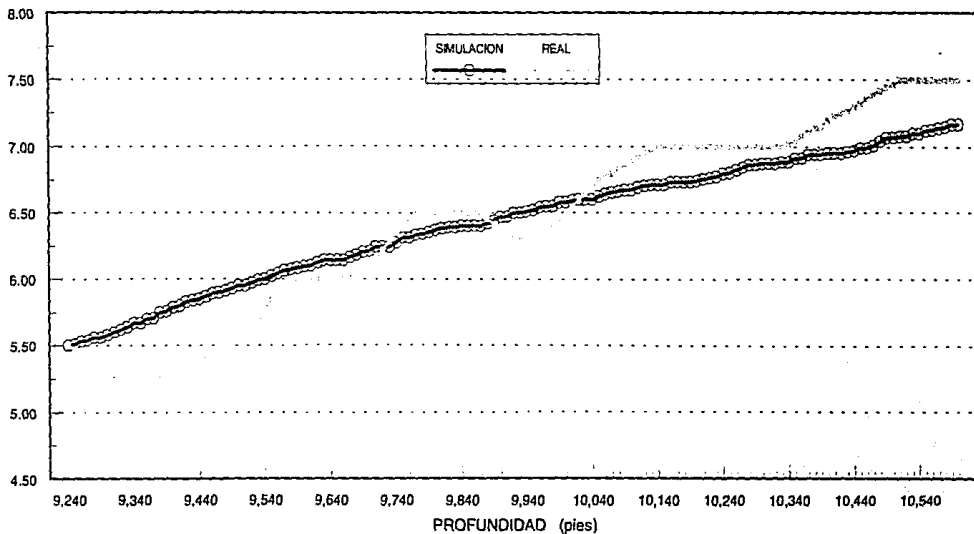


Figura D18

APAREJO No. 19

10,600 - 11,370 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

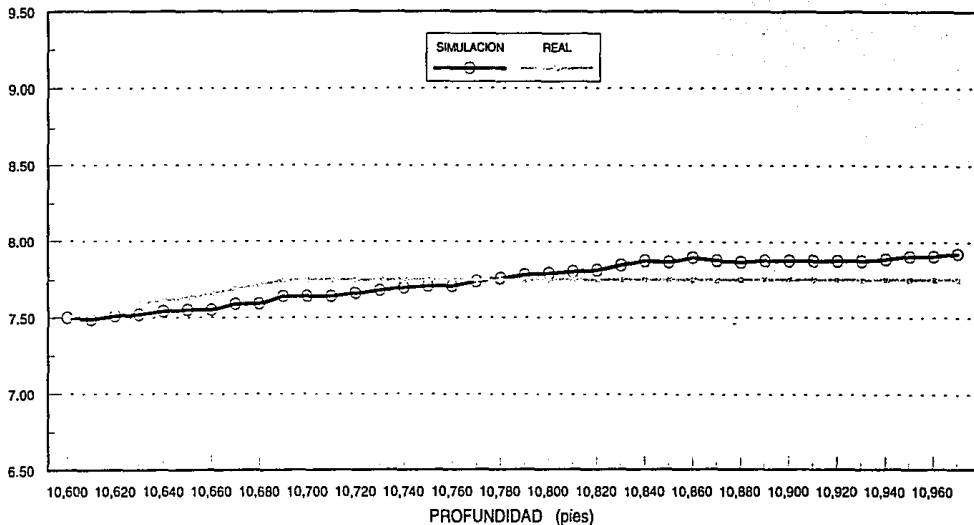


Figura D19

APAREJO No. 20

11,420 - 11,960 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

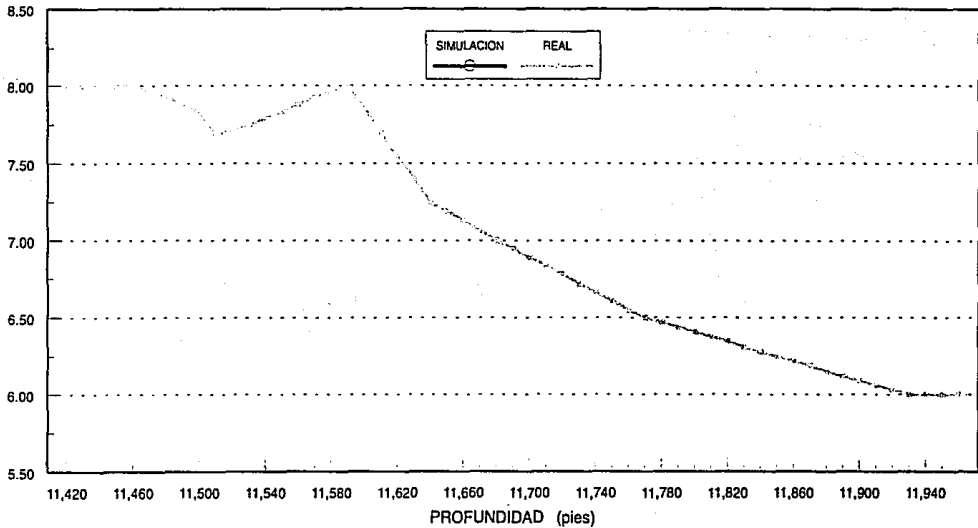


Figura D20

