

15



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**SIMULADOR DE APAREJOS DE FONDO PARA
LA PERFORACION DIRECCIONAL**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A N :

HERNANDEZ CORTES JUAN GABRIEL

RODRIGUEZ AMARO NESTOR

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. JOAQUIN MENDIOLA SANCHEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA,

ENERO 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

TEMA DE TESIS:

SIMULADOR DE APAREJOS DE FONDO
PARA LA PERFORACION DIRECCIONAL

DIRECTOR:

M.I. JOAQUIN MENDIOLA SANCHEZ

PRESENTAN:

HERNANDEZ CORTES JUAN GABRIEL
RODRIGUEZ AMARO NESTOR

JURADO:

PRESIDENTE: ING. SALVADOR MACIAS HERRERA

VOCAL: M.I. JOAQUIN MENDIOLA SANCHEZ

SECRETARIO: M.I. JOSE MARTINEZ PEREZ

1ER. SPTE.: ING. JESUS RODRIGUEZ ROMAN

2DO. SPTE.: M.I NESTOR MARTINEZ ROMERO



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-867

SR. JUAN GABRIEL HERNANDEZ CORTES

Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. I. Joaquín Mendiola Sánchez y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero

SIMULADOR DE APAREJOS DE FONDO PARA LA PERFORACION DIRECCIONAL

- I INTRODUCCION
 - II ASPECTOS TEORICOS
 - III ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL SIMULADOR
 - IV VALIDACION DEL SIMULADOR
 - V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, a 10 de julio del 2000

EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-1075

SR. NESTOR RODRIGUEZ AMARO
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. I. Joaquín Mendiola Sánchez y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

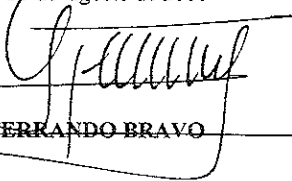
SIMULADOR DE APAREJOS DE FONDO PARA LA PERFORACION DIRECCIONAL

- I INTRODUCCION**
- II ASPECTOS TEORICOS**
- III ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL SIMULADOR**
- IV VALIDACION DEL SIMULADOR**
- V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 30 de agosto de 2000
EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

pp

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Ana Cortés Ramírez y Gabriel Hernández Fernández por haberme dado la vida, por apoyarme aun sin estar de acuerdo en algunas de mis decisiones y soportarme durante tantos años; así como por todos sus consejos que me sirvieron para no darme por vencido hasta alcanzar mis metas, con respeto y admiración, simplemente gracias. LOS QUIERO MUCHO.

A mis hermanos Felipa, Jorge, Ana Gabriela y Oscar Omar. Los primeros por haber crecido juntos y compartir tantos recuerdos que aunque algunos fueron buenos y otros malos nos permitieron fortalecer el vínculo de cariño y respeto mutuo; a los dos mas pequeños por permitirme recordar mi niñez al verlos crecer y participar de todos sus triunfos, así como de sus pequeños "grandes" problemas que comparten conmigo y me permiten ayudarlos y aconsejarlos para que logren sus metas y sean mejores cada vez.

A mis sobrinos Jorge Alberto, Ana Laura, Juan Carlos y Eduardo por compartir sus juegos tanto con mis hermanos como conmigo y formar una familia unida.

A mi alma mater la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO por permitirme ser miembro d la comunidad universitaria y darme la oportunidad de desarrollarme tanto personal como profesionalmente gracias a los conocimientos adquiridos en las aulas de la FACULTAD DE INGENIERIA.

Al M. en I. Joaquín Mendiola Sánchez por su amistad, confianza y ayuda para la elaboración de esta tesis

A los ingenieros del Instituto Mexicano del Petróleo porque su amistad y camaradería hacen de la convivencia en el instituto más fácil y alegre. Ing. Elíseo Alvarez, Dr. Daniel García Gavito, Ing. Gustavo Gutiérrez, Ing. José Luis Cazares, Ing. J. Antonio Morales, Ing. Rodolfo Rodríguez, Ing. José A. Ortiz, M.I. Mario García, M.I. Alonso Platas.

A los compañeros y amigos con los cuales compartí la estancia en la Facultad de Ingeniería y de los cuales aprendí algo de cada uno, espero que sigamos siendo amigos por muchos años más. Alberto García, Víctor Negrete, Hipolito Lara, Armando Pichardo, Néstor Rodríguez, Silvino García, Virginia Luna, Silvia Clemente, Gabriela Araiza.

Juan G. Hernández Cortés

DEDICATORIA

A mi madre.

A la mujer que me dio la vida, amor, cariño y todo tipo de comprensiones a mis faltas y errores. A esa mujer que con todas las dificultades que tuvo que pasar durante los años de mi estudio, nunca dejó de apoyarme para terminar mi carrera. Gracias mamá este logro es tuyo te quiero.

A mi padre.

A ti que me has mostrado el valor del trabajo y el respeto, siempre con ejemplos me enseñaste lo valioso de la vida. Esos días de trabajo juntos no los quiero olvidar. Gracias papá te quiero, admiro y respeto.

GRACIAS VIEJOS.

NÉSCOR RODRÍGUEZ AMARO

AGRADECIMIENTOS

A mi País, Los Estados Unidos Mexicanos, Por que creo en ti y en la EDUCACION PUBLICA.
A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO. MI ALMA MATER.
A LA FACULTAD DE INGENIERIA. Por la educación que recibí de sus aulas.
AL INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO. Por todas las facilidades que me dio para la realización de esta tesis.
A PETROLEOS MEXICANOS. Por darme todas las atenciones en la realización de mis practicas.
A MIS MAESTROS DE LA FACULTAD. Que me enseñaron lo mejor de sus conocimientos.
AL ING. Joaquín mendiola S. Por su amistad, confianza, por dirigirme esta tesis y tenerme tanta paciencia. "Que acción cuando vas a venir" GRACIAS.
AL ING. Eliseo alvarez Ortiz. Por sus atinados regaños y consejos.
AL ING. Rodoifo Rodríguez Arenas. Siempre estuvo dispuesto a darme asesorias.
AL ING. Mario Garcia. Gracias por tu amistad.
AL ING. Alonso Platas A. Gracias por lo que sea.
AL ING. Antonio Morales Diaz de Vivar. Por facilitarme cuanto estuvo a su alcance.
AL ING. Gustavo Gutiérrez Escobedo. Por los años compartidos.
Al Dr. Daniel García Gavito. Gracias por todo.
A MIS SINODALES. Por sus aportaciones a esta tesis.

A todos mis amigos que compartieron conmigo el fot bol americano en especial a "LOS ESCORPIONES DE INGENIERIA"
A LOS CONDORES. En especial a Alvin, tranquis y al chovy.
AL COACH Carlos Salas C. Por esa disciplina que me enseñó y que gracias a ello y entre otras cosas comprendi mejor lo que es la escuela. "el fut bol es efimero pero la escuela es su vida".

A MIS HERMANAS Y HERMANOS. A todos en especial, GRACIAS.

A TODOS Y CADA UNO DE LOS INTEGRANTES DE LA S.A.I.P. Y DE LA S.P.E. Por las experiencias vividas, y por todo lo que juntos aprendimos.

A TODOS MIS AMIGOS DE LA FACULTAD EN PARTICULAR A:

Gabriela Araiza. Por los momentos que compartimos.
Silvia Clemente. Por tu amistad sin condiciones.
Alba corona. Gracias por todo, ya vez que si trabajo
Gabriela Rocha. Gracias por tu ayuda.
Juan Hernández Por haber trabajado juanto a mi, en esta tesis.
Armando Pichardo. Por tu amistad "que no te da pena mendigar agradecimientos".
I. Samuel Trujillo. Amigos como tú no se encuentran en cualquier esquina, Por esa borrachera que siempre quisimos ponernos y que por una u otra cosa no lo hicimos. "la vida da revanchas"
A Oscar Ramírez, Adrian Álvarez, Edgar guillen (espero me disculpes). Y por supuesto a mi chavo Silvino García "NO AFLOJES".
A TODOS LOS QUE NO MENCIONO, (POR LO QUE USTEDES QUIERAN).

GRACIAS

NÉSTOR RODRÍGUEZ AMARO.

CONTENIDO

	CAPITULO	Página
I	INTRODUCCIÓN	1
II	ASPECTOS TEORICOS	4
	II 1 Introducción	4
	II 2 Principios de los aparejos de fondo	6
	II 3 Columna tubular	8
	II 4 Aparejo de fondo liso	12
	II.5 Aparejo con un estabilizador	18
	II 6 Aparejo con dos estabilizadores	23
	II 7 Mecánica básica de la sarta de perforación	27
	II 8 Modelos básicos de aparejos de fondo	28
	II.9 Modelos transicionales de aparejos de fondo	31
	II.10 Modelos actuales de aparejos de fondo	35
	II 11 Modelos para roca anisotrópica	37
	II.12 Modelos de interacción roca-barrena	42
	II.13 Modelos de barrenas de cono	42
	II 14 Acoplamiento de los modelos de iteración roca-barrena con el análisis de aparejos cuasi-estáticos	46

CAPITULO	Página
II.15 condiciones base en las pruebas preliminares de barrenas resistencia de la roca	47
II.6 Pruebas de sensibilidad de iteración roca-barrena	50
II.17 Desarrollo y teoría del modelo	50
II 17 1 Modelo de elemento finito cuasi estático	51
II.17.2 Relaciones fuerza desplazamiento	55
II17 3 Proceso de solución	60
II.18 Características del modelo	61
II.18.1 Plan de predicción de la perforación	61
II.18 2 Anisotropía	62
II.18.3 Sustitutos y cajas curvos	65
III ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL SIMULADOR	68
III 1 Introducción	68
III 2 Claro radial	71
III.3 Peso sobre barrena	74
III.4 Torque	78
III 5 Profundidad	81
III.6 Coeficiente de fricción	84
III.7 Echado de la formación	88

CAPITULO	Página
III 8 Longitud de la simulación	92
III 9 Angulo del sustituto curvo	108
III.10 Interacción roca barrena	109
IV VALIDACION DEL SIMULADOR	112
IV.1 Introducción	112
IV 2 Simulador de perforación	112
IV.3 Validación de TUIMP	113
IV.4 Comparación con otros simuladores	125
V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	127
NOMENCLATURA	129
SIMBLOS GRIEGOS	130
ABREVIATURAS	130
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	132
APENDICE A GUIA DE INSTALACION	136
A.1 Introducción	136
A.1.1 Instalación	137
A.1.2 Requerimientos de instalación	137
A.1.3 Recomendación	138
A.1.4 Proceso de instalación	141

	Página
A 2 Ejecución del programa	141
A.2 1 Cargando y almacenando datos	141
A.2.2 Edición de datos	142
A.3 Procesos y resultados	149

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Distintos Arreglos de aparejos de fondo.	6
Figura 2.2 Ejemplo de la inclinación de La barrena en un aparejo tipo péndulo.	8
Figura 2.3 Aparejo de perforación liso con una inclinación α .	9
Figura 2.4 Representación de los momentos de inercia.	9
Figura 2.5 Esfuerzo de los lastrabarrenas.	10
Figura 2.6 Tangentes para aparejos de fondo liso y con péndulo.	13
Figura 2.7 Aparejo de fondo liso con y sin carga axial.	13
Figura 2.8 Resultados para aparejos de fondo, calculados a partir de un aparejo de fondo liso.	16
Figura 2.9 Aparejo con un estabilizador.	18
Figura 2.10 Fuerza vs. Péndulo con un diámetro de agujero de $12\frac{1}{4}$ " Diámetro de lastrabarrenas de 8" y 10° de inclinación.	21
Figura 2.11 Fuerza vs. Péndulo con un diámetro de agujero de $12\frac{1}{4}$ " Diámetro de lastrabarrenas de $6\frac{1}{2}$ " y 10° de inclinación	22
Figura 2.12 Aparejo de fondo con dos estabilizadores.	23
Figura 2.13 Efecto del estabilizador en un agujero de $12\frac{1}{4}$ " 8" de lastrabarrenas y 10° de inclinación.	26
Figura 2.14 Propiedades de las rocas en tres dimensiones.	39
Figura 2.15 Idealización del aparejo de fondo.	52
Figura 2.16 Numeración del aparejo del elemento finito.	53
Figura 2.17 Condiciones de frontera (efectiva) del elemento finito.	54
Figura 2.18 Ecuaciones y términos de equilibrio expandido.	56
Figura 2.19 Notación de los miembros en tres dimensiones.	57
Figura 2.20 Transformación de coordenadas.	58
Figura 2.21 Efecto de los planos de estratificación sobre la desviación de la barrena.	64
Figura 3.1 Aparejos de fondo liso.	69
Figura 4.1 Aparejos de fondo 1, 2 y 3	114
Figura 4.2 Aparejos de fondo 4, 5 y 6.	118
Figura 4.3 Aparejos de fondo 7 y 8.	122
Figura A.1 Iniciando la instalación.	138
Figura A.2 Discos de instalación.	138
Figura A.3 Bienvenido al programa de instalación.	139
Figura A.4 Directorio de instalación.	139
Figura A.5 Avance de la instalación en porcentaje.	140
Figura A.6 Fin de la instalación.	140
Figura A.7 Ventana de inicio.	141
Figura A.8 Diálogos para los archivos abrir y guardar como.	142
Figura A.9 Carpeta de datos TUIMP con la descripción del aparejo de fondo y las condiciones de operación.	147
Figura A.10 Carpeta de datos TUIMP con el registro direccional.	148

	Página
Figura A.11 Carpeta de datos TUIMP con las características de la barrena.	148
Figura A.12 TUIMP ejecutando la opción calcular.	149
Figura A.13 TUIMP ejecutando la opción resultados	150

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Valores de los metales y las aleaciones más comunes	11
Tabla 2	Resultados de esfuerzos y longitudes tangenciales para varios pesos aplicados en la barrena.	15
Tabla 3	Resumen de las fuerzas aplicadas a la barrena.	21
Tabla 4	Características de las barrenas	48
Tabla 5	Comparación de los resultados de los simuladores TUIMP y WELLPLAN en cada aparejo.	125

LISTA DE GRAFICAS

	Claro radial	
Gráfica 3.1	Aparejo para incrementar ángulo.	71
Gráfica 3.2	Aparejo para mantener ángulo.	72
Gráfica 3.3	Aparejo para disminuir ángulo.	73
	Peso sobre barrena	
Gráfica 3.4	Aparejo para incrementar ángulo.	75
Gráfica 3.5	Aparejo para mantener ángulo.	76
Gráfica 3.6	Aparejo para disminuir ángulo.	77
	Torque	
Gráfica 3.7	Aparejo para incrementar ángulo	78
Gráfica 3.8	Aparejo para mantener ángulo	79
Gráfica 3.9	Aparejo para disminuir ángulo.	80
	Profundidad	
Gráfica 3.10	Aparejo para incrementar ángulo	81
Gráfica 3.11	Aparejo para mantener ángulo.	82
Gráfica 3.12	Aparejo para disminuir ángulo.	83
	Coeficiente de fricción	
Gráfica 3.13	Aparejo para incrementar ángulo.	85
Gráfica 3.14	Aparejo para mantener ángulo.	86
Gráfica 3.15	Aparejo para disminuir ángulo.	87
	Echado de la formación	
Gráfica 3.16	Aparejo para incrementar ángulo	89
Gráfica 3.17	Aparejo para mantener ángulo.	90
Gráfica 3.18	Aparejo para disminuir ángulo.	91

LISTA DE GRAFICAS

	Página
Gráfica 3.19 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 5 pies en un aparejo de fondo para incrementos de ángulo.	93
Gráfica 3.20 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 10 pies en un aparejo de fondo para incrementos de ángulo.	94
Gráfica 3.21 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 20 pies en un aparejo de fondo para incrementos de ángulo	95
Gráfica 3.22 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 30 pies en un aparejo de fondo para incrementos de ángulo.	96
Gráfica 3.23 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 40 pies en un aparejo de fondo para incrementos de ángulo	97
Gráfica 3.24 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 5 pies en un aparejo de fondo para mantener ángulo.	98
Gráfica 3.25 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 10 pies en un aparejo de fondo para mantener ángulo.	99
Gráfica 3.26 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 20 pies en un aparejo de fondo para mantener ángulo	100
Gráfica 3.27 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 30 pies en un aparejo de fondo para mantener ángulo	101
Gráfica 3.28 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 40 pies en un aparejo de fondo para mantener ángulo	102
Gráfica 3.29 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 5 pies en un aparejo de fondo para disminuir ángulo.	103
Gráfica 3.30 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 10 pies en un aparejo de fondo para disminuir ángulo.	104
Gráfica 3.31 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 20 pies en un aparejo de fondo para disminuir ángulo.	105
Gráfica 3.32 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 30 pies en un aparejo de fondo para disminuir ángulo	106

LISTA DE GRAFICAS

	Página
Gráfica 3.33 Respuesta de la inclinación y de la curvatura de la inclinación en incrementos de 40 pies en un aparejo de fondo para disminuir ángulo.	107
Gráfica 3.34 Influencia de la curvatura del sustituto curvo. Iteración roca barrena	108
Gráfica 3.35 Aparejo para aumentar ángulo.	109
Gráfica 3.36 Aparejo para mantener ángulo.	110
Gráfica 3.37 Aparejo para disminuir ángulo.	111
Gráfica 4.1 Respuesta del simulador del aparejo 1 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.	115
Gráfica 4.2 Respuesta del simulador del aparejo 2 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.	116
Gráfica 4.3 Respuesta del simulador del aparejo 3 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos	117
Gráfica 4.4 Respuesta del simulador del aparejo 4 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.	119
Gráfica 4.5 Respuesta del simulador del aparejo 5 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.	120
Gráfica 4.6 Respuesta del simulador del aparejo 6 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos	121
Gráfica 4.7 Respuesta del simulador del aparejo 7 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.	123
Gráfica 4.8 Respuesta del simulador del aparejo 8 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.	124

CAPITULO I

I.1 INTRODUCCION

La perforación direccional es frecuentemente empleada para explotar yacimientos costa afuera, permitiendo a un equipo de perforación hacer varios pozos desde una misma localización. Tales estrategias minimizan: pérdidas de tiempo debido a una mala planeación de la desviación del pozo, el número de equipos de perforación requeridos y el costo total. El concepto de perforación direccional no está limitado a la perforación costa afuera. En tierra, la desviación controlada del agujero comúnmente es usada cuando se perfora hacia un yacimiento difícil de alcanzar.

Otra aplicación es cuando se perfora intencionalmente un pozo direccional donde la geología del subsuelo puede causar una desviación natural del pozo no deseable. Si se calcula correctamente, la planeación de la perforación debe tomar en cuenta factores geológicos para desviar el pozo en la dirección deseada del yacimiento objetivo.

Las variables que afectan el diseño de un pozo direccional se pueden clasificar en dos categorías generales: aquellas relacionadas con la mecánica de la sarta de perforación y aquellas relacionadas con el área geológica. Para diseñar con precisión un pozo con desviación controlada, ambas categorías deben ser tomadas en consideración.

Gran parte del trabajo de ingeniería requerido para planear un pozo desviado se centra en el diseño de la sarta de perforación.

La selección apropiada de los componentes de la sarta de perforación y las condiciones de operación, permitirán un control confiable de la trayectoria del pozo, siempre que se conozca una descripción geológica precisa del área.

La sección más importante está entre los 200 y 300 pies de la sarta de perforación justo arriba de la barrena, conocido como aparejo de fondo (BHA) contiene los elementos de control de la desviación (lastrabarrenas, estabilizadores, sustitutos curvos, MWD, motores de fondo etc.). Estas herramientas son las de mayor influencia sobre la dirección en la que perforará la barrena.

Existen muchos modelos analíticos y numéricos, diseñados para predecir las trayectorias de los pozos. Muchos de los modelos y programas sirven a sus propósitos cualitativamente. A la fecha hay pocos modelos capaces de predecir exactamente la desviación del pozo (cualitativamente) basados tanto en la mecánica de las sargas de perforación como en la geología.

La presente tesis trata de la complejidad de la predicción y control de la trayectoria del pozo. Un modelo predictivo que permite pronosticar la trayectoria del pozo, basado tanto en el comportamiento mecánico del aparejo de fondo (BHA) y de la influencia geológica a la vez

El modelo de perforación TUDRPDAM desarrollado en la Universidad de Tulsa y adecuado en otro lenguaje a las condiciones locales TUIMP, sirve para la predicción y control de la trayectoria en pozos horizontales, es un modelo tridimensional cuasi estático que combina un algoritmo de análisis de elemento finito, con un esquema de predicción y un modelo anisotrópico de roca para predecir cuantitativamente la trayectoria.