APAREJO No. 21

11,970 - 12,580 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

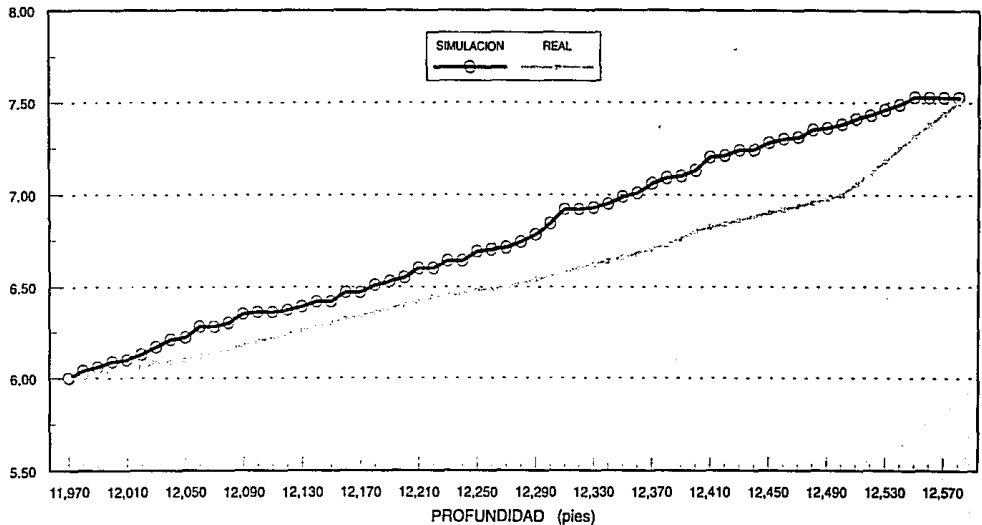


Figura D21

APAREJO No. 22

12,580 - 13,450 pies

ANGULO DE INCLINACION (grados)

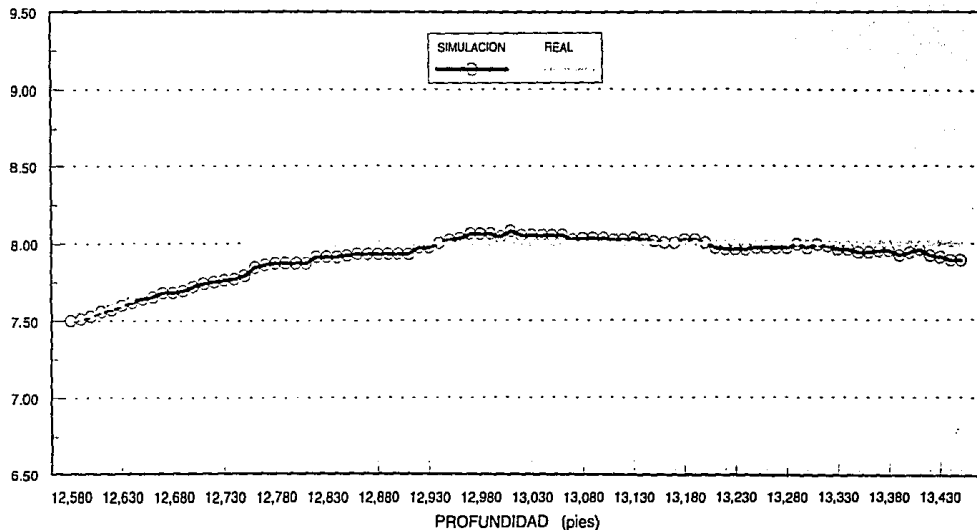


Figura D22

APÉNDICE E
APAREJOS DE FONDO UTILIZADOS EN EL POZO:
NAZARETH 1.