En esta tesis, se validan los resultados aportados con una medición continua de variaciones en el comportamiento de los diferentes aparejos con respecto a la respuesta que se espera del simulador.

Los elementos tridimensionales de una viga representan los componentes de un aparejo de fondo conectados por nodos, un algoritmo iterativo de eliminación gaussiana resuelve los desplazamientos nodales del aparejo dentro de un agujero circular rígido. Una vez que se determina la posición de equilibrio, se calculan los

vectores de las fuerzas de reacción. La fuerza de reacción en una barrena es entonces usada para determinar la dirección en que perforará la barrena

El modelo utiliza un menú amigable en lenguaje de programación Visual Basic 5 en la entrada y salida de datos para facilitar el análisis de los resultados, contando adicionalmente con una guía de usuario

Se requieren de dos archivos de datos de entrada, uno contiene las condiciones de operación, parámetros de perforación y la descripción de los componentes del aparejo de fondo. El segundo contiene el registro de la dirección, profundidad, inclinación y el azimut previos

Entre los parámetros de perforación se encuentran: peso sobre barrena, densidad del fluido empleada, diámetro del agujero, echado de la formación, buzamiento e índices anisotrópicos. Entre los datos que se requieren para describir el aparejo están: número de componente, longitud de componentes, material del que están hechos, longitud de la aleta del estabilizador(es), etc.

Finalmente, el resultado después de ejecutar el programa se encuentra en un archivo el cual contiene los desplazamientos nodales, fuerzas en los nodos, la inclinación y azimut predecidas para un intervalo establecido a diferentes profundidades.

CAPITULO II

ASPECTOS TEORICOS

II.1 INTRODUCCION

Un modelo de aparejos de fondo cuasi-estático en tres dimensiones para la predicción de la trayectoria del pozo fue desarrollado durante el Proyecto de Investigación en Perforación de la Universidad de Tulsa (TUDRP) entre 1990 y 1991. Inicialmente el modelo dinámico en tres dimensiones desarrollado por Brakel¹ en 1986 sirvió de base para el inicio de los análisis cuasi-estáticos y las rutinas de solución. Se mejoraron los modelos de aparejos para la predicción de la trayectoria del pozo cuando se utilizó una combinación de simulación de la perforación con el análisis de los aparejos por medio del elemento finito.

En el modelo cuasi-estático las predicciones de la trayectoria de la perforación se basan fundamentalmente en el equilibrio de las fuerzas de desplazamiento de los aparejos, obligados a permanecer en agujeros rígidos de forma circular. El elemento finito utiliza vigas rectilíneas en tres dimensiones para representar los componentes del aparejo. La rutina de solución cuasi-estática toma en cuenta las fuerzas de fricción que se generan en el modelo del elemento finito pero no toma en cuenta la aceleración y las colisiones elásticas y plásticas de los aparejos con las paredes del agujero; además reproduce el tiempo dinámico promedio que resulta cuando se requiere solo poco tiempo de cómputo para un análisis completo en forma dinámica tridimensional.

Debido al diseño de las barrenas, tanto la de conos (RLC) como las de diamantes policristalinos (PDC) pueden tomar diferentes direcciones independientemente de la formación anisotrópica que estén atravesando, para incrementar la eficiencia y certeza en la predicción de la trayectoria se requieren modelos con algoritmos de interacción roca-barrena para averiguar el tipo de fuerzas que se presentan debido al tipo de barrena, tipo de diseño y tipo de cargas

Esta tesis describe la investigación y las modificaciones del Modelo de Perforación de la Universidad de Tulsa (TUDRPDAM). El objetivo de las modificaciones es el mejoramiento del análisis de la trayectoria de los aparejos mediante la incorporación de modelos de barrenas RLC y PDC dentro del código cuasi-estático. El mejoramiento del modelo de predicción de la perforación puede simular en forma más completa y realista el aparejo de perforación, la barrena y el sistema físico de la roca. El análisis de la trayectoria del agujero puede basarse subsecuentemente como una combinación de la interacción roca-barrena y la mecánica del aparejo.

Los modelos de interacción roca-barrena previamente implementados en el programa dinámico de Brakel proporcionan precisión y un completo análisis de las fuerzas en tres dimensiones tanto para barrenas de conos como barrenas PDC. Durante este proyecto los modelos originales de interacción roca barrena son reestructurados para adecuar su aplicación a modelos de aparejos de fondo cuasi-estáticos. Los modelos de interacción roca-barrena son reprogramados como una función independiente del tiempo mientras que se permite la determinación de las fuerzas de la barrena que actúan sobre el aparejo. Cada vez que un modelo de análisis de barrenas es incorporado en un modelo cuasi-estático de aparejos, la correcta operación es confirmada mediante la comparación de los resultados del código dinámico original, los análisis de sensibilidad del nuevo código de interacción roca-barrena y pruebas de los aparejos son llevados a cabo para verificar el desarrollo y mejoramiento de los modelos roca-barrena.

11.2 PRINCIPIOS DE LOS APAREJOS DE FONDO

El aparejo de fondo es la porción de la sarta de perforación que afecta la trayectoria de la barrena y consecuentemente del agujero, estos aparejos pueden ser sencillos, cuando solo se usa barrena y lastrabarrenas o muy complicados, cuando se usan barrenas, estabilizadores, lastrabarrenas antimagnéticas, unidad telemétrica, amortiguador de vibraciones, lastrabarrena normal, rimas, junta de seguridad, martillo, tubería de perforación pesada y tubería de perforación normal fig 2.1

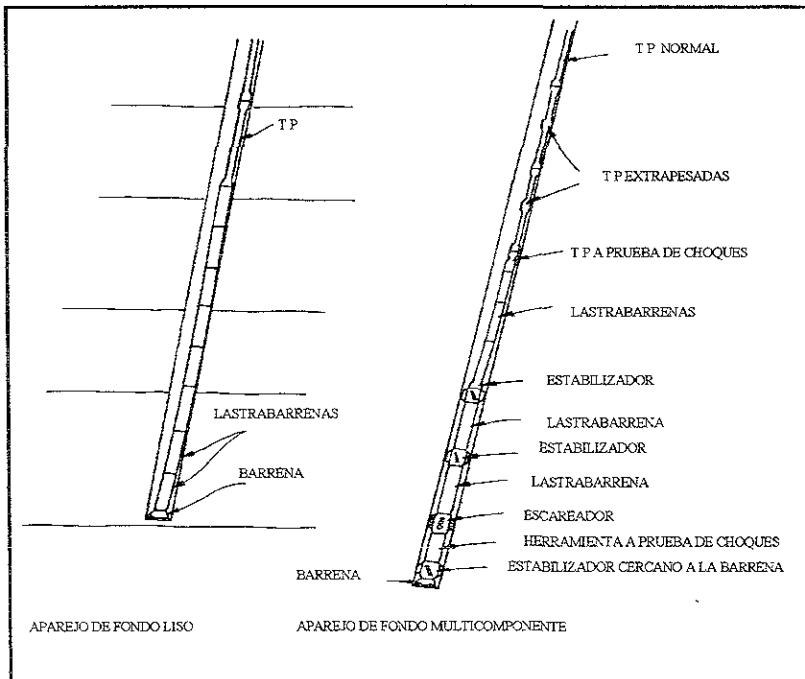


Figura 2.1 Distintos arreglos de aparejos de fondo³

En un principio la perforación se hacía con aparejos lisos (barrena y lastrabarrenas); después Lubinski y Woods² mostraron que el aparejo tipo péndulo podía ser usado para el control de la desviación del pozo. Los aparejos con varios estabilizadores se hicieron populares debido al desarrollo de la perforación

direccionales además de que algunos demostraron ser un medio efectivo para el control de la desviación.

Todos los aparejos causan algún tipo de fuerza sobre la barrena lo cual hace que esta mantenga, incremente o disminuya el ángulo de inclinación y el giro a la derecha o izquierda. Además los estabilizadores y las partes del aparejo que hacen contacto con las paredes del pozo ejercen alguna fuerza con la formación o con la TR. Las fuerzas y desplazamientos dados por el peso sobre barrena (PSB) y la velocidad de la rotaria para cada aparejo, pueden ser determinados *eficientemente si se conocen las propiedades físicas de cada componente del aparejo* y si la forma, diámetro y trayectoria del agujero pueden ser descritos.

La inclinación de la barrena es otro factor en la mecánica del aparejo que tiene gran influencia en la dirección de la misma, especialmente en la perforación de formaciones someras. La curvatura de la línea central del aparejo es transmitida a la barrena causando alguna inclinación y un movimiento en la dirección de la línea central fig. 2.2 En rocas suaves la inclinación de la barrena controla la dirección de la trayectoria mientras que en rocas más duras predominan las fuerzas laterales en la barrena. Una caja curva trabaja con el principio de la inclinación de la barrena, con un sustituto curvo sin embargo pueden existir tanto la inclinación de la barrena como los mecanismos de fuerzas laterales ó ambos.

Este capítulo presenta los principios que gobiernan el diseño y desarrollo de los aparejos. Las propiedades que gobiernan el comportamiento elástico de un aparejo simple pueden proporcionar las bases para un análisis más complejo del aparejo con varios estabilizadores. En la mayoría de los análisis de aparejos lisos (barrena y lastrabarrena) puede aplicarse un sistema estático en 2D.

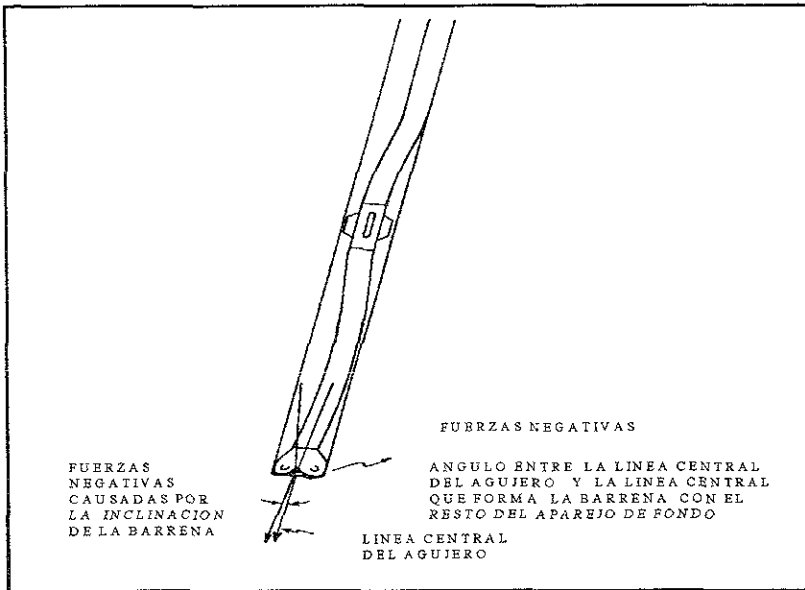


Figura 2.2 Ejemplo de la inclinación de la barrena en un aparejo tipo pendulo³

II.3 COLUMNA TUBULAR

La figura 2.3 es un aparejo de perforación liso (barrena y lastrabarrenas) en un agujero inclinado. Los tipos de metal que componen los lastrabarrenas dictaminan el peso y el comportamiento elástico de los mismos.

De la forma y dimensiones de los lastrabarrenas podemos determinar tanto el momento de inercia axial I , como el momento de inercia polar J . La mayoría de los componentes de perforación usados en un aparejo pueden ser representados como un cilindro de pared gruesa o bien como una columna cuadrada con un agujero cilíndrico en el centro fig. 2.4.

El momento de inercia axial para un cilindro de pared gruesa es calculado de la siguiente manera:

$$I = \frac{(d_e^4 - d_i^4)\pi}{64} \quad (2.3.1)$$

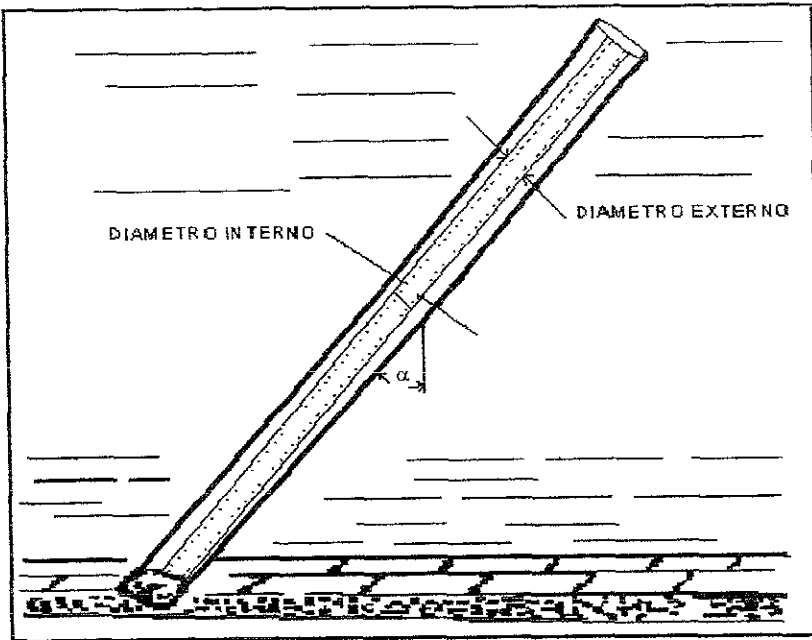


Figura. 2.3 Aparejo de perforación liso con una inclinación α^3

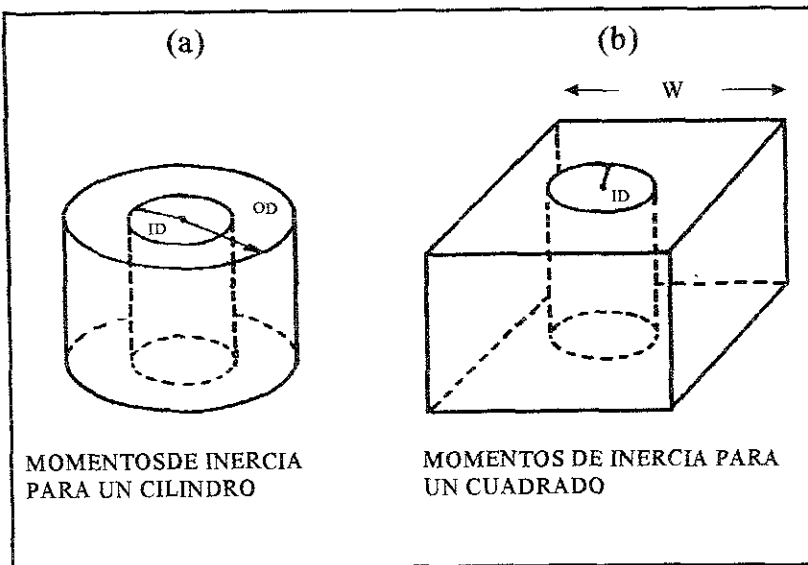


Figura 2.4 Representación de los momentos de inercia³

El momento de inercia polar para el cilindro es

$$J = \frac{1}{32} \pi (d_e^4 - d_i^4) \quad \text{o también,} \quad J=2I \quad (2.3.2)$$

El modulo de Young³, E, relaciona la tensión del material, dado por la suma de esfuerzos; este asume que el material se tensiona linealmente con los esfuerzos como si estuviera en la región de la ley de Hook⁴. La mayor parte del tiempo la sarta de perforación y el aparejo se encuentran en la región elástica, sin embargo a veces la tubería puede estar por debajo de los límites elásticos resultando en una deformación plástica y una posible falla. La tabla 1 presenta los valores de las aleaciones y metales más comunes; (nótese que el modulo del aluminio es alrededor de una tercera parte del acero y que el modulo del Tungsteno es de alrededor del doble). El módulo decrece significativamente con un incremento en la temperatura.

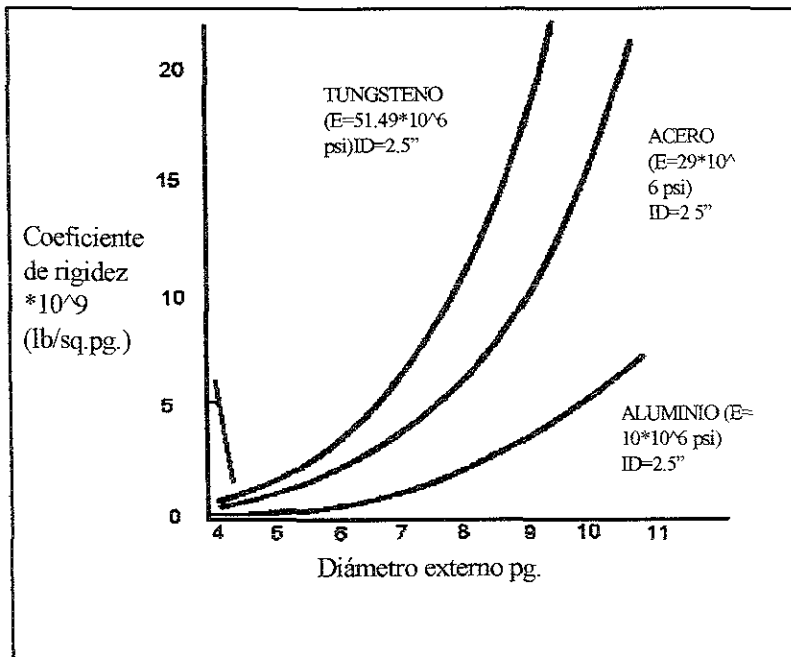


Figura 2.5 Esfuerzo de las lastrabarreras³

ALEACION	DENSIDAD (lb/pie ³)	E (10 ⁶ psi)
ACERO BAJO EN CARBON	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	28.0
MONEL	551	26.0
MONEL K - 500	529	26.0
NIQUEL	556	30.0
ALUMINIO	170	10.6
TUNGSTENO	1,205	51.5

Tabla 1 Presenta los valores de las aleaciones y metales más comunes³

El producto del momento de inercia y el modulo de elasticidad es llamado rigidez ó dureza del material, EI. La fig. 2.5 es una gráfica de la dureza de varias sartas de perforación y componentes de aparejos en función de sus diámetros internos y externos.

Para la mayoría de los lastrabarrenas redondos se puede determinar si los diámetros interno y externo, además de la longitud son conocidos; sin embargo un lastrabarrenas redondo y liso puede pesar menos que el peso calculado en el aire si, por ejemplo, se tiene una raspadura en el mismo o si el diámetro externo se ha visto reducido por el continuo manejo con los elevadores. La determinación del peso en el aire de los otros componentes de los aparejos (estabilizadores, rimas, amortiguadores, motores, martillos, tubería de perforación de pared gruesa y otras

amortiguadores, motores, martillos, tubería de perforación de pared gruesa y otras herramientas de agujero) es más complejo debido a que el área de la sección transversal generalmente varía con la longitud de la herramienta. Otra razón para que el peso en el aire no concuerde con el peso medido es que el desgaste de la parte exterior del componente puede no ser uniforme, así la forma de la sección transversal del componente puede ser más elíptica que circular.

Cuando cualquier componente del aparejo es bajado en un agujero lleno de fluido su peso se ve disminuido por la flotación del componente. El factor de corrección por flotación, B_c , puede ser determinado de la ecuación siguiente:

$$B_c = \frac{(\rho - W_m)}{\rho} \quad (2.3.3)$$

Donde ρ es la densidad del metal de que esta hecho el componente del aparejo y W_m es el peso del lodo en unidades consistentes.

II.4 APAREJO DE FONDO LISO

La fig. 2.6 describe un aparejo de fondo liso (a) y uno de tipo péndulo (b); ambos aparejos generan una magnitud de fuerza negativa, F_B , causado por la gravedad.

En la barrena esta fuerza puede ser determinada de la siguiente ecuación:

$$F_B = -0.5W_C L_T B_C \sin \alpha \quad (2.4.1)$$

Donde W_C es el peso en el aire de los lastrabarrenas en lb_m/ft^3 , L_T es la longitud del aparejo entre la barrena y el primer punto de tangencia fig. 2.6.a y b en pies, y α es el ángulo de inclinación.