En este apéndice se presentan los dibujos de los veintidós aparejos de fondo, en los cuales se incluyen la descripción de la configuración de cada uno de ellos, el intervalo que perforó, el ángulo inicial y final que se obtuvo con base en el registro de desviación-calibración, condiciones de operación tales como el peso sobre la barrena y densidad del fluido de perforación; así como las condiciones geológicas de acuerdo con la interpretación del registro de echados.

APAREJO DE FONDO No. 1

INTERVALO = 1320 - 1980 pies
= 403 - 603 m

PSB = 13,200 lb
DENSIDAD = 0.010 lb/gal
ECHADO = 9°

ANGULO INICIAL = 1°
ANGULO FINAL = 1°



3 lastrabarreras normales de 9 1/2"

estabilizador de 17 1/2"

3 lastrabarreras normales de 9 1/2"

estabilizador de 17 1/2"

2 lastrabarrena normal de 9 1/2"

estabilizador de 17 1/2"

lastrabarrena corto de 9 1/2"

portabarrena - estabilizador de 17 1/2"

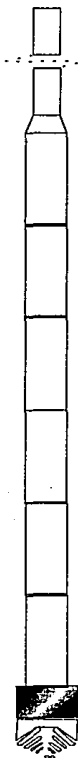
barrena de 17 1/2"

FIGURA No. E1

APAREJO DE FONDO No. 2

INTERVALO = 1980 - 2300 pies
= 603 - 700 m
ANGULO INICIAL = 1°
ANGULO FINAL = 0.30°

PSB = 13,200 lb
DENSIDAD = 0.010 lb/gal
ECHADO = 5°



6 lastrabarreras normales de 8"

6 lastrabarrena normal de 9 1/2"

portabarrena - estabilizador de 17 1/2"

barrena de 17 1/2"

FIGURA No. E2

APAREJO DE FONDO No. 3

INTERVALO = 2300 - 2710 pies

= 700 - 826 m

ANGULO INICIAL = 0.30°

ANGULO FINAL = 0.45°

PSB = 19,800 lb

DENSIDAD = 0.010 lb/gal

ECHADO = 4°



6 lastrarbarrenas normales de 8"

2 lastrarbarrenas normales de 9 1/2"

estabilizador de 17 1/2"

lastrarbarrena normal de 9 1/2"

estabilizador de 17 1/2"

lastrarbarrena corto de 9 1/2"

portabarrena - estabilizador de 17 1/2"

barrena de 17 1/2"

FIGURA No. E3

APAREJO DE FONDO No. 4

INTERVALO = 2710 - 2970 pies

= 826 - 905 m

ANGULO INICIAL = 0.45°

ANGULO FINAL = 1°

PSB = 13,200 lb

DENSIDAD = 0.010 lb/gal

ECHADO = 25°



6 lastrabarrenas normales de 8"

2 lastrabarrenas normales de 9 1/2"

estabilizador de 17 1/2"

lastrabarrena normal de 9 1/2"

estabilizador de 17 1/2"

lastrabarrena corto de 9 1/2"

portabarrena - estabilizador de 17 1/2"

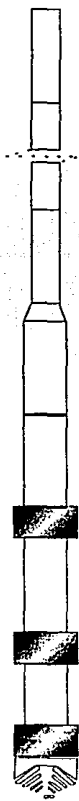
barrena de 17 1/2"

FIGURA No. E4

APAREJO DE FONDO No. 5

INTERVALO = 2970 - 3190 pies
= 905 - 973 m
ANGULO INICIAL = 1°
ANGULO FINAL = 1°

PSB = 13,200 lb
DENSIDAD = 0.010 lb/gal
ECHADO = 9°



6 lastrarbarrenas normales de 8"

2 lastrarbarrenas normales de 9 1/2"

estabilizador de 17 1/2"

lastrarbarrena normal de 9 1/2"

estabilizador de 17 1/2"

lastrarbarrena corto de 9 1/2"

portabarrena - estabilizador de 17 1/2"

barrena de 17 1/2"