Si el peso axial es aplicado en la barrena, una magnitud de fuerza positiva llamada fuerza de curvatura, debe ser considerada. La fig. 2.7 muestra un aparejo de fondo con una carga axial de cero (a) y uno con la tubería curvada por una carga axial aplicada (b). Para determinar la componente positiva de cualquier aparejo, se debe uno de fijar en que los momentos de curvatura ocurren sobre la porción

activa del aparejo (la porción activa se refiere a todas las partes del aparejo por debajo del punto de tangencia)

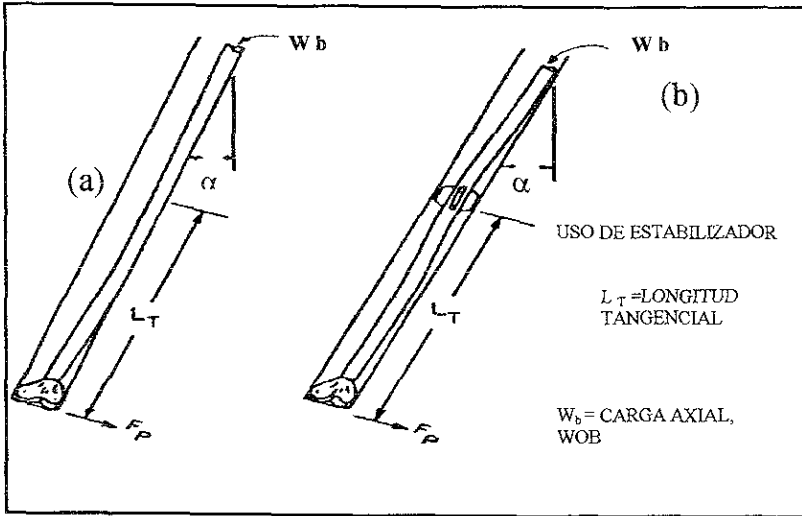


Figura 2.6 Tangentes para aparejos de fondo liso y con péndulo³

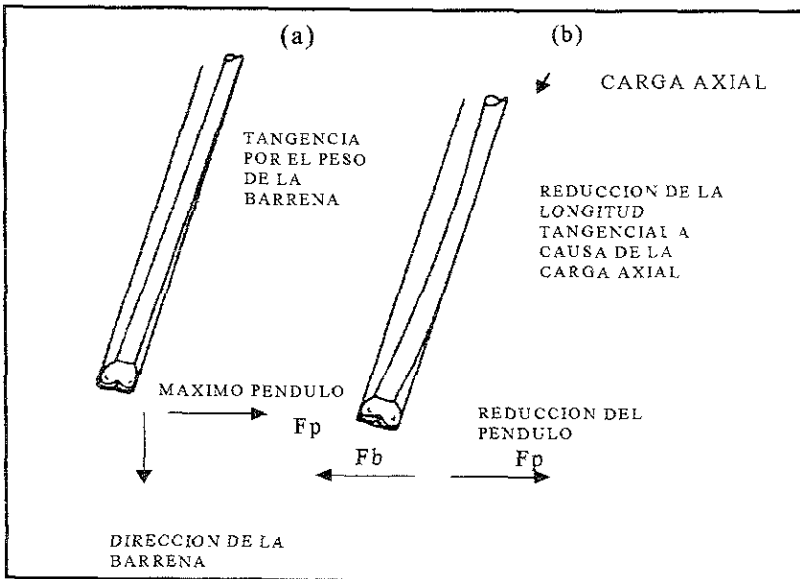


Figura 2.7 Aparejo de fondo liso con y sin carga axial³

La ecuación 2.4.2 presentada por Jiazhi⁵ y basada en el método de Timoshenko⁶ la cual muestra los componentes positivo y negativo como una función del PSB o como una carga axial aplicada.

$$F_B = -0.5W_C B_C L_T \sin \alpha + (P_B - 0.5W_C B_C L_T \cos \alpha) \ell / L_T \quad (2.4.2)$$

(Note que la convención de los signos usada por Jiazhi es cambiada para ser consistente con el análisis de los aparejos que en la actualidad se hacen, usando un signo positivo cuando se construye un ángulo y el signo negativo cuando hay una caída del ángulo).

En la ecuación 2.4.2 F_B es la fuerza aplicada sobre la barrena en (lb_f), P_B es la carga axial o compresiva en la barrena en (lb) y ℓ es el claro radial de los lastrabarrenas en (pg). Debido a que L_T es desconocido tanto en los esfuerzos positivos como negativos de la ecuación, deberá ser determinado antes de calcular F_B .

El claro radial de los lastrabarrenas es calculado de la siguiente ecuación:

$$\ell = 0.5(d_b - d_{dc}) \quad (2.4.3)$$

donde d_b es el diámetro de la barrena y d_{dc} es el diámetro del lastrabarrena.

La solución de Jiazhi es suponer una longitud de tangencia inicial L_T , después calcularlo con la ecuación 2.4.4 y si los valores son iguales o están dentro de un rango de error mínimo podemos usar ese L_T para calcular la magnitud de la fuerza aplicada a la barrena por medio de la ecuación 2.4.2, para un aparejo de fondo liso con una inclinación constante y lastrabarrenas del mismo diámetro, si no se acerca el valor calculado con el supuesto se toman ambos resultados y se obtiene el promedio aritmético, con este promedio se vuelve a calcular con la ecuación 2.4.4 y así sucesivamente hasta que los valores sean iguales.

$$L_T^4 = \frac{24EI\ell}{W_C B_C \sin \alpha X} \quad (2.4.4)$$

donde X es una función trascendental dada por la siguiente ecuación:

$$X = \frac{3(\tan \mu - \mu)}{\mu^3} \quad (2.4.5)$$

donde μ debe ser dada en radianes y es calculada por la ecuación

$$\mu = \frac{L_T}{2} \left(\frac{p_c}{EI} \right)^{0.5} \quad (2.4.6)$$

La carga compresiva en los lastrabarrenas, p_c , puede ser calculada por:

$$p_c = p_B - 0.5W_C B_C L_T \cos \alpha \quad (2.4.7)$$

Los resultados mostrados en la tabla 2 se obtuvieron con las ecuaciones anteriores para diferentes pesos sobre barrena.³

PESO APLICADO A LA BARRENA (lb f)	0 lb. FUERZA DE FORMACION F_B (lb f)	525 lb f FUERZA DE FORMACION F_B (lb f)	L_T (pies)
0	-147	378	51.9
10,000	-133	392	50.8
30,000	-94	431	48
50,000	-51	474	45.3
70,000	-6	519	42.9
80,000	18	543	41.7

Tabla . 2 Resultados de fuerzas y longitudes tangenciales para varios pesos aplicados en la barrena³

La fig. 2.8 es una gráfica de los resultados de la tabla anterior para fuerzas de formación de 0 lbf y de 525 lbf. La curvatura o componentes positivo y negativo de la fuerza también son graficados vs el PSB. Podemos observar que para este aparejo en particular con una fuerza de formación de 0 lbf necesariamente podríamos requerir de un PSB de 80,000 lbf para iniciar a construir de manera ligera; y con una fuerza de formación de 525 lbf tendríamos una tendencia de construcción moderada, como si el peso sobre la barrena fuera pequeño.

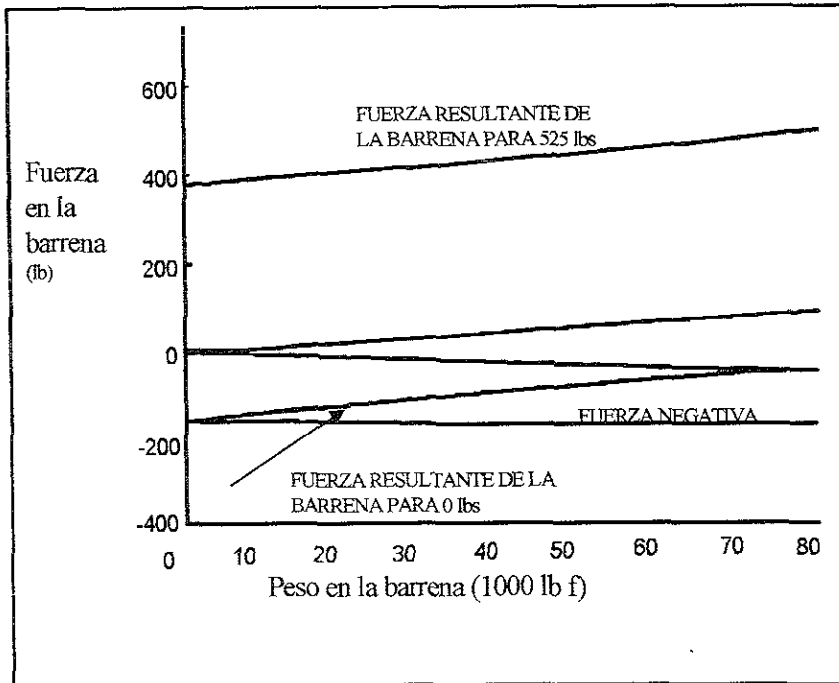


Figura 2.8 Resultados para aparejos de fondo calculados a partir de un aparejo de fondo liso³

La tendencia de la barrena a construir, mantener o disminuir el ángulo se basa en una fuerza positiva, negativa o cero, esencialmente esto es en caso de tener formaciones duras (i. e., con ritmos de perforación de 1 a 10 pie/hr). Cuando la formación va de blanda a medio dura la tendencia de la magnitud de la fuerza no es el único componente que puede influenciar la inclinación y dirección de la barrena, debido a que la curvatura del aparejo queda próxima a la barrena, esta es

ladeada o inclinada en la misma dirección e inclinación, al igual que la caja y el sustituto curvos. La magnitud de la inclinación es directamente influenciada por la resistencia de la formación. En muchas formaciones blandas (ritmos de perforación por encima de 100 pie/hr) la magnitud de la fuerza puede ser el mecanismo predominante y en muchos casos puede mitigar los efectos de la inclinación de la barrena; esto es especialmente cierto en los casos en los que se usan lastrabarrenas rígidos y largos.

Cuando las formaciones van de blandas a medio duras (ritmos de perforación de 10 a 100 pie/hr) los efectos de la inclinación de la barrena pueden ser significativos; para determinar dicha inclinación debemos de conocer la curvatura en el fondo del agujero y la del aparejo cercano a la barrena. Las soluciones analíticas para los aparejos, como la de Jiazhi, son difíciles e incómodas de usar debido a las variaciones de inclinación y dirección del pozo para describir las curvaturas del aparejo. Para calcular la inclinación de la barrena son mejor los algoritmos del elemento finito para aparejos o soluciones similares, además con un grado de veracidad pueden tomar en cuenta los efectos dinámicos del aparejo a ser considerados. Sin embargo se tiene un gran entendimiento de los mecanismos básicos del aparejo de fondo con la técnica de Jiazhi.

En el caso especial de un aparejo liso, no es usado ningún estabilizador. En el ejemplo anterior, (fig.2.18) son usados lastrabarrenas de 7 pg en un agujero de 8.75 pg los cuales generan magnitudes de fuerzas en un rango mínimo de -147 lbf con 0 lbf de PSB y máximo de 18 lbf con 80,000 lbf de PSB. Si la fuerza de la formación es de 525 lbf, el aparejo liso debe de iniciar una construcción de ángulo, sin tomar en cuenta el peso que se aplique a la barrena, un ángulo de inclinación equilibrado es alcanzado cuando la fuerza de la formación no es centrada por medio de la fuerza negativa.

Si lo que se desea es mantener un ángulo de inclinación mínimo con una fuerza de la formación de 525 lbf en un agujero de 8.75 pg; lastrabarrenas de 7 pg de diámetro externo pueden ser usadas con gran seguridad. Una alternativa para perforar un pozo profundo es usar lastrabarrenas largas con un diámetro grande

Un lastrabarrenas de 9.5 pg diámetro de puede ser demasiado grande para un agujero de $9\frac{7}{8}$ pero puede ser usado en uno de $12\frac{1}{4}$ pg si el tamaño del agujero no es agrandado la única posibilidad es que se incremente la longitud de tangencia del aparejo, con el uso de un estabilizador podemos mover el punto de tangencia mas arriba del agujero y puede ser obtenida una mayor fuerza negativa. Un aparejo tipo péndulo es el que tiene un solo estabilizador para controlar la longitud de tangencia.

II.5 APAREJO CON UN ESTABILIZADOR

El mismo tipo de análisis usado para el aparejo de fondo liso puede ser aplicado para un aparejo con un solo estabilizador.

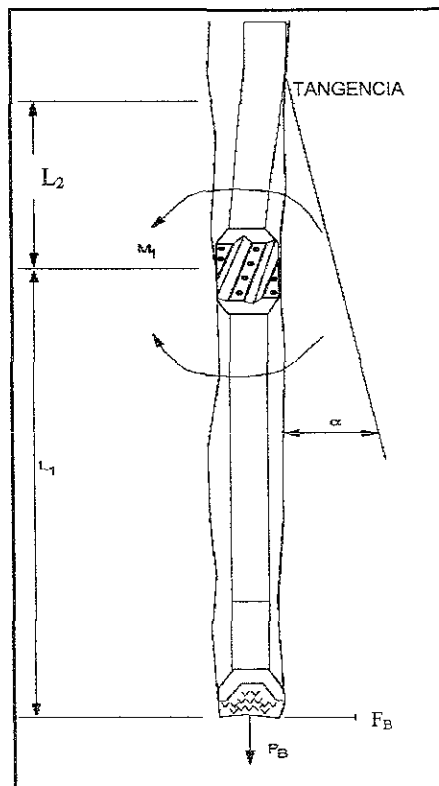


Figura 2.9 Aparejo con un solo estabilizador³

De nueva cuenta se estimará una longitud de tangencia de forma iterativa ahora usando la siguiente ecuación:

$$L_T^4 = \frac{24EI_2(\ell_2 - \ell_1)}{q_2x_2} - \frac{4m_1L_T^2W_2}{q_2x_2} \quad (2.5.1)$$

El momento de curvatura, m , es calculado de la siguiente relación

$$2m_1 \left(V_1 + \frac{L_2 I_1}{L_1 I_2} V_2 \right) = -\frac{q_1 L_1^2}{4} x_1 - \frac{q_2 L_2^3 I_1}{4 L_1 I_2} x_2 + \frac{6EI_1 \ell_1}{L_1^2} + \frac{6EI_1(\ell_1 - \ell_2)}{L_1 L_2} \quad (2.5.2)$$

Donde $q_1 = W_{c1} B_c \sin \phi$, $q_2 = W_{c2} B_c \sin \phi$, W_{c1} es el peso de los lastrabarrenas desde la barrena hasta el estabilizador y W_{c2} es el peso de los lastrabarrenas desde el estabilizador hasta el punto de tangencia.

Los coeficientes W_i y V_i pueden ser calculados por medio de las siguientes ecuaciones:

$$W_i = \frac{3}{u_i} \left[\frac{1}{\sin(2u_i)} - \frac{1}{2u_i} \right] \quad (2.5.3)$$

$$V_i = \frac{3}{2u_i} \left[\frac{1}{2u_i} - \frac{1}{\tan(2u_i)} \right] \quad (2.5.4)$$

Donde $i = 1$ ó 2 , los coeficientes X_i y u_i son determinados de las ecuaciones 2.5.5 y 2.5.6, considerando los lastrabarrenas de la barrena al estabilizador y del estabilizador al punto de tangencia.

$$X_i = \frac{3[\tan(u_i) - u_i]}{u_i^3}, \text{ de donde } u_i = \frac{L_i}{2} \left(\frac{p_{ca}}{EI_i} \right)^{0.5}$$

La ecuación 2.4.3 es usada para calcular los claros para cada sección de los lastrabarrena donde d_s es el diámetro del estabilizador y d_2 es el diámetro del lastrabarrena que lleva a cabo la tangencia

$$\ell_1 = 0.5(d_b - d_s) \quad \text{y,} \quad \ell_2 = 0.5(d_b - d_2)$$

La carga compresiva para la primera sección es calculada con la ecuación 2.5.3 y la siguiente

$$P_{c1} = P_B - \left[\left(\frac{L_1}{2} W_{c1} B_c \right) \cos \phi \right]$$

Donde la carga compresiva de la segunda sección es dada por la ecuación

$$P_{c2} = P_B - \{ (W_{c1} B_c L_1) + (0.5 W_{c2} B_c L_2) \} \cos \phi \quad (2.5.5)$$

Si el valor estimado de L_2 es igual al valor de L_T , la siguiente ecuación puede ser usada para calcular la magnitud de la fuerza en la barrena.

$$F_B = -0.5 B_c W_{c1} L_1 \sin \phi + \frac{P_{c1} \ell_1}{L_1} - \frac{m}{L_1} \quad (2.5.6)$$

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 calculo hasta que L_2 sea igual a L_T .

La tabla 3 resume los resultados de acuerdo al peso sobre la barrena. Estos resultados indican que un peso adicional en el PSB de 20,000 lbf incrementa la magnitud de la fuerza en la barrena de 3,058 a 3,086 lbf y reduce la longitud de tangencia de 65.5 a 64.2 pies

PESO APLICADO A LA BARRENA (lb f)	FUERZA DE LADO A LA BARRENA Fd (lb f)	Longitud tangencial Lt (pies)	MOMENTO M (ft-lb f)
10,000	3.030	66.9	15.410
20,000	3.044	66.2	15.466
30,000	3.058	65.5	15.522
40,000	3.072	64.9	15.579

Tabla. 3 Resumen de las fuerzas aplicadas a la barrena³

La fig. 2.10 muestra la magnitud de la fuerza en la barrena como una función de la distancia del estabilizador a la barrena para PSB de 10,000 a 60,000 lbf La fig. 2.11 es una gráfica similar para un lastrarbarrena de 6 1/2 pg (Fue usado un código de aparejos con el elemento finito para generar esas gráficas).

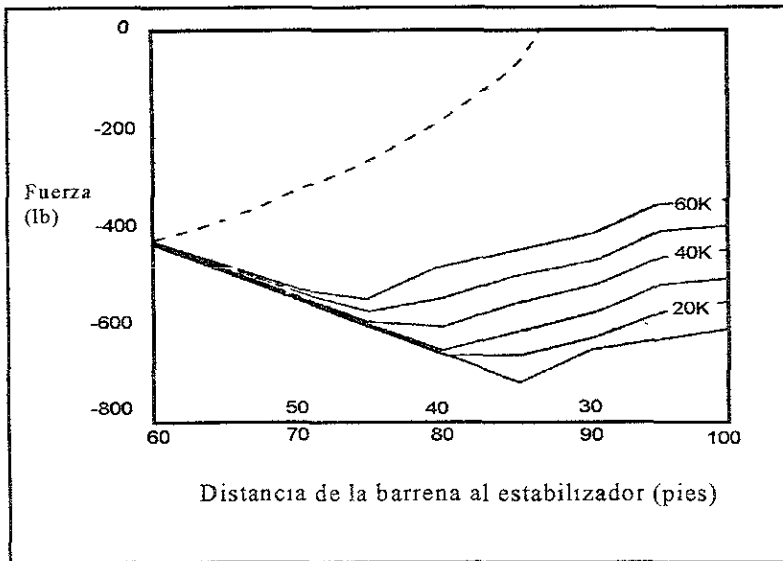


Figura 2.10 Fuerza vs. pendulo con diametro de agujero de 12 1/4", diametro de lastrarbarrena de 8",y 10° de inclinacion³

El estabilizador cercano a la barrena causa un levantamiento o magnitud de fuerza positiva. Como el estabilizador se mueve lejos de la barrena, entre 30 y 35 pies, se consigue una magnitud de fuerza en la barrena de 0 lbf. Este tipo de arreglo es llamado aparejo neutral; si el estabilizador es colocado por arriba de los 30 pies de la barrena, la magnitud de la fuerza en la barrena es negativa y va disminuyendo hasta un máximo valor negativo. El aparejo con un solo estabilizador es llamado de péndulo o aparejo "caído". El máximo péndulo o magnitud de fuerza negativa se encuentra en el punto donde los lastrabarrenas logran la tangencia entre la barrena y el estabilizador. La solución de aparejos por el método de Jiazhi no predice este punto de tangencia. Existen otros algoritmos que pueden calcular la máxima fuerza de péndulo cuando ocurre la tangencia y nos indica que la máxima magnitud de fuerza ocurre entre los 75 y 85 pies debido a cargas sobre la barrena de 10,000 a 60,000 lbf; para agujeros y lastrabarrenas de diámetro pequeño la máxima magnitud de fuerza puede ocurrir entre los 55 y 80 pies para cargas sobre barrena de 10,000 a 60,000 lbf.