FIGURA No. E5

APAREJO DE FONDO No. 6

INTERVALO = 3190 - 3910 pies

= 973 - 1192 m

PSB = 13,200 lb

DENSIDAD = 0.010 lb/gal

ANGULO INICIAL = 1°

ANGULO FINAL = 2°

ECHADO = 9°



6 lastrarbarrenas normales de 8"

2 lastrarbarrenas normales de 9 1/2"

estabilizador de 17 1/2"

lastrarbarrena normal de 9 1/2"

estabilizador de 17 1/2"

lastrarbarrena corto de 9 1/2"

portabarrena - estabilizador de 17 1/2"

barrena de 17 1/2"

FIGURA No. E6

APAREJO DE FONDO No. 7

INTERVALO = 3910 - 4100 pies
= 1192 - 1250 m
ANGULO INICIAL = 2°
ANGULO FINAL = 2.45°

PSB = 17,600 lb
DENSIDAD = 0.010 lb/gal
ECHADO = 4°



6 lastrarbarrenas normales de 8"

2 lastrarbarrenas normales de 9 1/2"

estabilizador de 17 1/2"

lastrarbarrena normal de 9 1/2"

estabilizador de 17 1/2"

lastrarbarrena corto de 9 1/2"

portabarrena - estabilizador de 17 1/2"

barrena de 17 1/2"

FIGURA No. E7

APAREJO DE FONDO No. 8

INTERVALO = 4170 - 4650 pies

= 1270 - 1419 m

ANGULO INICIAL = 0.30°

ANGULO FINAL = 0.75°

PSB = 22,000 lb

DENSIDAD = 0.010 lb/gal

ECHADO = 8°



11 lastrabarrenas normales de 8"

estabilizador de 12"

lastrabarrena normal de 8"

estabilizador de 12"

lastrabarrena corto de 8"

portabarrena - estabilizador de 12"

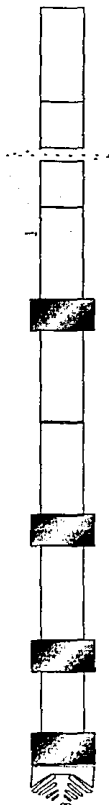
barrena de 12"

FIGURA No. E8

APAREJO DE FONDO No. 9

INTERVALO = 4650 - 5500 pies
= 1419 - 1676 m
ANGULO INICIAL = 2,45°
ANGULO FINAL = 3,00°

PSB = 17,000 lb
DENSIDAD = 0,010 lb/gal
ECHADO = 11°



9 lastrarbarrenas normales de 8"

estabilizador de 12"

2 lastrarbarrenas normales de 8"

estabilizador de 12"

lastrarbarrena normal de 8"

estabilizador de 12"

lastrarbarrena corto de 8"

portabarrena - estabilizador de 12"

barrena de 12"

FIGURA No. E9

APAREJO DE FONDO No. 10

INTERVALO = 5500 - 5760 pies

= 1676 - 1757 m

ANGULO INICIAL = 3.00°

ANGULO FINAL = 3.00°

PSB = 17,600 lb

DENSIDAD = 0.010 lb/gal

ECHADO = 5°



estabilizador de 12"



estabilizador de 12"

lastrabarrena normal de 8"



portabarrena de 8"

barrena de 12"

FIGURA No. E10

APAREJO DE FONDO No. 11

INTERVALO = 5760 - 5950 pies
= 1757 - 1815 m

ANGULO INICIAL = 3°

ANGULO FINAL = 3°

PSB = 11,000 lb

DENSIDAD = 0.010 lb/gal

ECHADO = 3°

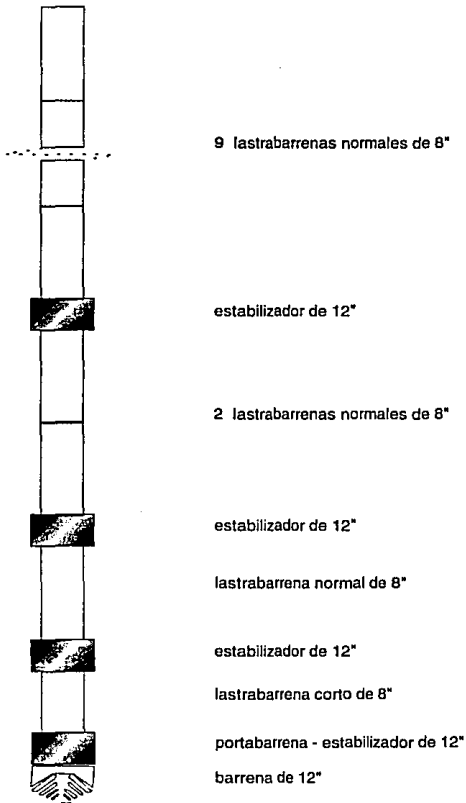


FIGURA No. E11

APAREJO DE FONDO No. 12

INTERVALO = 5950 - 6840 pies
= 1815 - 2086 m

PSB = 13,200 lb
DENSIDAD = 0.010 lb/gal
ECHADO = 3°

ANGULO INICIAL = 3°
ANGULO FINAL = 4.30°

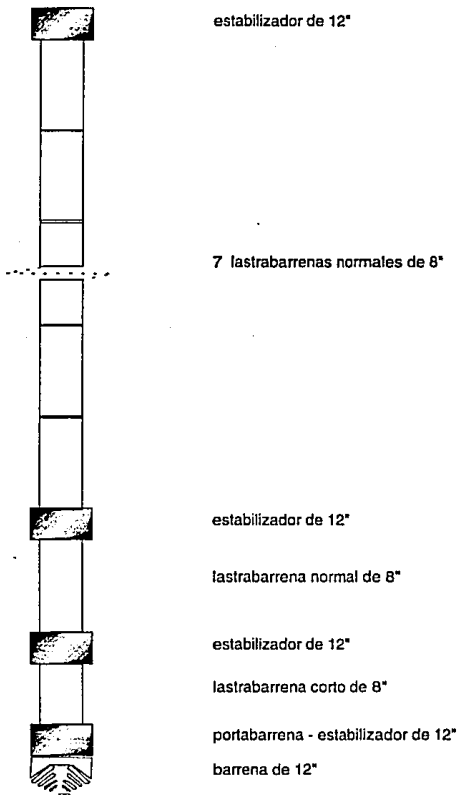


FIGURA No. E12

APAREJO DE FONDO No. 13

INTERVALO = 6840 - 8100 pies
= 2086 - 2470 m
ANGULO INICIAL = 4.30°
ANGULO FINAL = 5.00°

PSB = 17,600 lb
DENSIDAD = 0.010 lb/gal
ECHADO = 8°



estabilizador de 12"

5 lastrabarrenas normales de 8"

estabilizador de 12"

lastrabarrena normal de 8"

estabilizador de 12"

lastrabarrena corto de 8"

portabarrena - estabilizador de 12"

barrena de 12"

FIGURA No. E13

APAREJO DE FONDO No. 14

INTERVALO = 8160 - 8470 pies
= 2489 - 2581 m
ANGULO INICIAL = 5.30°
ANGULO FINAL = 5.30°

PSB = 11,000 lb
DENSIDAD = 8.66 lb/gal
ECHADO = 6°

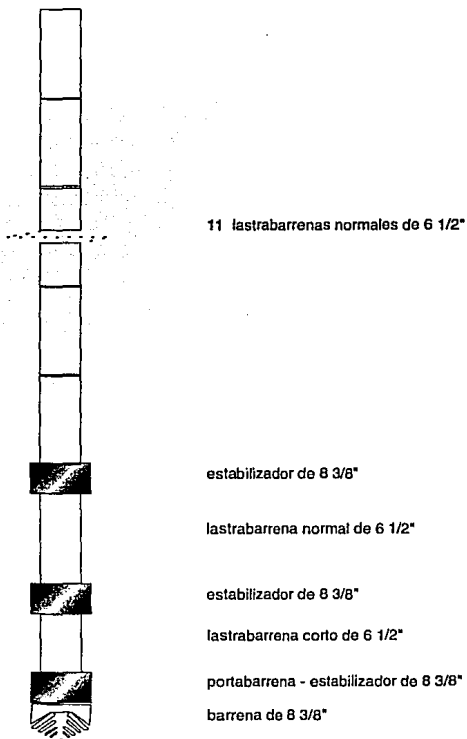
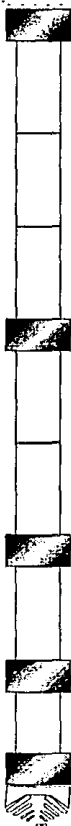