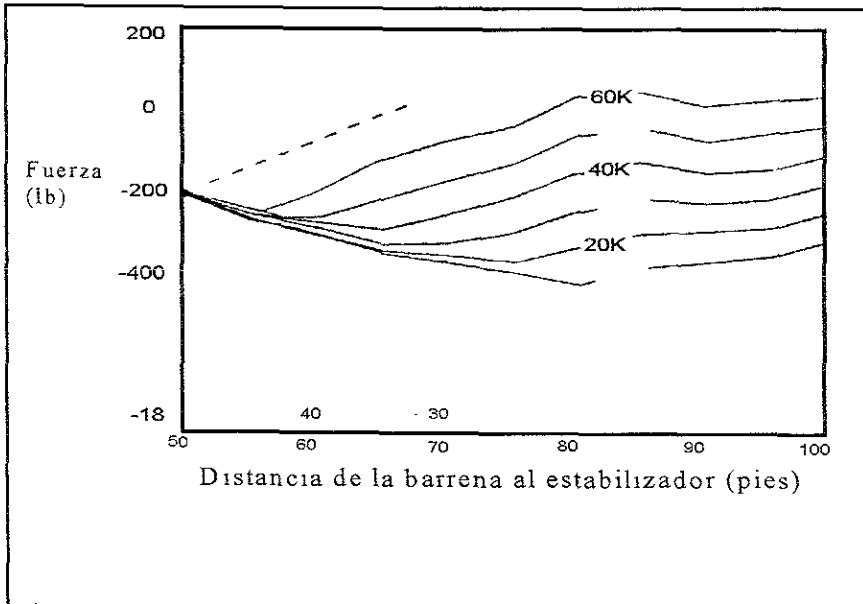


Figura 2.11 Fuerza vs. péndulo con diámetro de agujero de $12 \frac{1}{4}$ ", diámetro de lastrabarrena de $6 \frac{1}{2}$ ", y 10° de inclinación³

II.6 APAREJO CON DOS ESTABILIZADORES

Los aparejos de fondo con dos estabilizadores también pueden ser resueltos con la técnica de Jiazhi. La fig. 2.12 describe un típico aparejo con dos estabilizadores, donde L_1 y L_2 son longitudes conocidas entre la barrena y el primer estabilizador y entre el primer estabilizador y el segundo, la distancia L_3 entre el segundo estabilizador y el punto de tangencia no es conocida y como en el caso del aparejo liso y con un solo estabilizador la distancia L_3 debe ser supuesta inicialmente.

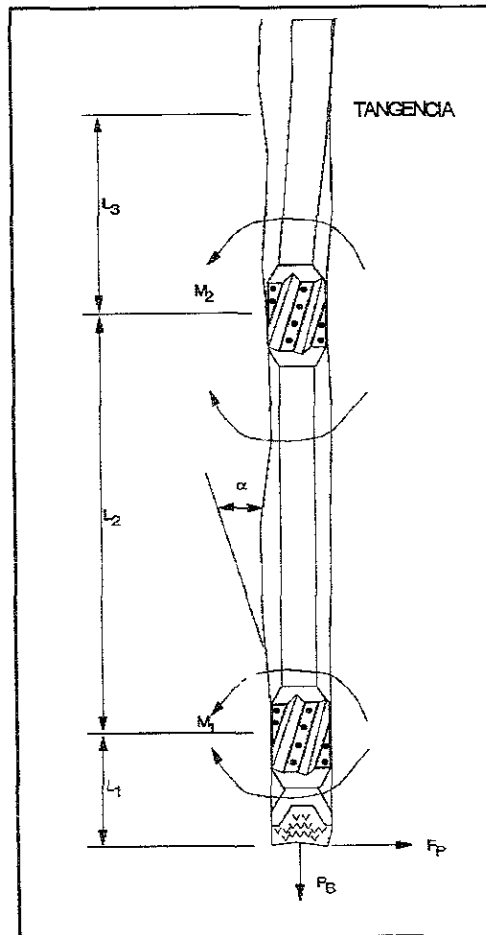


Figura 2.12 Aparejo de fondo con dos estabilizadores³

En este tipo de aparejos se pueden usar tres tipos diferentes de diámetros y de materiales para los lastrabarreras. Una vez que la longitud de tangencia correcta es obtenida, los dos momentos, M_1 y M_2 , y la magnitud de la fuerza en la barrena pueden ser calculados.

Como en la ecuación 2.4.3 el claro entre los estabilizadores y el agujero y entre el último estabilizador y el agujero son determinados por:

$$\ell_1 = 0.5(d_b - DS_1) / 12; \ell_2 = 0.5(d_b - DS_2) / 12, \text{ y } \ell_3 = 0.5(d_b - DC_3) / 12$$

La ecuación 2.6.1 puede ser usada para calcular la magnitud de la fuerza en la barrena

$$F_B = -0.5W_C B_C L_1 \sin \phi + P_{C1} \ell_1 / L_1 - m_1 / L_1 \quad (2.6.1)$$

En la ecuación 2.6.2 todos sus componentes son conocidos excepto m_2 , para determinarlo debe suponer un valor de L_3 , si el valor supuesto L_3 es igual al valor L_T calculado de la ecuación 2.6.2; el valor equivalente de m_2 debe ser usado en la ecuación 2.6.2 y el valor de m_1 debe ser usado en los cálculos de la magnitud de la fuerza.

$$L_T^4 = \frac{24EI_3(\ell_3 - \ell_2)}{q_3 X_3} - \frac{4m_2 L_3^2 W_3}{q_3 X_3} \quad (2.6.2)$$

y; $q_i = W_C B_C \sin \phi$, donde $i = 1, 2 \text{ ó } 3$.

Las relaciones para el primer y segundo momentos están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$2m_1 \left(V_1 + \frac{L_2 I_1}{L_1 I_2} V_2 \right) + m_2 \frac{L_2 I_1}{L_1 I_2} W_2 = -\frac{q_1 L_1^2}{4} X_1 - \frac{q_2 L_2^3 I_1}{4 L_1 I_2} X_2 + \frac{6EI_1 \ell_1}{L_1^2} + \frac{6EI_1(\ell_1 - \ell_2)}{L_1^2}, \quad (2.6.3)$$

$$m_1 W_2 + 2m_2 \left(V_2 + \frac{L_3 I_2}{L_2 I_3} V_3 \right) = -\frac{q_2 L_2^2}{4} X_2 - \frac{q_3 L_3^3 I_2}{4 L_2 I_3} - \frac{6EI_2(\ell_1 - \ell_2)}{L_2^2} - \frac{6EI_2(\ell_3 - \ell_2)}{L_2 I_3}, \quad (2.6.4)$$

X_i , W_i y V_i pueden ser calculadas de las ecuaciones 2.4.5, 2.5.3 y 2.5.4, donde $i = 1, 2 \text{ ó } 3$

$$X_i = \frac{3[\tan(u_i) - (u_i)]}{u_i^3}; \quad W_i = \frac{3}{u_i} \left[\frac{1}{\sin(2u_i)} - \frac{1}{2u_i} \right];$$

$$\text{y} \quad V_i = \frac{3}{2u_i} \left[\frac{1}{2u_i} - \frac{1}{\tan(2u_i)} \right]; \quad \text{donde,} \quad u_i = \frac{L_i}{2} \left[(p_{ci} / EI_1)^{0.5} \right]$$

$$p_1 = p_B - [(0.5W_{c1}B_{c1}L_1)\cos\phi] \quad (2.6.5)$$

$$p_2 = p_B - \{[(W_{c1}B_{c1}L_1) + 0.5W_{c2}L_2]\cos\phi\} \quad (2.6.6)$$

$$p_3 = p_B - \{[(W_{c1}B_{c1}L_1) + (W_{c2}B_{c2}L_2) + (0.5W_{c3}L_3)]\cos\phi\} \quad (2.6.7)$$

La fig. 2.13 muestra las soluciones para un aparejo con un solo estabilizador con un péndulo de 60 pies y una inclinación de 10° vs. Un aparejo con dos estabilizadores. El segundo estabilizador incrementa la magnitud de fuerza negativa mediante la reducción del efecto de la fuerza de curvatura positiva.

Los aparejos de fondo lisos, con un solo estabilizador y con dos estabilizadores pueden ser analizados mediante los mismos algoritmos, también el esquema propuesto por Jiazhi puede ser expandido al manejo de aparejos multiestabilizados, ya sea con tres, cuatro y cinco estabilizadores.

Para un aparejo de fondo liso no tiene solución, excepto en la longitud de tangencia L_T cuando $u_1 < 1.57$ y $p_{c1} > 0$, es decir que la técnica de solución es válida únicamente cuando la parte baja del aparejo está bajo compresión; esto mismo se aplica para el aparejo con un solo estabilizador cuando $u_1 > 1.57$ y $p_{c1} < 0$, y $u_2 > 1.57$ y $p_2 < 0$ no existe solución excepto al final de la longitud de tangencia donde $u_2 < 1.57$ y $p_2 > 0$. Para un aparejo con dos estabilizadores no hay solución cuando $u_1 > 1.57$, $p_{c1} < 0$, $u_2 > 1.57$ y $p_{c2} < 0$, excepto al final de la longitud de tangencia donde $u_3 < 1.57$ y $p_3 > 0$.

Esta técnica de análisis para aparejos no es permitida en agujeros con curvatura ni tampoco maneja casos en los cuales la tangencia ocurre entre la barrena y el primer estabilizador o entre los dos estabilizadores. Además el agujero debe ser calibrado constantemente. Adicionando demasiado peso sobre la barrena no es una solución ya que los lastrabarrena usualmente alcanzan la tangencia entre la barrena y el primer estabilizador o entre los dos estabilizadores, esta técnica es solo en 2D y condiciones estáticas y no se toma en cuenta la componente direccional de la magnitud de la fuerza, tampoco hay solución si el punto neutro esta ubicado por debajo de la longitud de tangencia. En esta técnica de solución la longitud de las aletas es ignorada y se asume que el estabilizador en su totalidad es el punto de contacto.

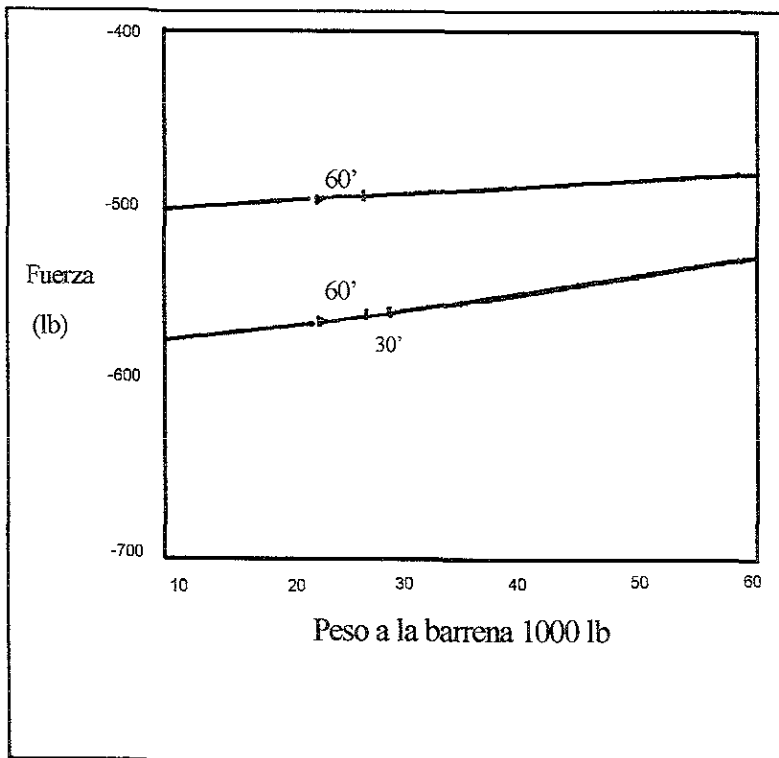


Figura 2.13 Efecto del estabilizador en un agujero de $12\frac{1}{4}$ ", 8" de lastrabarrena y 10° de inclinación³

Aun con todas estas restricciones esta técnica puede proporcionar un conocimiento básico de la mecánica del numero de configuraciones de los aparejos y puede auxiliarnos en cierta forma para explicar como se comportan los aparejos para diferentes diámetros de agujeros, inclinaciones, diámetros de lastrabarrenas y el peso aplicado sobre la barrena

II.7 MECÁNICA BASICA DE LA SARTA DE PERFORACIÓN

Muchos de los principios de los análisis de la desviación del pozo fueron dados por A. Lubinski⁷. Durante los años 50's, se desarrollaron técnicas para resolver una variedad de problemas de desviación considerando la mecánica de la sarta y la geología. Se publicaron una serie de artículos que contienen a la vez la teoría y monogramas para los cálculos de la deformación de la sarta de perforación, determinación de las fuerzas laterales en la barrena, predicción de la desviación del pozo, control de la severidad de la pata de perro y la colocación óptima de los estabilizadores

Usando matemáticas aplicadas y la teoría de elasticidad, Lubinski verificó muchos de los fenómenos de desviación del pozo ya observados en campo. Su trabajo aún perdura y es la base para estudios subsecuentes.

Lubinski determino los valores críticos del peso sobre barrena (PSB) requeridos para provocar una deformación en una longitud dada de lastrabarrenas. La deformación lleva a altos momentos de pandeo, aceleración de fallas por fatiga y desviación del pozo.

Él sostuvo que la selección cuidadosa de los componentes del aparejo de fondo(BHA) combinado con el correcto peso sobre barrena(PSB) es esencial para minimizar los problemas de desviación.

Sugiere además perforar pozos de diámetro grande con lastrabarrenas lo más grande posibles, en áreas donde la desviación natural es un problema.

Los lastrabarrenas más grandes aumentan la rigidez del aparejo y minimizan el espacio entre los lastrabarrenas y la pared del pozo. Otro resultado bien conocido con los trabajos de Lubinski involucra la anisotropía de la roca

Muchos de los trabajos de Lubinski están relacionados con aparejos lisos en pozos verticales o ligeramente inclinados. Posteriormente, amplio parte de su trabajo para incluir inclinaciones del pozo más grandes y aparejos empacados

Los resultados indican que se obtuvieron incrementos de 20 a 50% en el peso sobre barrena permisible cuando se coloca un estabilizador en el aparejo de fondo. El estabilizador se debe colocar por lo menos a uno o dos pies de una posición óptima para obtener los beneficios. También proporcionó monogramas para determinar la posición requerida del estabilizador

Murphey y Cheatham⁸ introdujeron una correlación de variables físicas para observar como los diferentes factores afectaban la desviación del pozo. Ampliando los trabajos de Lubinski, ellos usaron la teoría de viga-columna elástica convencional junto con el concepto de anisotropía de la formación para obtener un modelo para la predicción de la desviación en dos dimensiones. Los factores incluidos en el modelo son: rigidez de los lastrabarrenas, claro radial, peso sobre barrena (PSB), localización del estabilizador y características de la formación. El modelo determina la curvatura del pozo utilizando parámetros dimensionales, en forma similar a la aproximación de Lubinski.

Los autores hacen hincapié en que el entendimiento de los principios de la desviación y el comportamiento mecánico de la sarta de perforación es esencial para el diseño de las barrenas y aparejos de fondo (BHA).

II.8 MODELOS BÁSICOS DE APAREJOS DE FONDO

Uno de los primeros modelos numéricos para la predicción de la desviación de un pozo fue desarrollado por Nicholson⁹ en la Universidad de Tulsa. El modelo consistió en una representación del aparejo de fondo (BHA) con el método del elemento finito. Usando la teoría elástica y la técnica de función restringida para

minimizar la energía potencial de un sistema restringido, el modelo puede resolver los desplazamientos de una sarta de perforación estática dentro de un pozo.

Los desplazamientos son entonces usados para determinar las fuerzas que actúan en la barrena. Nicholson asumió que las fuerzas resultantes sobre la barrena pueden indicar la trayectoria del pozo. Varias comparaciones hechas con soluciones analíticas y aparejos de campo demostraron una excelente concordancia en la curvatura del pozo

Casi al mismo tiempo que Nicholson creó su modelo de computo en la Universidad de Tulsa, Fisher¹⁰ introdujo un programa similar en la compañía Shell, llamado SCHADS. Este modelo está basado en la ecuación diferencial no lineal de 4º orden de la deflexión de una viga elástica, similar a la de Nicholson, pero usa una técnica de solución de diferencia finita.

El programa calcula los desplazamientos de fuerzas sobre la barrena y las fuerzas de contacto, permitiendo que se varíen los diámetros del agujero y los componentes del aparejo SCHADS es un ligero refinamiento del modelo de Nicholson

En 1974, Wolson¹¹ desarrolló en la Universidad de Tulsa otro programa de análisis sobre aparejos de fondo, mejoró substancialmente el modelo de Nicholson al extender su aplicación a pozos con curvatura en tres dimensiones. Varias predicciones de la trayectoria para aparejos de fondo concordaron con los resultados observados en el campo, así como con Nicholson, Wolson recomendó realizar trabajos adicionales para incluir las fuerzas de fricción y la interacción roca barrena

Milheim, Jorden y Ritter¹² También crearon un modelo de predicción de la desviación en tres dimensiones, basado en el método de elemento finito (FEM). El programa llamado MARC, es un esquema de análisis estático el cual permite que varíe la geometría del aparejo de fondo, las cargas, las propiedades de los materiales y las condiciones de frontera. Los autores notaron que tanto la

deformación axial como la lateral (fuera de plano), deben estar ligadas cuando los efectos de deformación grandes, son predominantes en agujeros con curvatura. Ellos sugirieron el uso de elementos curvos en agujeros con curvatura y elementos rectos en agujeros verticales cuando se construye el aparejo de fondo con el modelo de elemento finito. El modelo MARC utilizó un elemento elástico "diferencial" para monitorear el contacto de los lastrabarrenas con la pared del pozo y determinar las fuerzas de contacto.

Sutko¹³ modificó el modelo de Nicholson y analizó varios aparejos en el campo Dubai, comparó las fuerzas resultantes calculadas en la barrena, con las trayectorias observadas en el campo y obtuvo concordancia en 6 de 7 comparaciones en agujeros de $12 \frac{1}{4}$ ". Las pruebas en agujero de $17 \frac{1}{2}$ ", fueron menos exactas.

EL modelo de cómputo generalmente exageró las predicciones de los ritmos de incremento. Sutko concluyó que los aparejos más rígidos dan resultados menos exactos usando el modelo numérico, introdujo una "longitud de interpretación" basado en la rigidez del aparejo de fondo sobre la cual ocurre el cambio de ángulo resultante. Para una rigidez del aparejo de fondo - barrena, entre 400 - 500 pg^2 , sólo requiere 100 pies o menos para cambiar ángulo.

Milheim¹⁴ en una serie de ocho artículos proporcionó un estudio extenso de la mecánica de los aparejos de fondo con soluciones prácticas para problemas operacionales involucrando herramientas desviadoras y varios arreglos de estabilizadores y su colocación respecto a la barrena. Los resultados se verificaron en un programa estático de tres dimensiones basado en el método de elemento finito (FEM).

De la misma manera Toutain¹⁵ publicó en una serie de tres artículos un estudio sobre el sistema de conexión de los estabilizadores y los resultados de un programa de predicción de la trayectoria, Toutain concluyó que la fricción acentúa la tendencia al giro del aparejo de fondo, pero el giro es independiente al claro radial barrena-pared del pozo o de la erosión del agujero.

II.9 MODELOS TRANSICIONALES DE APAREJOS DE FONDO.

A mediados de los 80's, los avances en la "capacidad computacional" y el perfeccionamiento de los investigadores para utilizar computadoras en las tareas del modelado, condujo a tener diferentes modelos de aparejos de fondo en la literatura. Estos programas transicionales incluyeron mucha de la teoría de los primeros modelos, con mejoramiento en las técnicas numéricas y una representación más adecuada de la estructura de los aparejos de fondo.

Uno de los primeros modelos que tomo en cuenta la interacción dinámica roca - barrena con un análisis dinámico del aparejo, fue el de Baird y colaboradores¹⁶. El programa de análisis dinámico llamado GEODYN fue uno de los de mayor auge en el desarrollo de los algoritmos sofisticados para el análisis transicional de la interacción roca barrena. GEODYN permite la observación de los tiempos de respuesta de la fuerzas en la barrena, torque, movimiento, penetración y tendencias direccionales.

Williamson y Lubinski¹⁷ diseñaron un programa para la predicción de la trayectoria, el cual incluye los parámetros geológicos anisotrópicos. Los autores están de acuerdo que para la predicción de la trayectoria, el aspecto más importante es la relación entre el análisis de la sarta de perforación y la interacción barrena formación. Ellos creen que la perforación se desarrolla en la dirección de la fuerza resultante sólo en rocas no sedimentaria. En rocas sedimentarias se necesita considerar la permeabilidad paralela y perpendicular a los planos de la estratificación. Así mismo, establecieron un importante axioma. Los resultados de cualquier programa de aparejo de fondo, darán información útil de la trayectoria, sólo en función de la exactitud de los datos de entrada.