FIGURA No. D14

APAREJO DE FONDO No. 15

INTERVALO = 8470 - 8750 pies
= 2581 - 2669 m
ANGULO INICIAL = 5.30°
ANGULO FINAL = 6.00°

PSB = 11,000 lb
DENSIDAD = 8.66 lb/gal
ECHADO = 7°



6 lastrabarrenas normales de 6 1/2"
estabilizador de 8 3/8"

3 lastrabarrenas normales de 6 1/2"

estabilizador de 8 3/8"

2 lastrabarrenas normales de 6 1/2"

estabilizador de 8 3/8"

lastrabarrena normal de 6 1/2"

estabilizador de 8 3/8"

lastrabarrena corto de 6 1/2"

portabarrena - estabilizador de 8 3/8"
barrena de 8 3/8"

FIGURA No. D15

APAREJO DE FONDO No. 16

INTERVALO = 8750 - 9050 pies

= 2669 - 2760 m

PSB = 11,000 lb

DENSIDAD = 8.91 lb/gal

ECHADO = 8°

ANGULO INICIAL = 6.00°

ANGULO FINAL = 5.45°



3 lastrarbarrenas normales de 6 1/2"
estabilizador de 8 3/8"



3 lastrarbarrenas normales de 6 1/2"



estabilizador de 8 3/8"



2 lastrarbarrenas normales de 6 1/2"



estabilizador de 8 3/8"



lastrarbarrena corto de 6 1/2"



estabilizador de 8 3/8"



lastrarbarrena normal de 6 1/2"



portabarrena - estabilizador de 8 3/8"



barrena de 8 3/8"

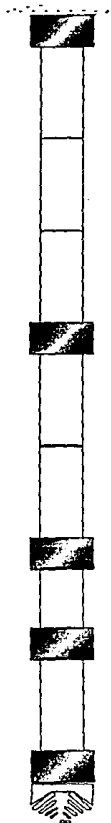


FIGURA No. D16

APAREJO DE FONDO No. 17

INTERVALO = 9050 - 9240 pies
= 2760 - 2818 m
ANGULO INICIAL = 5.45°
ANGULO FINAL = 5.30°

PSB = 15,400 lb
DENSIDAD = 9.16 lb/gal
ECHADO = 9°



6 lastrabarrenas normales de 6 1/2"
estabilizador de 8 3/8"

3 lastrabarrenas normales de 6 1/2"

estabilizador de 8 3/8"

2 lastrabarrenas normales de 6 1/2"

estabilizador de 8 3/8"

lastrabarrena corto de 6 1/2"

estabilizador de 8 3/8"

lastrabarrena normal de 6 1/2"

portabarrena - estabilizador de 8 3/8"

barrena de 8 3/8"

FIGURA No. D17

APAREJO DE FONDO No. 18

INTERVALO = 9240 - 10600 pies

= 2818 - 3231 m

PSB = 17,600 lb

DENSIDAD = 9.16 lb/gal

ANGULO INICIAL = 5.30°

ECHADO = 10°

ANGULO FINAL = 7.30°



6 lastrarbarrenas normales de 6 1/2"
estabilizador de 8 3/8"

3 lastrarbarrenas normales de 6 1/2"

estabilizador de 8 3/8"

2 lastrarbarrenas normales de 6 1/2"

estabilizador de 8 3/8"

lastrarbarrenas normal de 6 1/2"

estabilizador de 8 3/8"

lastrarbarrenas corto de 6 1/2"

portabarrena - estabilizador de 8 3/8"

barrena de 6 1/2"

FIGURA No. D18

APREJO DE FONDO No. 20

INTERVALO = 11420 - 11960 pies

= 3482 - 3645 m

PSB = 4,400 lb

DENSIDAD = 9.75 lb/gal

ECHADO = 9°

ANGULO INICIAL = 8°

ANGULO FINAL = 6°

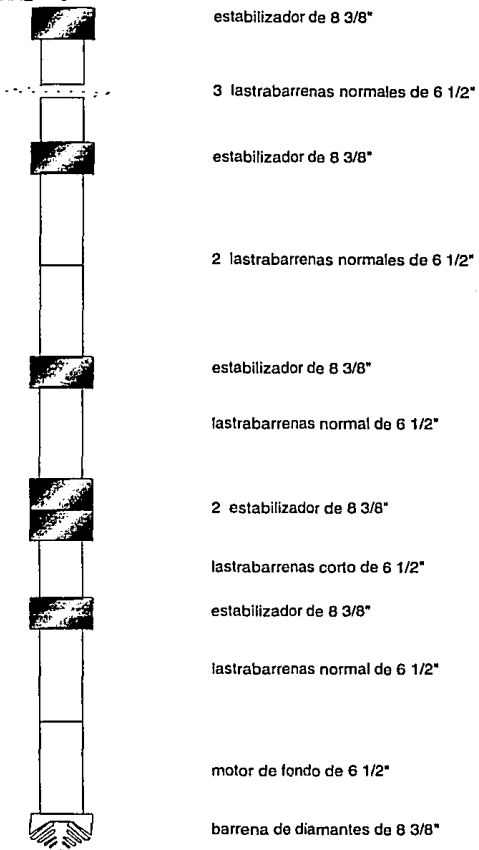


FIGURA No. D20

APAREJO DE FONDO No. 21

INTERVALO = 11970 - 12580 pies
= 3650 - 3834 m
ANGULO INICIAL = 6°
ANGULO FINAL = 7.3°

PSB = 11,000 lb
DENSIDAD = 9.75 lb/gal
ECHADO = 9°

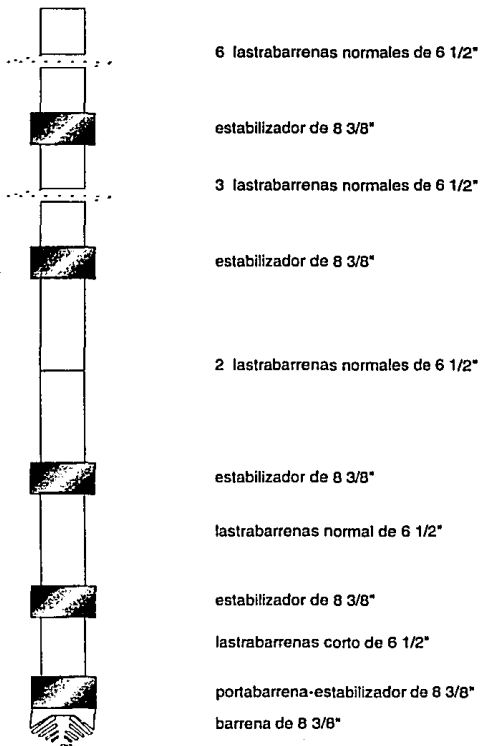


FIGURA No. D21

APAREJO DE FONDO No. 22

INTERVALO = 12580 - 13450 pies

= 3834 - 4100 m

ANGULO INICIAL = 7.30°

ANGULO FINAL = 8.00°

PSB = 17,600 lb

DENSIDAD = 10.33 lb/gal

ECHADO = 9°

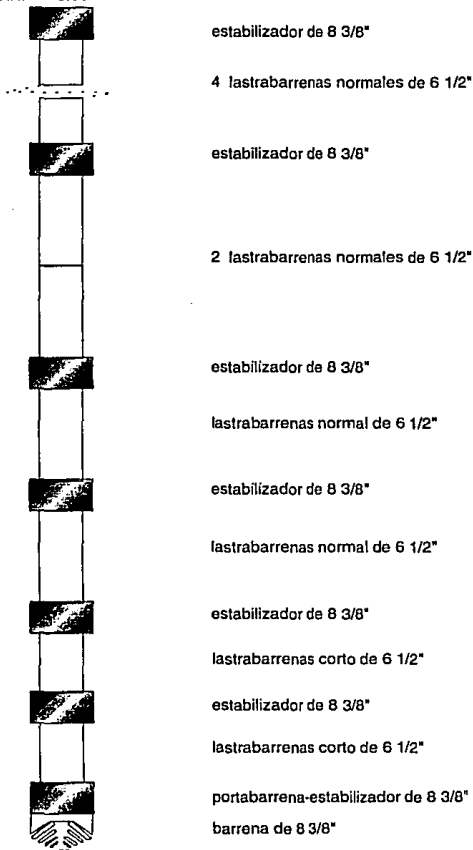


FIGURA No. D22