Un artículo presentado en 1986 por Rafie, Ho y Chandra¹⁸, resalta el respaldo matemático que gobierna un análisis de tres dimensiones en la sarta de perforación con la teoría de deformación. Los autores concluyeron que los agujeros con curvatura tienen una gran influencia en la respuesta del aparejo de fondo debido a que este tiene una tendencia natural a regresar al perfil recto. La

curvatura del agujero en el plano inclinado no tiene efecto sobre la respuesta del azimut y viceversa. En este artículo no se presenta ninguna comparación de campo para validar el modelo.

El primer intento para analizar los motores de fondo con sustituto curvo fue el de Brett y colaboradores¹⁹. El modelo calcula la trayectoria basada tanto en las fuerzas laterales en la barrena como en la inclinación de ella, en correspondencia con un modelo de penetración lateral. Los motores de fondo con sustituto curvo son tomados en cuenta dentro de la estructura de elemento finito con el uso de un sistema de ejes global de dos coordenadas. Esto es, los ejes globales rotan con el sustituto curvo como referencia para todos los componentes del aparejo de fondo abajo del sustituto. Arriba del sustituto los ejes globales permanecen sin cambio. Los autores reportaron una buena exactitud en la predicción de la inclinación cuando se probaron aparejos de campo en localizaciones donde se sabe que la influencia geológica es muy poca. (Zonas isotrópicas).

Con intención de crear un programa de predicción de la desviación exacto, Jogi, Burgess y Bowling²⁰ diseñaron un programa de dos dimensiones incorporando un concepto de "equilibrio". Este nuevo programa tiene la intención de ser un enlace entre los modelos de dos dimensiones menos exactos y los modelos dinámicos de tres dimensiones que más tiempo consumen. El programa determina la curvatura en la cual las fuerzas laterales sobre la barrena tienden a cero. En esta curvatura de equilibrio cualquier desviación deberá causar un incremento de las fuerzas en la barrena, en un giro repentino del aparejo por retornar al equilibrio.

Comparaciones de campo usando 17 aparejos de fondo muestran que el modelo puede predecir la curvatura de inclinación dentro de los 0.4° por cada 100 pies en un 82 % de los casos. Los autores mencionan que el análisis del azimut es ignorado debido a que ellos no encontraron un camino confiable para predecir las tendencias de giro basados en la descripción del aparejo de fondo y la geometría del pozo.

La técnica de curvatura de equilibrio fue también el tema de estudio en dos artículos más: Birades y Fenoul²¹ seguidos por Birades²². El primero de los dos artículos introduce el ORPHEE 2D que es un programa estático de dos dimensiones basado en el método de elemento finito, capaz de predecir el comportamiento de los aparejos de fondo en una curvatura inclinada equilibrada. Los autores reconocen que el modelo no puede determinar la distancia sobre la cual el aparejo debe perforar para alcanzar el ritmo de curvatura de equilibrio.

El segundo artículo describe el ORPHEE 3D Dinámico y el ORPHEE 3D Estático. Estos programas son modelos de tres dimensiones para la predicción de la desviación basados en el ORPHEE 2D original. Los autores concluyeron que para comparaciones de campo, los factores de mayor importancia que afectan la trayectoria, son el agrandamiento del agujero y el coeficiente de fricción.

El agrandamiento del agujero afecta más a los aparejos de incremento de ángulo que a los aparejos para decremento de ángulo. Cuando se tiene un agrandamiento "crítico", los aparejos de incremento de ángulo invierten su comportamiento convirtiéndose en aparejos para decremento de ángulo. Birades sugiere que el agrandamiento del agujero puede ser el factor causante del caminado a la izquierda y a la derecha observado en la perforación con motor de fondo y la perforación rotatoria respectivamente.

Durante la perforación con motor de fondo el aparejo de fondo gira lentamente y los estabilizadores cuando mucho hacen pequeñas erosiones en la pared del pozo. En la perforación rotatoria, los estabilizadores causan agrandamiento del agujero sobrepasando en ocasiones el valor crítico del agrandamiento para el azimut, ocasionando que el aparejo camine a la derecha.

Ho²³ presenta una versión mejorada del modelo DIDRIL. Presentado en 1986 junto con sus colaboradores. El nuevo modelo incorpora no linealidades dentro de la teoría de deformación.

El autor resumió varios aspectos del análisis de aparejos de fondo, requeridos para una adecuada predicción de la trayectoria.

- Efectos básicos de la curvatura del pozo.
- Propiedades variables de las secciones
- Variación del peso sobre barrena (PSB) y torque de la barrena (TOB)
- Variación de la colocación del estabilizador.
- Simulación adecuada de las restricciones del agujero.
- Ninguna linealidad en la formación.
- Interacción roca-barrena.
- Dinámica.

Ho no reporta ningún intento por verificar el programa, con aparejos de campo.

Brakel construyo un sofisticado programa con (FEM) para el análisis dinámico del aparejo de fondo y la interacción dinámica roca - barrena. El modelo está basado en el programa de Wolfson, con muchas mejorías en las técnicas del modelado y en las rutinas de solución numéricas.

El modelo de Brakel usa un algoritmo de solución iterativo por eliminación gaussiana, para resolver los desplazamientos del aparejo de fondo. El pozo es simulado adicionando resortes elásticos a cada nodo de la malla del elemento finito. El modelo de Brakel obtiene predicciones relativamente precisas cuando se compara con datos de campo, aunque tiende a sobrepredecir la respuesta de la inclinación del aparejo de incremento de ángulo.

El modelo dinámico para la interacción roca - barrena, indica correctamente la respuesta contraria al azimut observada cuando se usan barrenas tricónicas y barrenas de diamantes compactos policristalinos (PDC). Las barrena tricónicas

tienden a caminar hacia la derecha y las barrenas (PDC) tienden a caminar hacia la izquierda.

Brakef determinó que la velocidad de rotación no tiene efectos significativos en la inclinación del aparejo de fondo o respuesta al azimut. El parámetro determinante en la predicción de la trayectoria de un aparejo de fondo es el agrandamiento del agujero

II.10 MODELOS ACTUALES DE APAREJOS DE FONDO

Los siguientes programas son separados de los modelos transicionales por dos razones. los programas son los más recientes reportados en la literatura y son capaces de analizar modernas herramientas de perforación direccional con aparejos de fondo.

Las modificaciones al programa ORPHEE 3D, previamente mencionado son descritas en un artículo de Birades y Gazanio²⁴. La nueva versión del ORPHEE 3D puede evaluar sustitutos curvos, cajas curvas, motores de fondo, juntas universales de doble inclinación y otras herramientas con un codo o doblez. La técnica de solución permanece igual a la primera versión, dependiendo de la aproximación de la curvatura de equilibrio para determinar la trayectoria del aparejo de fondo en cuestión.

Los resultados de estudios paramétricos muestran que el programa es insensible al agrandamiento del agujero, cuando el sustituto curvo esta inclinado en el aparejo de fondo.

El modelo puede determinar un "ángulo crítico mínimo" requerido en un sustituto curvo para dar incremento de ángulo a un aparejo. Además, se calcula la *localización óptima del sustituto para una máxima eficiencia*. Para un ritmo de incremento dado el ángulo del sustituto es minimizado cuando se coloca en la posición óptima.

El aspecto más interesante del programa ORPHEE 3D es la técnica de correlación de campo. Para obtener predicciones exactas de la trayectoria la rigidez del motor de fondo con sustituto curvo se maneja como un parámetro de ajuste.

Los autores establecieron que los espacios libres en el mecanismo interno del motor generalmente se desconocen. Usando la rigidez del motor como una variable, permite la determinación de la rigidez efectiva y mejora la predicción de los aparejos de fondo.

Un modelo numérico que simula el comportamiento no lineal de un aparejo de fondo, es descrito en un artículo escrito por Williams, Apostal y Haduch²⁵. Este programa incorpora herramientas dirigibles, estabilizadores excéntricos, y un esquema de "predicción de la perforación".

El modelo implementa multiplicadores de Lagrange y modelos de función restringida para simular herramientas excéntricas y restricciones del pozo, respectivamente. Las siguientes son características importantes del modelado de predicción de la perforación con aparejo de fondo:

- Variación de la orientación del aparejo de fondo entre 0 y 180° a la izquierda o derecha de la cara más alta de agujero
- Estimación del torque en el motor de fondo debido a las fuerzas aplicadas en la cara de la barrena.
- Versatilidad con el manejo de sustitutos curvos, herramientas excéntricas y el uso de cojinetes colocados en cualquier parte del aparejo de fondo.

Este programa en particular está diseñado para funcionar en dos modos:

- El primer modo es un modelo único, donde la deformación del aparejo de fondo es calculada en una parte dentro del pozo.

- El segundo modo es un modo de predicción de la perforación, donde las soluciones fuerza-desplazamiento del primer modo son usados para predecir el comportamiento de la trayectoria del aparejo de fondo.

II.11 MODELOS PARA ROCA ANISOTROPICA

Para la predicción exacta de la desviación del agujero los parámetros geológicos deben ser tomados en cuenta. Hay una variedad de conceptos y modelos los cuales intentan incorporar la geología dentro de los modelos para la predicción de la trayectoria. Los siguientes artículos están resumidos para resaltar las diferentes teorías y técnicas. Como ya se dijo anteriormente el trabajo de Lubinski contribuyó significativamente tanto para la mecánica del aparejo de fondo como para la anisotropía de la roca. En diferentes artículos Lubinski y coautores apoyaron el concepto de perforabilidad variable de la roca, ellos introdujeron el "índice anisotrópico".

El índice anisotrópico es definido como la diferencia relativa entre las perforabilidades paralela y perpendicular a los planos de estratificación. El índice anisotrópico es tradicionalmente representado por la variable h . Este índice es diferente de h' , que es la relación efectiva de la perforabilidad paralela con la perpendicular.

Si h es igual a 0.1 la perforabilidad paralela en el fondo es 10% más baja que la perforabilidad perpendicular a los estratos, de este modo resulta que h' Es igual a 0.9. Conforme h tiende a 0 las formaciones llegan a ser isotrópicas.

Lubinski derivó ecuaciones usando el índice anisotrópico, inclinación del estrato y ángulo del agujero para modificar la reacción de las fuerzas en la barrena y causar que el aparejo de fondo tienda a incrementar el ángulo, lo cual es observado comúnmente en el campo.

Lubinski desacreditó la creencia de que los agujeros se desvían sólo debido a la inclinación de los estratos. Él afirma que incluso en las rocas isotrópicas no se

puede perforar un agujero vertical con una sarta de perforación elástica, amenos que los pesos aplicados en la barrena sean extremadamente bajos y no rentables.

En un estudio experimental sobre anisotropía de la roca Chenevert y Gatlin²⁶ examinan la dependencia direccional de las propiedades elásticas en rocas sedimentarias laminadas. La investigación se hizo utilizando una celda triaxial para impartir diferentes estados de esfuerzos en los núcleos al mismo tiempo que se mide la deformación, son calculados los parámetros elásticos tales como el módulo de Young y la relación de Poisson

Los resultados demuestran que las rocas estratificadas pueden ser representadas por seis constantes elásticas en lugar de las nueve constantes normales requeridas para un sistema de tres ejes ortogonales fig. 2.14 sólo son requeridas seis constantes debido a la naturaleza homogénea de la roca dentro del plano de los estratos (plano X-Z)

Los autores también descubrieron que los núcleos de areniscas y lutitas son débiles tanto a la compresión como a la tensión paralela a los estratos.

Ninguna conclusión fue hecha en lo concerniente a la perforabilidad relativa de la roca en diferentes direcciones, ni fueron representadas ecuaciones para la predicción cuantitativa de las propiedades elásticas

Un segundo análisis experimental fue hecho por McLamore y Gray²⁷. Ellos diferenciaron los efectos de crucero y la propiedades de anisotropía en estratos de roca. Las pruebas indicaron que la naturaleza anisotrópica de la roca disminuye conforme la presión de confinamiento aumenta.

En un artículo más orientado a la perforación, Bradley²⁸ resaltó cualitativamente los problemas de desviación atribuidos a la mecánica de la sarta de perforación y la interacción roca barrena

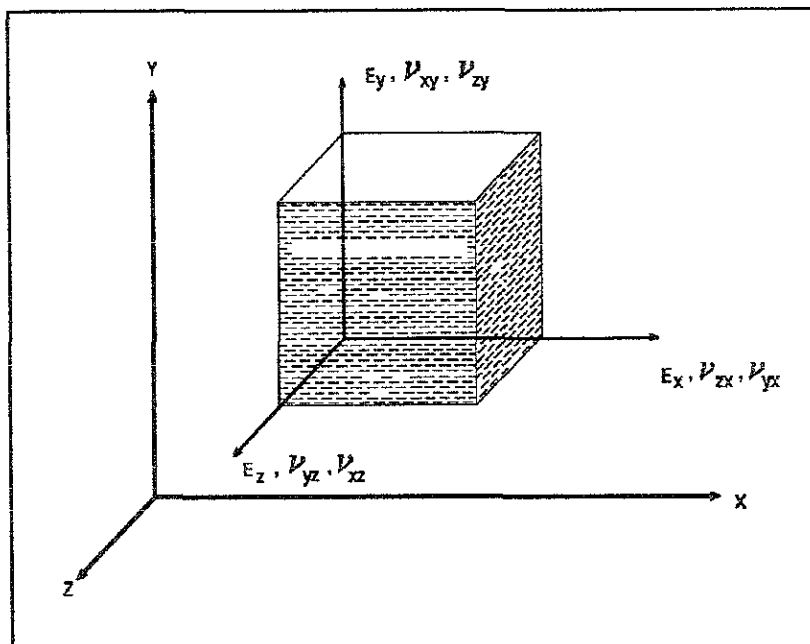


Figura 2.14 Propiedades de las rocas en tres dimensiones⁴⁰

Bradley resaltó cualitativamente los problemas de desviación atribuidos a la mecánica de la sarta de perforación y a la interacción roca barrena.

Bradley sugiere que son tres factores los que afectan a la desviación del agujero:

- Flexibilidad de la sarta de perforación.
- Comportamiento de la barrena.
- Anisotropía de la formación.

Él introduce una relación de perforación representando la capacidad de las barrenas para perforar preferencialmente en la dirección axial.

Brown, Green y Sinha²⁹ discutieron varias teorías cualitativas de la interacción roca-barrena. Los autores sugirieron dos modificaciones a los programas de análisis de los aparejos de fondo existente, usados para la predicción de la desviación:

- Las condiciones de frontera de la barrena deben permitir la flexibilidad de movimientos dentro del agujero y no mantener la barrena en el centro de él
- Es necesaria una serie de soluciones a profundidades mayores para predecir la trayectoria exacta, en cada nuevo incremento el desplazamiento y las fuerzas pueden ser determinadas y aplicadas en el siguiente segmento de profundidad.

La primera modificación permitirá una solución más realista del movimiento de la barrena cuando el aparejo de fondo se deforma dentro del pozo. La segunda modificación da razón de la curvatura del pozo arriba de la barrena, la cual afecta la respuesta mecánica del aparejo de fondo conforme el aparejo de fondo avanza en la perforación.

Un trabajo teórico de Cheathan y Ho³⁰ introdujo un modelo matemático para predecir la dirección resultante de la perforación con una barrena en rocas anisotrópicas. El modelo describe una formación rocosa mediante tres constantes, las cuales representan los ritmos de perforación en tres direcciones ortogonales.

Este trabajo esta basado en Bradley²⁸, donde se discutió la mecánica de la sarta y la contribución de la formación a la desviación. Cheathan formuló un proceso de perforación en tres dimensiones. Relacionó el ritmo de penetración (ROP) con las fuerzas de la barrena y la perforabilidad de la formación en tres dimensiones por medio de matrices de tres por tres.

Hay varios parámetros "desconocidos" que necesitan ser determinados a partir de datos experimentales antes que el modelo pueda ser aplicado en operaciones de campo.

Un modelo mucho más fácil para implementar con programas de aparejos de fondo modernos, es presentado por Xunyao³¹. Se deriva una ecuación que simplifica el cálculo de una fuerza de desvío de la formación. La fuerza de desviación es aplicada en la barrena con una fuerza externa. La fuerza de la formación altera el vector de la fuerza resultante que actúa en la barrena, causando que ésta perfora en una dirección ligeramente diferente a la que se tendría si la formación fuera isotrópica.

Hay una variable desconocida en el modelo de Xunyao, el índice anisotrópico, el cual debe ser determinado por ensayo y error. Este sencillo modelo determina el efecto de la inclinación de la formación y la anisotropía sobre la barrena y es fácilmente ligado con los resultados de un análisis numérico de aparejos de fondo.

Ninguna conclusión está dada con respecto al ritmo de cambio de ángulo del aparejo de fondo por experiencia. Varias comparaciones son hechas con datos de campo de aparejos tipo péndulo. El modelo semeja las curvaturas observadas en campo; obteniéndose mejor semejanza con la variación del índice anisotrópico.

Otro modelo de perforación direccional roca-barrena lo desarrolló Ho³² el cual toma en cuenta la mecánica del aparejo de fondo y la influencia de la formación. Propone un programa el cual combina la mecánica del aparejo de fondo, anisotropía de la barrena y anisotropía de la roca.

Este modelo debe ser usado primero de manera inversa para determinar los índices de Anisotropía de la roca y de la barrena a partir de datos de campo. Entonces, puede ser corrido de manera más amplia para las predicciones de la perforación.

Ho enfatiza la necesidad de un modelo de predicción de la perforación tomando en cuenta la curvatura predeterminada del pozo. Conforme la barrena perfora, la sarta de perforación permanece bajo la influencia del cambio continuo de la curvatura del pozo arriba del nuevo agujero. Un mejor programa de predicción de

la perforación analizará repetidamente la sarta de perforación a intervalos sucesivos de profundidad aplicando las fuerzas actualizadas en la barrena a medida que ellas varíen con la profundidad.

En conclusión, Ho destaco la necesidad de contar con un programa confiable para la mecánica de los aparejos de fondo en tres dimensiones y la necesidad de contar con datos geológicos de campo precisos. Sin un modelo confiable de aparejo de fondo y datos de campo seguros los índices predeterminados darán resultados pobres cuando sean usados para la predicción de la perforación.

II.12 MODELOS DE INTERACCION ROCA-BARRENA³⁹

Los modelos de interacción roca barrena incorporados dentro de los modelos de perforación cuasi-estáticos son tratados brevemente a continuación. Se presenta la teoría y el desarrollo; los investigadores originales son referenciados si se desea una información adicional.

II.13 MODELO DE BARRENA DE CONOS³⁹

Una barrena de conos contiene componentes integrales móviles (conos); cada cono contiene múltiples hileras circulares de dientes y cada hilera puede contener múltiples dientes. Cuando la barrena de conos gira la sucesiva repetición de los dientes que golpean la roca crean la acción de corte deseada.

Para cuantificar al movimiento de los dientes de la barrena, se requieren de complejas ecuaciones analíticas; un modelo desarrollado por Ma y Azar³³ es capaz de evaluar el numero de dientes en contacto con el fondo del agujero, la posición del diente en forma instantánea y la velocidad instantánea del diente conforme gira la barrena. Los autores advierten que el movimiento de la barrena es un proceso aleatorio, sin embargo los valores promedio de la barrena y la velocidad del cono pueden ser usados para evaluar las posiciones de los dientes con un error razonable.

El modelo de Ma y Azar es usado para inicializar y darle seguimiento a los vectores de posición de los dientes: (Z_{ijk}) posición de longitud, (θ_{ijk}) posición angular, (ρ_{ijk}) posición radial de cada cono (i), fila (j) y diente (k). La posición de los vectores es evaluada mediante las siguientes ecuaciones:

$$Z_{ijk} = Z_0 - h_{ij} \sin(\beta) - r_{ij} \cos(\beta) \cos(\alpha_{ijk})$$

$$\theta_{ijk} = \theta_0 - \frac{2\pi(i-1)}{3} - \arctan\left(\frac{r_{ij} \sin(\alpha_{ijk}) - S}{C_{ij} + r_{ij} \sin(\beta) \cos(\alpha_{ijk})}\right)$$

$$\rho_{ijk} = \sqrt{(C_{ij} + r_{ij} \sin(\beta) \cos(\alpha_{ijk}))^2 - (r_{ij} \sin(\alpha_{ijk}) - S)^2}$$

$$C_{ij} = C_0 - h_{ij} \cos(\beta)$$

donde:

- Z_0 = posición de la longitud de la barrena,
- h_{ij} = posición de la longitud del diente,
- β = ángulo de trabajo del cono
- α_{ijk} = posición angular del diente,
- r_{ij} = posición radial del diente,
- θ_0 = posición angular de la barrena,
- C_0 = distancia del cono al centro.
- S = excentricidad.

Como la barrena esta girando, las ecuaciones anteriores son usadas para monitorear cuando el diente hace contacto con la formación bajo las condiciones de carga sobre la barrena. Un modelo de penetración puede ser usado para determinar las fuerzas que actúan sobre un diente de forma individual.

El modelo de penetración utilizado en el análisis de la barrena de conos fue desarrollado por McLamore³⁴. Dicho modelo caracteriza la penetración de una cuña pequeña dentro de una roca anisotrópica, de ahí el nombre de "modelo de penetración de cuñas". El modelo de penetración fue desarrollado con la suposición de que; cuando una cuña penetra la roca los esfuerzos de los planos de falla en cada uno de los lados de la cuña se dan con un equilibrio estático. La evidencia generada por McLamore indica que la teoría fuerza-variable-cohesiva (una forma modificada de la teoría de Mohr-Coulomb³⁵) es cierta solo a lo largo de los planos de falla. Basado en el estado de criterio de falla, el autor deriva la siguiente expresión para una fuerza de penetración que actúa paralelamente al eje de la cuña:

$$F_p = \frac{2\tau_s H \sin(\beta_t) \cos(\phi)}{\cos^2\left(\frac{\frac{\pi}{2} + \beta_t + \phi}{2}\right)}$$

donde

- F_p = fuerza de penetración,
- H = profundidad de penetración,
- τ_s = resistencia de la roca,
- β_t = mitad del ángulo de la cuña,
- ϕ = ángulo de fricción interna de la roca.

La ecuación de McLamore solo permite determinar las fuerzas de penetración que actúan paralelamente sobre el eje de cada diente de penetración. Para considerar la excentricidad del cono se necesita de otro modelo para realizar los cálculos.

Los experimentos conducidos por Peterson³⁶, fueron diseñados para determinar las componentes de las fuerzas que actúan sobre las estructuras de los dientes, en estos experimentos Peterson midió las fuerzas normal, lateral y de rodamiento que actúan sobre una cuña sencilla de acero cuando esta rueda sobre diversos especímenes de roca, bajo distintas condiciones de carga. Los experimentos

muestran que el ángulo de ataque de la cuña, en efecto, reduce la fuerza de carga vertical e incrementa la fuerza de carga lateral, Peterson desarrollo la siguiente ecuación de rango de fuerza para estimar la reducción en la fuerza de penetración cuando una barrena de conos esta excentrada

$$\frac{F_p(\beta_s)}{F_p} = 1 - \left(\frac{S}{8}\right) \left(\frac{r_c}{b}\right) \sqrt{\frac{2H}{r_c}} \sin(\beta_s)$$

donde:

- $F_p(\beta_s)$ = fuerza de penetración del diente,
- r_c = radio del cono en el diente,
- b = ancho del diente,
- H = profundidad de penetración del diente,
- β_s = ángulo de ataque.

Peterson no derivo una ecuación para determinar el incremento de la fuerza lateral alrededor del diente de ataque, aunque presento los datos de la fuerza lateral recolectados durante las pruebas de corte. Brakel presento una ecuación para aproximar esta fuerza ($F_s(\beta_s)$) la cual es derivada gráficamente de los datos de Peterson (las variables se definieron anteriormente):

$$\frac{F_s(\beta_s)}{F_p(\beta_s)} = (0.35) \tanh\left(\frac{\beta_s}{10}\right)$$

Como en el análisis PDC, las fuerzas que actúan en cada diente deben ser transformadas en fuerzas que actúen sobre el nodo de la barrena. Una vez que las fuerzas, (de cada diente que tiene contacto con la formación), son sumadas los vectores de fuerza resultantes que actúan sobre la barrena son cuantificados, estos vectores de fuerza sobre la barrena son entonces aplicados a un nodo anterior del aparejo como una carga externa.

El modelo de barrena de conos (RLC) fue probado usando una barrena tipo (F) con los parámetros físicos mostrados en la tabla 4. La resistencia de la roca, el

El modelo de barrena de conos (RLC) fue probado usando una barrena tipo (F) con los parámetros físicos mostrados en la tabla 4. La resistencia de la roca, el ángulo de fricción interna y peso sobre barrena (PSB) son mantenidos constantes a menos que sean cambiados como variables dependientes. Las pruebas fueron hechas variando solo un parámetro a un tiempo, para observar los cambios en la inclinación de la barrena, el torque y la profundidad de penetración. Una fuerza de inclinación positiva indica una fuerza aplicada hacia el lado superior del pozo mientras que una fuerza de azimut positiva indica una fuerza aplicada hacia el lado izquierdo del pozo (observado en el fondo del agujero).

II.14 ACOPLAMIENTO DE LOS MODELOS DE INTERACCION ROCA-BARRENA CON EL ANALISIS DE APAREJOS CUASI-ESTATICOS³⁵

Durante el proceso de modificación del código de computadoras todos los cambios al programa cuasi-estático fueron diseñados para permitir el manejo del algoritmo principal, por parte de los dos modelos, como una serie de subrutinas independientes. Con el diseño de un nuevo algoritmo que sea independiente del tipo y subrutinas de la barrena se puede asegurar que:

- Las técnicas y la precisión del código original no sean alterados y el algoritmo del programa sea modular ,
- Futuras modificaciones en el modelo cuasi-estático pueden ser hechas fácilmente y tengan un efecto mínimo en el modelo de barrenas,
- Futuras modificaciones en cualquier modelo de barrenas pueden ser hechas fácilmente y tienen un efecto mínimo en el modelo de aparejos de perforación cuasi-estático,
- Si la barrena no a sido seleccionada para el análisis, el nuevo código puede fallar en el proceso de solución cuasi-estático original.

El algoritmo cuasi-estático comienza con la inicialización de todas las dimensiones de los componentes del aparejo, las uniones y la posición global inicial del pozo,

Inmediatamente después el programa verifica que los datos de la barrena sean de acuerdo con el archivo de entrada del tipo de barrena, si los datos de la barrena no están disponibles el algoritmo procede a analizar el aparejo y la perforación como en la versión original del modelo.

Si los datos de la barrena están disponibles y el usuario elige el procedimiento de análisis roca-barrena el programa debe leer el archivo de datos de la barrena apropiado; en este punto la penetración inicial de la barrena en forma estática es calculada para después usarla durante el análisis cuasi-estático, los resultados de la penetración inicial estática son los únicos, de los modelos cuasi-estáticos de interacción roca-barrena que son directamente comparables con los resultados originales del código dinámico. Además de este punto los cálculos de las fuerzas de interacción roca barrena se vuelven dependientes de la posición global de la barrena en el pozo. La subrutina de penetración inicial regresa el control al programa principal, el cual procede con el análisis cuasi-estático del aparejo.

II.15 CONDICIONES BASE EN LAS PRUEBAS PRELIMINARES DE BARRENAS³⁵

Para asegurar una reprogramación correcta de los códigos de los modelos de interacción roca-barrena, tanto en barrenas de conos como PDC, se deben verificar contra los resultados de los códigos dinámicos originales (el código dinámico original de barrenas ha sido anteriormente probado y verificado por Brakel). Los parámetros de control base de la barrena se deben definir para cada juego completo de datos disponibles y deben ser utilizados para todas las barrenas subsecuentes y pruebas de aparejos. La tabla 5 destaca las características físicas para una prueba de barrenas.

BARRENA	MARCA	DIÁMETRO EXTERNO (pg)	NUMERO DE INSERTOS	EXCENTRICIDAD (pg)
			D.E. INSERTOS (pg)	ANCHO DIENTE (pg)
				ANGULO DE DIENTE (°)
				ANGULO DE TRABAJO (°)
A	Reed conos	7.875	na	0.05 0.3 55.0 33.0
B	Stratabit PDC	8.5	33 0.52 -20.0	na
C	Smith conos	8.5	na	0.0 0.3 60.0 35.0
D	Christtensen PDC	8.75	41 0.52 -15.0	na
E	Smith PDC	12.25	51 0.52 -15.0	na
F	Smith conos	12.25	na	0.2 0.5 60.0 32.5

Tabla 4 Características de las barrenas³⁸

Adicionalmente se incluyen las siguientes condiciones de control:

resistencia de la roca (psi) = 7500 inclinación de la barrena en el pozo = 20°
 ángulo de fricción interna (°) = 34 azimut de la barrena en el pozo = 30°
 carga aplicada - PSB (1000 lbs) = 45

El código cuasi-estático de la barrena fue probado en un modo "autónomo", los datos de fuerza y penetración fueron recolectados para cada barrena y

comparados con los datos recolectados del programa dinámico; las pruebas fueron conducidas con la barrena alineada y centrada en el agujero, estas condiciones de prueba son necesarias para establecer una comparación directa entre el código de barrenas cuasi-estático y el código dinámico (debido a que las técnicas de análisis de barrenas existentes dependen de la orientación del nodo de la barrena en el interior del pozo)

Durante las seis pruebas en tres dimensiones los momentos de las fuerzas calculados por medio del código cuasi-estático tienen los mismos resultados que con el código dinámico, entonces como los resultados del código cuasi-estático son iguales que los resultados del código dinámico solo se muestra un solo juego de resultados. La carga aplicada (45,000 lbs) y la resistencia de la roca se mantienen para todas las pruebas para permitir hacer comparaciones en forma directa. El particular desarrollo de la interacción roca-barrena se debe al estilo y distribución de los cortadores de la barrena. El comportamiento de la barrena puede ser desde un aparejo deformado hasta una barrena no alineada y centrada en el pozo. Note que los valores del torque para la barrena PDC es relativamente alto debido al PSB que se utilizo para realizar las pruebas. En adición las fuerzas de la barrena en el código cuasi-estático fueron verificadas para calcular la misma profundidad de penetración de la barrena que el código dinámico

Así, los programas dinámico y cuasi-estático en el nodo más bajo del aparejo (nodo de la barrena) pueden experimentar las mismas fuerzas de carga iniciales aplicadas en tres dimensiones antes de comenzar el análisis del aparejo. Una vez que ocurre la deformación del aparejo, las fuerzas aplicadas en la barrena pueden fluctuar de acuerdo a las cargas aplicadas y a la posición de la barrena en el agujero.

II. 16 PRUEBAS DE SENSIBILIDAD DE INTERACCIÓN ROCA-BARRENA³⁵

Una serie de pruebas de sensibilidad son hechas para observar la habilidad de los modelos de barrenas de conos y PDC para ajustar la efectividad de la predicción de las fuerzas bajo un amplio rango de parámetros de entrada. Las pruebas de sensibilidad de las barrenas son desarrolladas en un modo "autónomo" para eliminar los efectos de la deformación del aparejo y observar solamente estas fuerzas que se presentan en la interacción roca-barrena. Las condiciones de control base, que fueron previamente descritas, son aplicadas para todas las pruebas variando solo un parámetro durante cada prueba de sensibilidad

Aunque cada barrena puede responder de manera diferente a un amplio rango de parámetros de entrada, el objetivo de las pruebas de sensibilidad fue el de examinar los modelos (y el código) antes que cada mejoramiento relativo de cada barrena. Comparaciones entre pruebas diferentes, para el mismo tipo de barrenas no pueden ser hechas, solo una barrena de cada tipo fue seleccionada para representarla en este reporte y así minimizar los requerimientos de espacio. Todos los resultados son graficados en todo el rango de variables independientes usadas en las pruebas.

II.17 DESARROLLO Y TEORIA DEL MODELO³⁵

El programa de predicción de la trayectoria del aparejo de fondo, involucró varias expansiones y modificaciones al programa dinámico del aparejo de fondo (BHA) con elemento finito de Brakel. El cual creó un algoritmo confiable con elemento finito que da solución a los desplazamientos y fuerzas que actúan sobre un aparejo de fondo confinado. La rutina de solución principal se considera bastante exacta y sirve como base para el modelo de predicción de desviación.

Se diseñaron una serie de modificaciones para permitir una reconstrucción sistemática del programa dinámico. Los objetivos se dividieron en cuatro fases.

- Simplificación del el programa original dinámico de tres dimensiones a un análisis tridimensional cuasi-estático. El modelo cuasi-estático incluido

las fuerzas de fricción en los puntos de contacto, los cuales crean deflexión en el plano del azimut. El análisis cuasi-estático permitirá la simulación del comportamiento dinámico promedio del aparejo de fondo en un tiempo de corrida mucho menor que el modelo dinámico completo

- Incorporación de un plan de perforación adelantado para predecir el incremento/decremento y la tendencia a caminar del aparejo de fondo. El programa dinámico original de los resultados como magnitudes y direcciones de las fuerzas resultantes en la barrena. La aplicación en campo requiere el desarrollo explícito de la inclinación y azimut del aparejo de fondo contra la profundidad.
- Modificación del modelo de elemento finito para modificar el uso de herramientas dirigibles tales como sustitutos curvos y motores de fondo.
- Creación de un menú amigable para el usuario por medio de una interfase entrada/salida. El éxito de un programa altamente técnico depende de la simplicidad en la comprensión de los requerimientos de entrada y los datos de salida. Este último objetivo mejorará la aplicación del programa de predicción de la trayectoria como una herramienta de campo.

II.17.1 MODELO DE ELEMENTO FINITO CUASI-ESTÁTICO³⁵

Como en cualquier programa de elemento finito, la estructura que está siendo modelada se representa por elementos conectados por nodos. Durante la discretización, la estructura se transforma en un arreglo de componentes, reconocido por el código de elemento finito como una malla.

El programa asigna un nodo en la barrena, un nodo en cada parte final de los estabilizadores y cualquier número de nodos a lo largo de la tubería, lastrabarrenas y motores fig. 2 15.

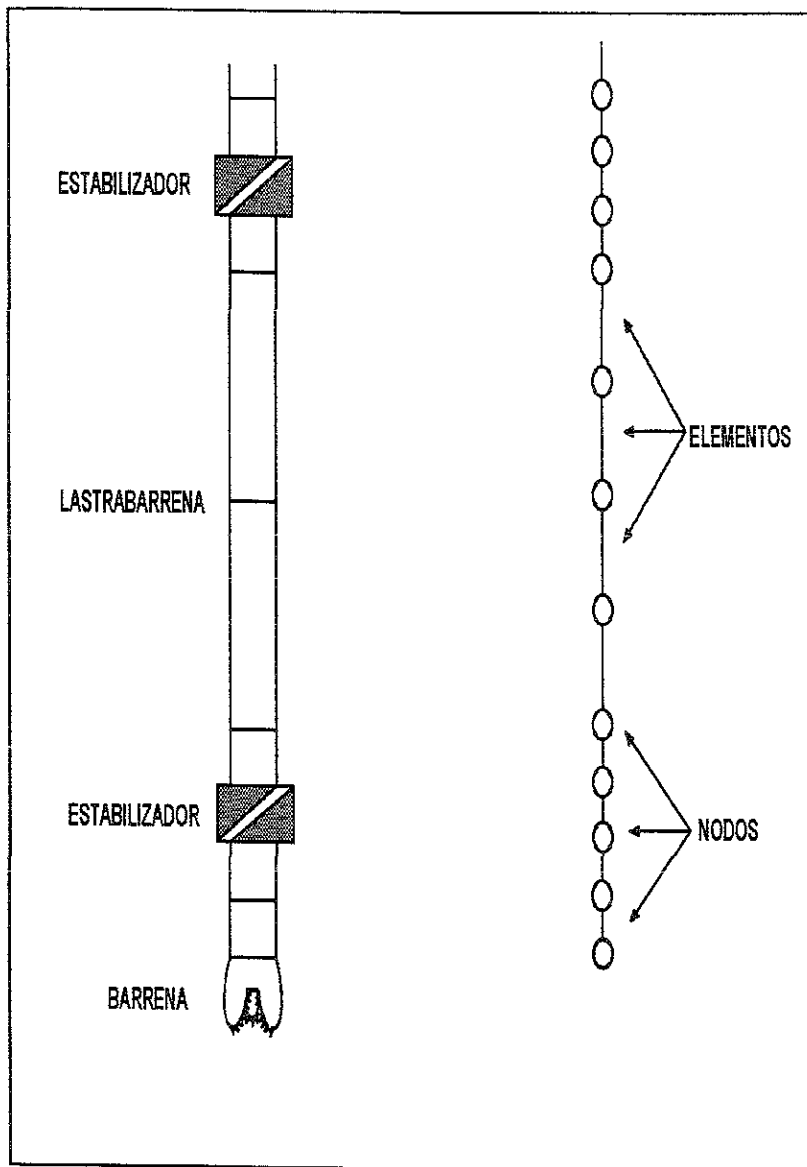


Figura 2.15 Idealización del aparejo de fondo⁴¹

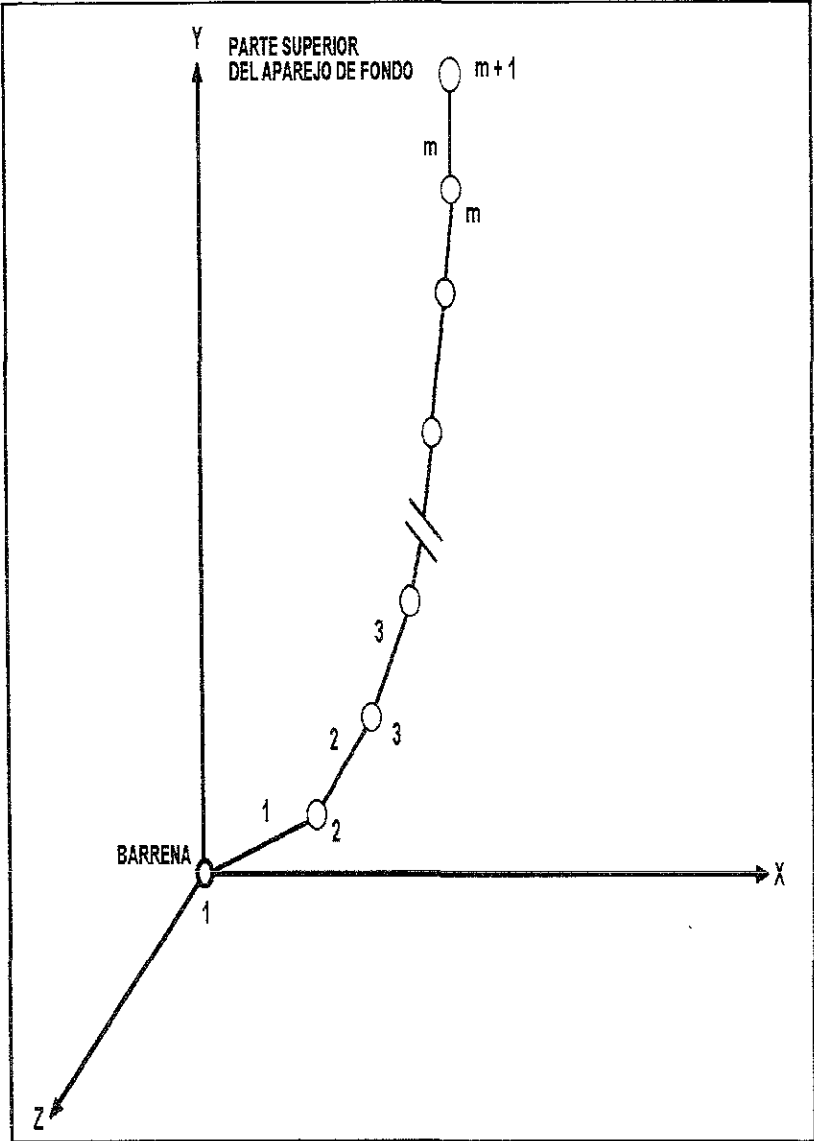


Figura 2.16 Numeración del aparejo del elemento finito⁴¹

El aparejo de fondo automáticamente se ensambla y clasifica desde la barrena hasta la parte superior, siendo la barrena el nodo número 1 y el primer componente el elemento número 1 fig. 2.16 mientras cada nodo y elemento se asigna al aparejo, las dimensiones y propiedades físicas de los componentes también se asignan a los elementos

Las condiciones de frontera requeridas para una solución única al problema de equilibrio se preestablecen en el código del programa por el empleo de muelles elásticos. Manipulando la rigidez traslacional y torsional, se pueden prescribir diferentes condiciones de frontera fig. 2.17

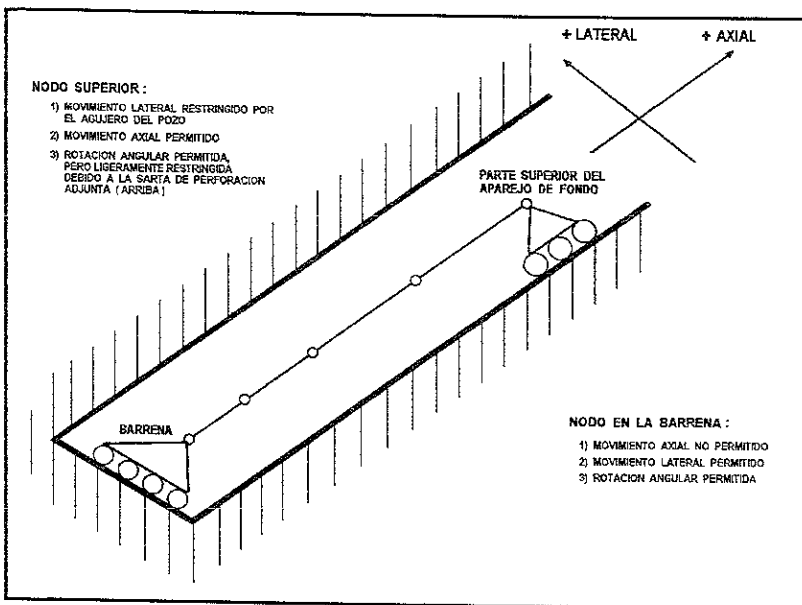


Figura 2.17 Condiciones de frontera (efectiva) del elemento finito⁴¹

Los muelles límite se incorporan en la solución adicionando la rigidez límite al elemento correspondiente (barrena o elemento superior) en el sistema matricial global de rigidez

Para simular el comportamiento de campo, la barrena se restringe en la dirección axial (penetración) mientras se permite el movimiento lateral contra las paredes

del pozo. Se supone que no existe ningún momento entre la barrena y la formación.

En la parte superior del aparejo de fondo, las condiciones de frontera permiten libre traslación lateral. El libre movimiento lateral permite que la parte superior del aparejo descansa sobre el lado inferior del agujero. El movimiento axial y la rotación angular del nodo superior se permiten, pero se restringe ligeramente para simular la conexión con la tubería de perforación en el agujero todos los componentes superiores no requieren permanecer centrados ni paralelos al eje original del pozo.

II.17.2 RELACIONES FUERZA DESPLAZAMIENTO

El programa del elemento finito utiliza elementos de viga tridimensionales para representar los componentes del aparejo de fondo. Las desviaciones fuerza - desplazamiento para elementos de vigas han sido detallados por varios autores^{9,11,24}. La mayoría de las derivaciones se conducen de acuerdo con las siguientes suposiciones.

- Elementos elásticos lineales
- Cargas aplicadas solamente a los nodos
- Rotaciones pequeñas.
- Cizallamiento transversal despreciable
- Torsión- flexión despreciable.
- Simetría en torno a los ejes Y y Z (siendo X axial).

La ecuación de equilibrio de una viga rectilínea en tres dimensiones bajo cargas axiales¹¹

$$EI \frac{d^4 u}{dx^4} - N \frac{d^2 u}{dx^2} = 0 \quad (2.17.1)$$

La solución de Esta ecuación diferencial de 4º orden se muestra en la siguiente notación matricial^{9,11,24}

$$[Fe] = [Ke][Ue] + [Fge] \tag{2.17.2}$$

Donde (Fe) es el elemento vector de fuerza interna, (Ke) es elemento de la matriz de rigidez, (Ue) es el elemento del vector de desplazamiento y (Fge) es el elemento geométrico del vector fuerza.

El vector geométrico de fuerza contiene términos de fuerza que se presentan por la curvatura del elemento, rotación de la cuerda (cople) y el acortamiento final. Fig. 2.17 para los detalles el contenido de (cada elemento) matriz en la estructura de elemento finito puede describirse por la ecuación 2.17.2.

$$\begin{bmatrix} F_{A1} \\ F_{A2} \\ F_{A3} \\ M_{A1} \\ M_{A2} \\ M_{A3} \\ F_{B1} \\ F_{B2} \\ F_{B3} \\ M_{B1} \\ M_{B2} \\ M_{B3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & \lambda_2 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & \lambda_2 \\ 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & -\lambda_2 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_1 & 0 & -\lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_1 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & \lambda_2 & 0 & \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & -\lambda_2 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 \\ -\lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_1 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_2 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_2 \\ 0 & 0 & -\lambda_1 & 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_2 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & \lambda_2 & 0 & \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & -\lambda_2 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_{A1} \\ u_{A2} \\ u_{A3} \\ \omega_{A1} \\ \omega_{A2} \\ \omega_{A3} \\ u_{B1} \\ u_{B2} \\ u_{B3} \\ \omega_{B1} \\ \omega_{B2} \\ \omega_{B3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{AE}{2} \left[\frac{\Delta_2}{L} + \frac{\Delta_1}{L} \right] \\ -\delta_1 F_2 \\ \delta_2 F_8 \\ 0 \\ EI_{E2} \\ EI_{E3} \\ \frac{AE}{2} \left[\frac{\Delta_2}{L} + \frac{\Delta_1}{L} \right] \\ \delta_1 F_{B1} \\ -\delta_2 F_{B1} \\ 0 \\ -EI_{E2} \\ -EI_{E3} \end{bmatrix}$$

Figura 2.18 Ecuaciones y terminos de equilibrio expandido⁹¹

La notación matricial se usa para indicar la relación tridimensional de la solución. Como muestra la fig. 2.18 la ecuación representa 6 grados de libertad de cada nodo. Hay dos nodos por cada elemento La fig. 2 19 contiene un diagrama de la notación de los miembros.

Cada elemento yace en una posición diferente dependiendo de su localización en el pozo. Se requiere de un sistema de coordenadas globales a partir del cual cada elemento se pueda localizar.

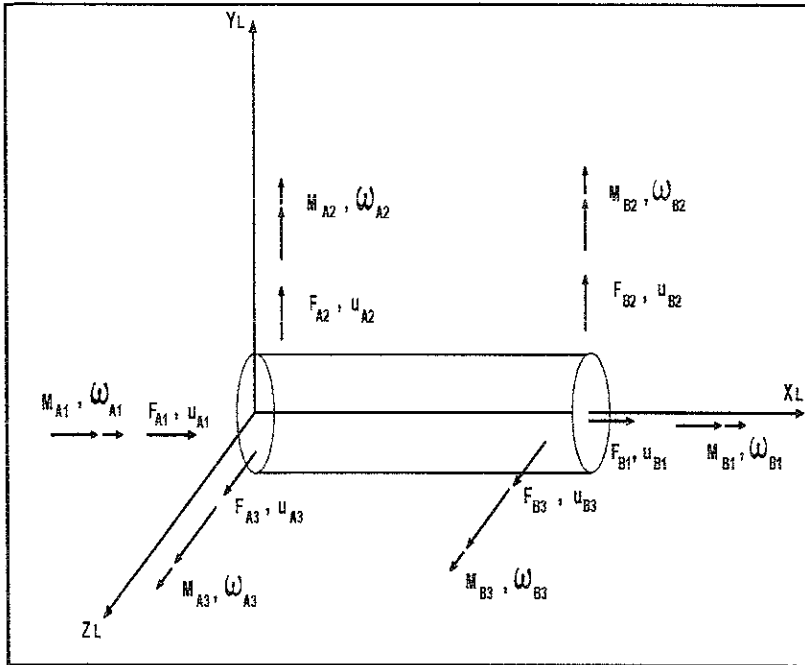


Fig. 2.19 Notación de los miembros en tres dimensiones⁴¹

Los ejes global y local (elemento) se muestran en la fig. 2.20 el global se denota con el subíndice G y el local con un subíndice L. Usando esta notación el eje local(X) siempre representará la línea central de un elemento. El eje global (Y) siempre representará el eje ascendente de la tierra o el eje en el cual la gravedad actúa. Aplicando la notación del sistema de coordenadas a la ecuación 2.17.2 queda:

$$[Fe]_l = [Ke]_l [Ue]_l + [Fge]_l \quad (2.17.3)$$

Como se indica en la ecuación 2.17 3, los términos detallados en la fig 2 19 se derivan del sistema de coordenadas locales.

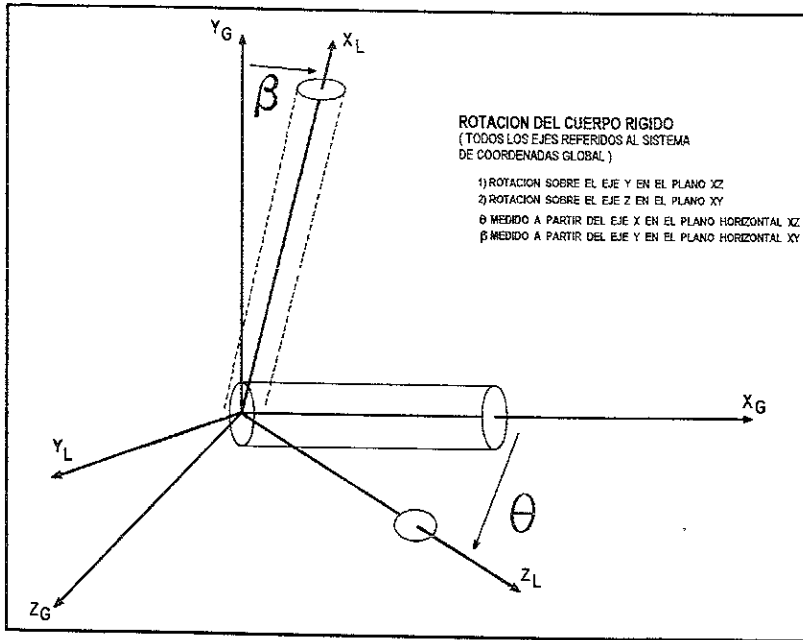


Figura 2.20 Transformación de coordenadas⁴¹

La transformación de un sistema de coordenadas a otro se lleva a cabo con la matriz de transformación. La derivación de la matriz de transformación para un cuerpo rígido rotando en torno a dos ejes fig.2 20 resulta en:

$$[T] = \begin{vmatrix} \cos\theta \sin\beta & \cos\beta & \sin\beta \sin\theta \\ -\cos\theta \cos\beta & \sin\beta & -\sin\theta \cos\beta \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{vmatrix} \quad (2.17.4)$$

Usando la notación de Azar, el sistema de coordenadas local se relaciona al sistema de coordenadas de referencia en la siguiente forma.

$$[Te]_l = [T][Te]_c \quad (2.17.5)$$

Transformando los desplazamientos y fuerzas locales de la ecuación 2.17.3 al sistema de coordenadas global da

$$[T][Fe]_e = [Ke]_e [T][Ue]_e + [T][Fge]_e \quad (2.17.6)$$

Note que la ecuación 2.17.6. es todavía la ecuación de equilibrio para un elemento simple. La localización del elemento esta siendo referida ahora a los ejes globales. Se requiere de álgebra lineal simple para resolver la ecuación 2.17.6 para el vector de fuerza interna global. Sabiendo que una matriz multiplicada por su inversa es igual a la matriz identidad (i), la ecuación 2.17.6 se premultiplica por la inversa de la matriz de transformación:

$$\frac{[T]}{[T]} [Fe]_e = \frac{[Ke]_e [T][Ue]_e}{[T]} + \frac{[T][Fge]_e}{[T]} \quad (2.17.7)$$

El resultado es la siguiente ecuación de equilibrio global para cada elemento:

$$[Fe]_e = \frac{[Ke]_e [T][Ue]_e}{[T]} + [Fge]_e \quad (2.17.8)$$

La ecuación 2.7.8 se representa generalmente como:

$$[Fe]_e = [Ke]_e [Ue]_e \quad (2.17.9)$$

Ya que la matriz de transformación es ortogonal, la inversa es igual a la transpuesta y la matriz de rigidez global se vuelve:

$$[Ke]_e = [T]^T [Ke]_e [T] \quad (2.17.10)$$

Después de que el aparejo de fondo se ha discretizado, las matrices de rigidez locales y las subsecuentes matrices de rigidez globales se formulan para cada elemento. A las matrices globales de elementos separados (fuerza, rigidez y desplazamiento) se agrupan en una ecuación de sistema global por suposición. La ecuación del sistema global representa el problema como un "todo":

$$[F]_G = [Ke]_G [U]_G + [Fg]_G \quad (2.17.11)$$

Durante este procedimiento de agrupación las condiciones de frontera, las condiciones de continuidad y las condiciones de equilibrio se imponen al sistema,

II.17.3 PROCESO DE SOLUCIÓN

Una vez que todo el sistema global se agrupa, reduce y particiona, las rutinas de solución pueden resolver los desplazamientos nodales del aparejo de fondo. Ya que el vector de fuerza no lineal global $(Fg)_G$ y la matriz de rigidez global $(K)_G$ son función del desplazamiento global $(U)_G$, el proceso de solución se vuelve iterativo con respecto al desplazamiento. El modelo utiliza el algoritmo de eliminación Gaussiana de sustitución sucesiva para resolver la ecuación 2.17.11 los desplazamientos nodales resultantes se monitorean continuamente para asegurar que el aparejo de fondo permanece dentro del pozo.

Durante la primera iteración el aparejo se deforma bajo su propio peso, en un pozo inicialmente definido por los datos de medición proporcionados por el usuario. El lo(s) muelle(s) elástico(s) son automáticamente ligados al correspondiente(s) nodo(s) para empujar al aparejo de regreso para que se encuentre dentro de los confines del pozo en la siguiente secuencia de iteración. El nodo para las fuerzas de contacto con la pared puede determinarse por medio de la fuerza de muelle requerida para mantener el nodo dentro del pozo. Antes de que la siguiente iteración comience, las fuerzas de contacto, de fricción y los torques friccionales se aplican a cada nodo aplicable (haciendo contacto con el pozo)

Conforme las iteraciones actúan, la solución de la rutina continuamente aplica/elimina los muelles (es decir, fuerzas de fricción y de contacto) donde sea necesario.

Una vez que todos los desplazamientos individuales a lo largo del aparejo se encuentran dentro de una tolerancia especificada durante la última iteración, la solución se considera que ha convergido:

$$|[U_{ij}]^n - [U_{ij}]^{n-1}| \leq \text{tolerancia} \quad (2.17.12)$$

Después de la convergencia del desplazamiento, se determinan las fuerzas internas $(F)_e$ (la ecuación 2.17.11) es resuelta). El programa examina el PSB local y aplica una fuerza axial externa sobre la parte superior del aparejo en caso de ser necesaria. Se repite el proceso de solución completo, iterando para nuevos desplazamientos causados por la nueva carga axial.

El proceso de ajuste del PSB continúa hasta que la fuerza axial sobre la barrena iguala al PSB definido por el usuario. La solución final cuasi-estática no se completa hasta que el proceso de ajuste del PSB converge a la tolerancia preestablecida en el programa. Subsecuente a la convergencia del PSB, el programa principal proporciona todos los datos de salida del elemento finito. Se determinan entonces los vectores de fuerza de reacción en la barrena y convierte al sistema de coordenadas locales, por lo tanto, las fuerzas resultantes que actúan sobre la barrena se cuantifican. En este momento, el análisis del elemento finito se ha completado en el programa.

II.18 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO .

A continuación se describen las características fundamentales del funcionamiento del simulador, del cual se describieron sus ecuaciones anteriormente, se presenta el plan de predicción de la perforación y su modo de empleo.

II.18.1 PLAN DE PREDICCIÓN DE LA PERFORACION

En muchos programas de predicción de la desviación, el método para relacionar las fuerzas de reacción en la barrena con la trayectoria es simplemente suponer que el aparejo de fondo perfora en la dirección de la fuerza resultante. Generalmente, la diferencia en el ángulo entre el pozo y el vector de fuerza resultante se divide entre 100 y se reporta como la "curvatura predicha" en unidades de grados/100 pies.

Como ha demostrado Brakel, la curvatura predicha puede ser exacta para los siguientes 100 pies de perforación, pero no siempre es exacta en los siguientes cientos de pies. Pruebas extensivas mostraron que la técnica anterior se comparó favorablemente con datos de campo, pero en todos estos casos el programa dinámico predijo ritmos de incremento/decremento más altos que los encontrados en el campo.

El nuevo algoritmo de predicción de la perforación emplea una versión ligeramente modificada de la técnica anterior. Conociendo los vectores de fuerza de reacción en la barrena a partir del análisis cuasi-estático, el programa determina la curvatura del pozo en la barrena correspondiente a la nueva profundidad. El usuario selecciona el incremento en la profundidad. El pozo simplemente es incrementado, manteniendo la curvatura original arriba del nuevo intervalo del agujero. Esto permite que una porción del aparejo de fondo permanezca bajo la influencia de la "anterior curvatura del pozo"^{29,32}.

Se lleva a cabo otro análisis cuasi-estático, los vectores de fuerza de reacción de la barrena se calculan y el pozo se incrementa una vez más. El proceso continúa para un número de intervalos especificado por el usuario. En efecto, el programa simula la perforación.

II.18.2 ANISOTROPÍA

Se incorporó al programa una técnica para tomar en cuenta las condiciones geológicas que requiere datos de la formación mínimos. La técnica se basa en una combinación de 2 modelos anteriores que tienen relación con los índices de anisotropía de la roca³¹.

Antes de que la posición de un intervalo nuevo del agujero sea calculada por el plan de predicción de la perforación, el programa checa los parámetros de anisotropía de la roca. El usuario puede especificar por medio de los datos de entrada, si la formación es isotrópica o no. Si las condiciones geológicas deben tomarse en cuenta se deben proporcionar el buzamiento del plano de

estratificación y el echado. Además se deben asignar 2 índices de anisotropía de la roca, uno para la dirección de la inclinación y una para la dirección del azimut. La formación puede afectar la desviación de la barrena en forma distinta, en la dirección de la inclinación y en dirección del azimut.

Para mantener el programa práctico y versátil, las subrutinas se diseñaron para permitir que los parámetros de inclinación de la formación actúen independientemente de los parámetros de azimut de la formación. Sin embargo, el usuario tiene la opción de elegir hacer la anisotropía de inclinación igual a la anisotropía del azimut cuando se investiga primeramente el efecto de la geología en el aparejo

El programa separa el vector de fuerza resultante en la barrena en dos vectores de fuerza que actúan paralela y perpendicularmente a los planos de estratificación de la formación fig. 2.21 la fuerza paralela al plano de estratificación disminuye en proporción al índice de anisotropía respectivo (esto ocurre para ambas direcciones inclinación y azimut).

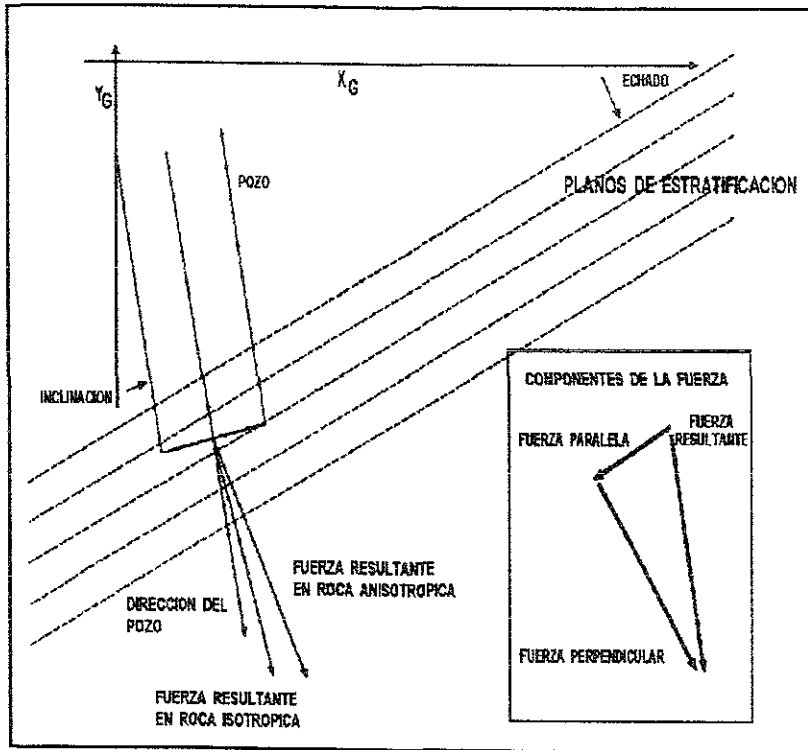


Figura 2.21 Efecto de los planos de estratificación sobre la desviación de la barrena⁴¹

La magnitud y dirección de la fuerza resultante sobre la barrena es re-calculada y el pozo se incrementa de acuerdo al plan de predicción de perforación. Ya que las fuerzas sobre la barrena paralelas al plano de estratificación se decrementan, las fuerzas sobre la barrena perpendiculares al plano de estratificación adquieren una influencia más grande sobre la dirección en que perfora la barrena (comparada con una formación isotrópica) El efecto total es hacer que el aparejo de fondo tienda a subir hacia el buzamiento y camine con tendencia hacia el echado.

Si la inclinación del pozo es baja y el buzamiento de la estratificación es mayor de 45° , la barrena puede perforar a lo largo de los planos de estratificación²⁹, con tendencia hacia abajo del buzamiento y a la largo del echado. En ese caso, la

subrutina que implica el factor geológico invierte las reglas de los vectores de fuerza paralelos y perpendiculares al plano de estratificación

La fuerza perpendicular se decrementará, causando que la fuerza paralela adopte un control mayor sobre la dirección de la perforación. Una vez más, los cálculos computacionales ocurren en ambos planos de inclinación y azimut

II.18.3 SUSTITUTOS Y CAJAS CURVOS.

La aplicación del análisis del elemento finito a las herramientas curvas del aparejo de fondo requiere de una técnica especial debido al libre movimiento de la sarta, restringida en el pozo circular rígido.

Un sustituto o caja curvo en la sarta de perforación, crea un desajuste en la orientación y geometría del eje central del aparejo de fondo. Cuando el eje central del aparejo de fondo no coincide con el eje central del pozo, se viola una suposición necesaria en los cálculos del análisis del elemento finito. Resumiendo, la suposición establece un requerimiento:

Que el eje central del aparejo de fondo coincida con el eje central original del pozo para la primera iteración ejecutada por la rutina de solución de desplazamiento nodal. Las subsiguientes iteraciones rastrearán la información de la sarta mientras se aplica o quita peso a la barrena, permitiendo a la sarta el contacto con la pared y la aplicación de fuerzas limitantes. Sólo después de la primera iteración, el eje central del aparejo de fondo puede diferir del eje del pozo

El principal obstáculo en la modificación del código del análisis cuasi – estático para los sustitutos curvos, es que el programa no reconocerá un doblez sencillo (o torsión) en el aparejo de fondo. Por lo tanto, las alteraciones requieren algo más que una simple reestructuración de la malla del aparejo de fondo.

La reconstrucción del procedimiento completo de análisis finito para permitir la excentricidad aparejo-agujero no es deseable ya que podría cambiar la técnica de análisis y por lo tanto alterar los resultados.

Se requirió una técnica única para incorporar los sustitutos/cajas curvos en el aparejo de fondo. Conociendo el ángulo de doblez deseado y la rotación de la sarta de la herramienta (siendo 0° el extremo superior y 180° el extremo inferior), el programa calcula la excentricidad teórica en la barrena en ambos planos, de inclinación y azimut.

Después de la construcción de la malla coincidente aparejo-agujero, el programa impone el doblez deseado en el aparejo y calcula las fuerzas de contrapeso³⁷ locales y las aplica como momentos globales que actúan sobre el doblez.

La técnica permite que el doblez sea impuesto en la sarta, después que la rutina de solución ha comenzado. De hecho, el análisis comienza con el aparejo de fondo recto que se encuentra en el eje central del pozo. Conforme el procedimiento de solución se lleva a cabo los momentos aplicados crean un doblez en la sarta en la localización deseada.

Las ventajas de esta técnica de análisis son la facilidad de modificación del código y la capacidad de colocar el doblez en cualquier lugar del aparejo. El programa puede aceptar hasta dos dobleces en el aparejo, ambos orientados en la misma dirección. Sólo se puede modelar un modo de desplazamiento, debido a la incapacidad de modelar el movimiento de un cuerpo rígido.

Además de las suposiciones hechas anteriormente durante las desviaciones fuerza-desplazamiento, las siguientes suposiciones generales se requieren para el modelo de elemento finito cuasi-estático y el modelo de predicción de la trayectoria:

- La desviación del agujero se debe a los efectos combinados del comportamiento mecánico del aparejo y de la formación.
- El aparejo gira alrededor de su propio eje y no se permite el movimiento de un cuerpo rígido

- Las condiciones de frontera, restringen la traslación axial de la barrena, pero no el desplazamiento angular (No hay momento entre la barrena y la formación)
- El pozo es una restricción circular rígida y cuando se pone en contacto con un nodo reacciona con una fuerza de fricción externa, torque de fricción y fuerza de contacto.
- Las fuerzas dinámicas son despreciables.
- La curvatura del pozo se aproxima por una serie de segmentos rectos (Elementos de que se forma la malla del aparejo).
- Solo los nodos hacen contacto con la pared del pozo.
- Los efectos de la formación sobre la desviación pueden cuantificarse por el plano de buzamiento de la estratificación, echado e índices de anisotropía.

CAPITULO III

ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL SIMULADOR DE APAREJOS DE FONDO

III.1 INTRODUCCION

Este capitulo de sensibilidad esta diseñado para examinar el efecto de cada uno de los parámetros que intervienen en la curvatura de inclinación y azimut del aparejo de fondo.

En este estudio se consideran tres aparejos denominados como A, B y C Fig.3.1. Son los usados comúnmente en la mayoría de los estudios de sensibilidad. Un cuarto aparejo es usado para la prueba de sustituto curvo y se detalla posteriormente.

Se considera como aparejo A, el usado para incrementar ángulo, el B para mantener y el C para disminuir el ángulo.

Para propósitos de comparación se seleccionó un conjunto de condiciones de operación estándar o base para todas las pruebas paramétricas

Durante cada análisis solo es variado un parámetro, el cual es probado y reportado como la variable independiente en las figuras. Las condiciones de control siguientes son solo aplicables a ciertos análisis de sensibilidad, no se requieren todas para cada análisis.

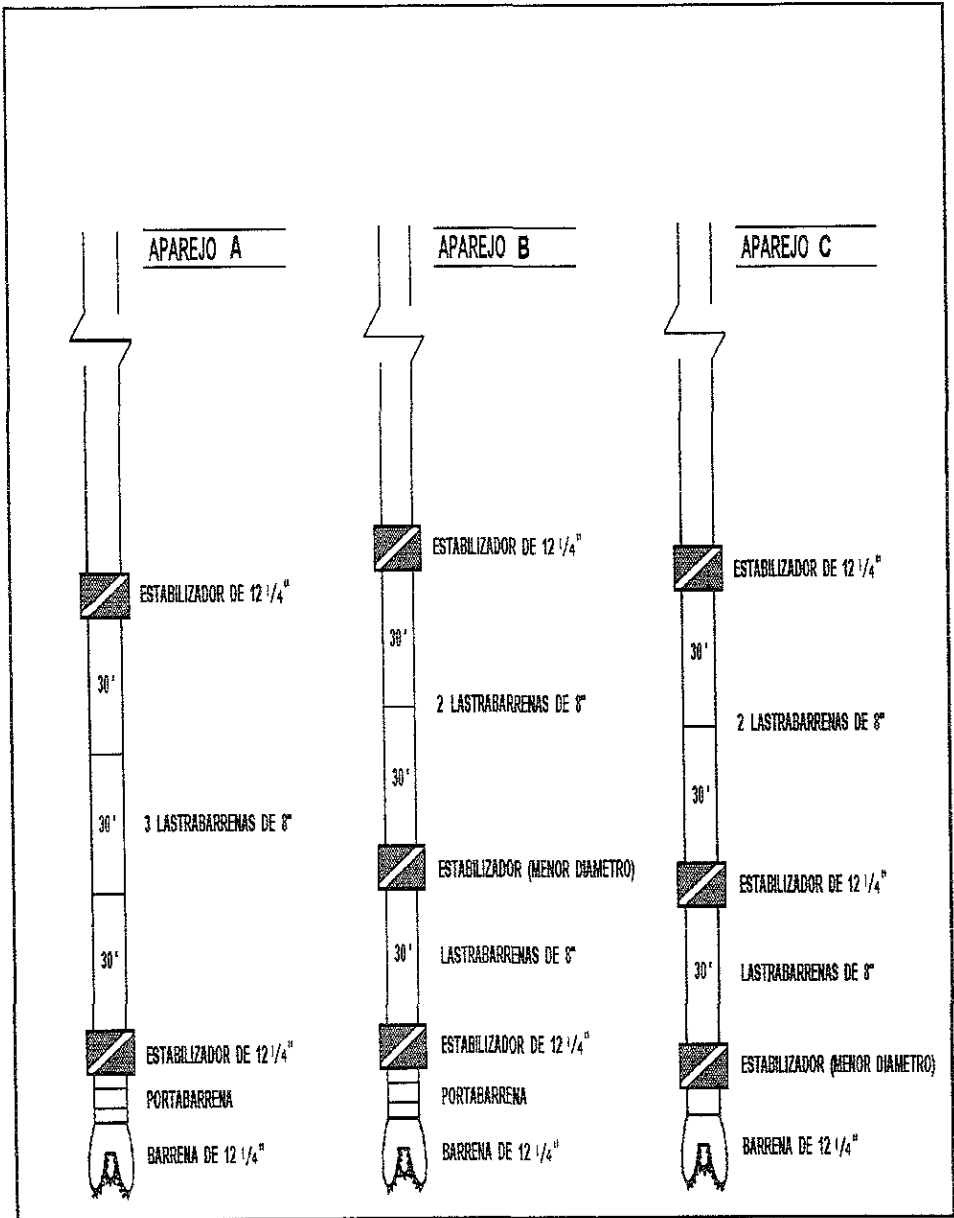


Figura 3.1. Aparejos de fondo utilizados en el modelo de prueba de predicción de la perforación.

CONDICIONES DE CONTROL.

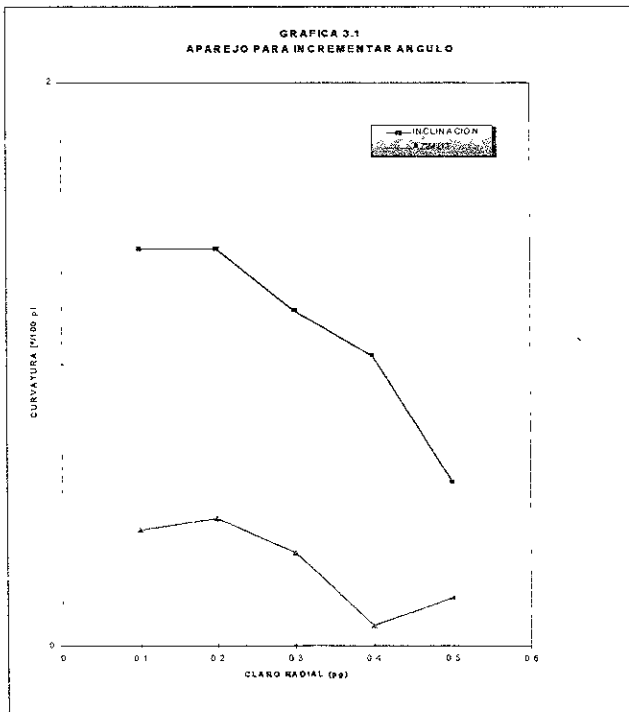
- ◆ Pozo inicialmente vertical.
- ◆ Inclinación 30°, azimut 30°, profundidad 5,000 pies.
- ◆ Incrementos de simulación 10 pies.
- ◆ Claro radial 0.1 pg
- ◆ Formación isotrópica.
- ◆ Densidad de lodo 9 lb/gal.
- ◆ Torque en la barrena 0 lb-pie.
- ◆ Coeficiente de fricción 0.30
- ◆ Peso sobre barrena 50,000 lbs
- ◆ Velocidad de penetración de 20 pie/hr.
- ◆ Índices de anisotropía de inclinación y azimut 0 10
- ◆ Echado de la formación 30°
- ◆ Angulo del sustituto curvo 1.0°.
- ◆ Angulo de la cara de la herramienta 0°.

III.2 CLARO RADIAL

Las figuras muestran los ritmos de curvatura del aparejo, de incremento, mantenimiento y decremento de ángulo.

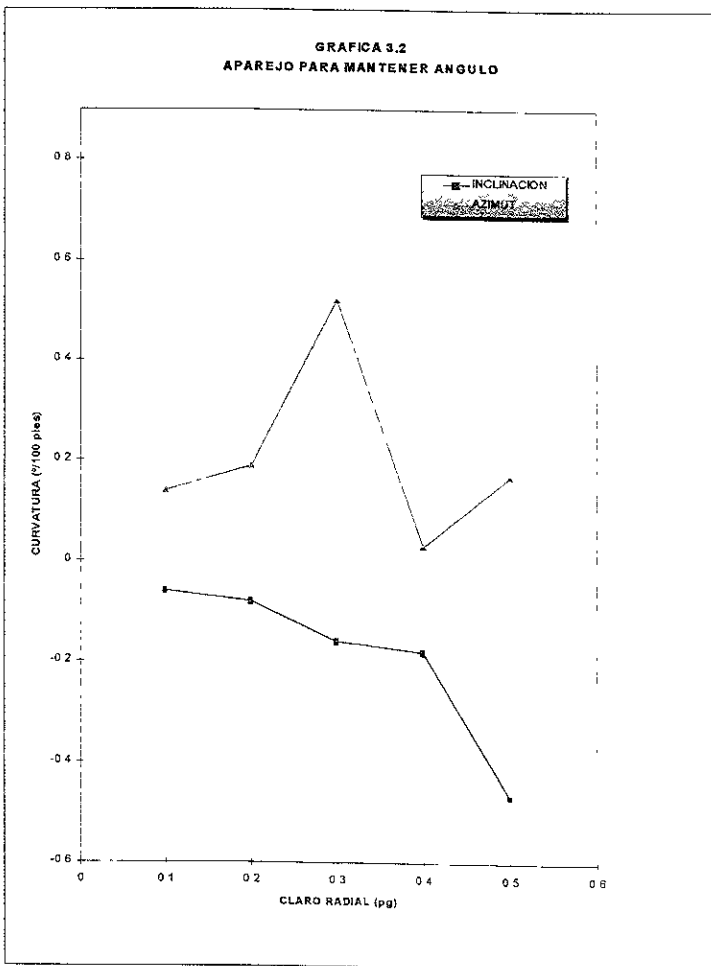
INCREMENTAR ANGULO.

- ◆ El aparejo de incremento es el más sensible al claro radial.
- ◆ Así como se incrementa el claro radial el ritmo de incremento del aparejo decrece.
- ◆ El azimut gira en sentido de las manecillas del reloj con el incremento de claro radial. Estos resultados sustentan el concepto de “claro radial crítico” descrito por Birades. Los resultados se muestran en la gráfica 3.1.



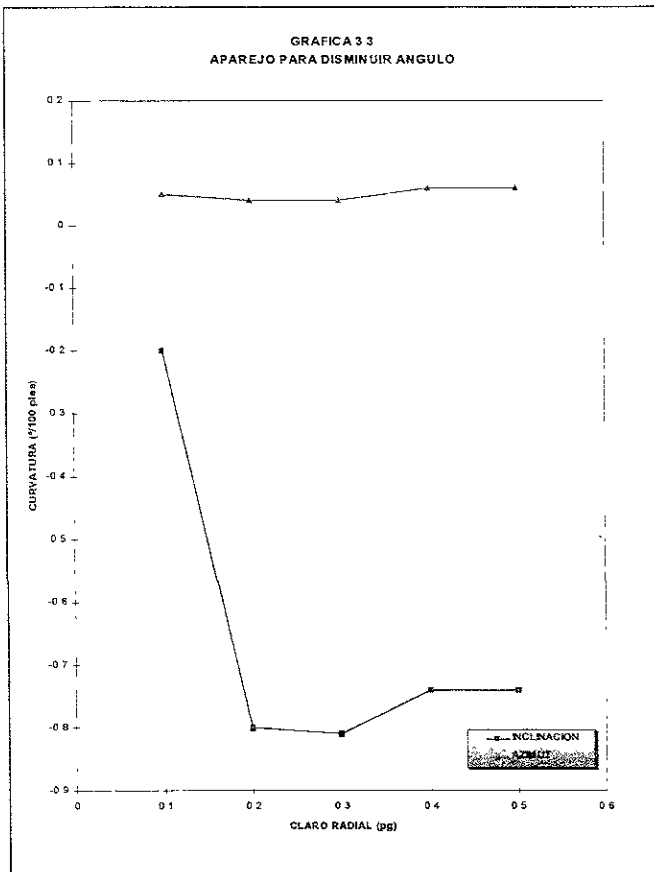
CLARO RADIAL**MANTENER ANGULO**

- ◆ El aparejo se convierte en aparejo de decremento más rápido en agujeros agrandados.
- ◆ La respuesta del azimut permanece aparentemente constante e independiente del claro radial gráfica 3.2.



CLARO RADIAL**DISMINUIR ANGULO**

- ◆ El aparejo de decremento reacciona como lo esperado para un aparejo de decremento típico, siendo inclinación y azimut no dependientes del claro radial. La mejor explicación de la respuesta mínima es que el aparejo siempre esta en contacto con el lado bajo del pozo. El incremento del claro radial tiene un efecto despreciable en todo el aparejo que no hace contacto con el lado "alto" o superior del pozo gráfica 3.3.



III.3 PESO SOBRE BARRENA

La variación del peso sobre barrena, permite visualizar su efecto en la inclinación, azimut y curvatura del azimut, para los tres aparejos de fondo indicados.

Las figuras muestran los ritmos de curvatura para cada aparejo, de incremento, mantenimiento y decremento de ángulo

INCREMENTAR ANGULO

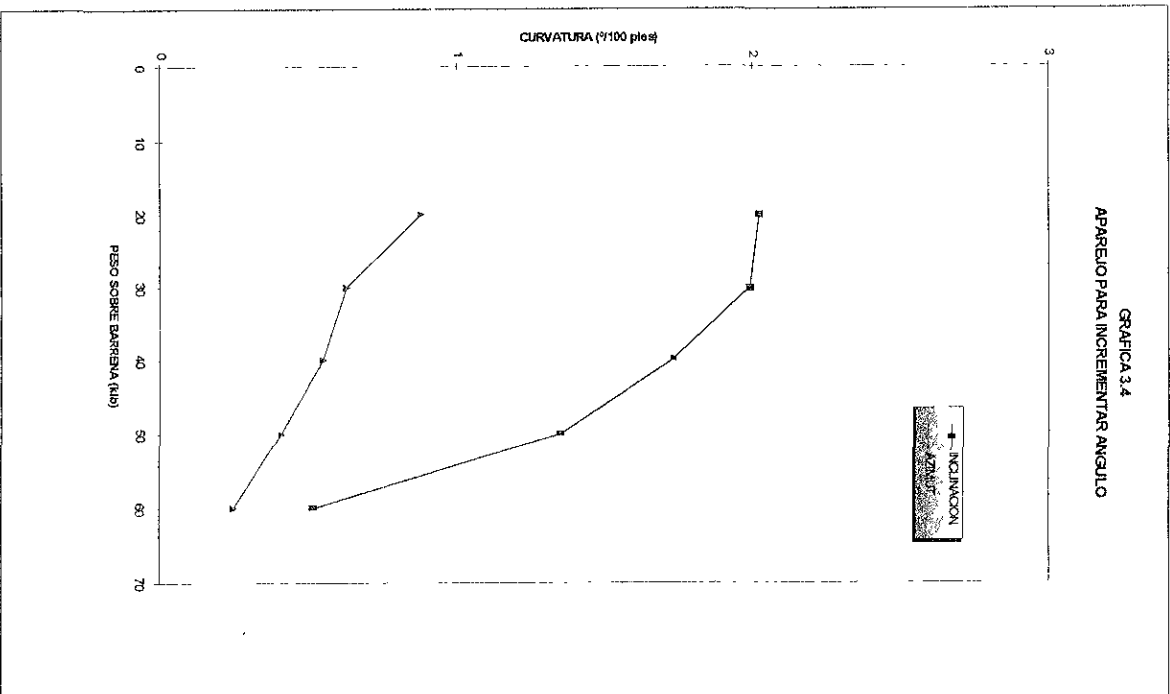
- ♦ La respuesta de incremento (y giro derecho) del aparejo tiene su máximo a un peso sobre la barrena de 20,000 lbs , cualquier incremento arriba de este peso la curvatura de la inclinación disminuye, para la curvatura del azimut se mantiene y para valores menores la curvatura de la inclinación tiende a disminuir conforme se incrementa el peso sobre barrena.

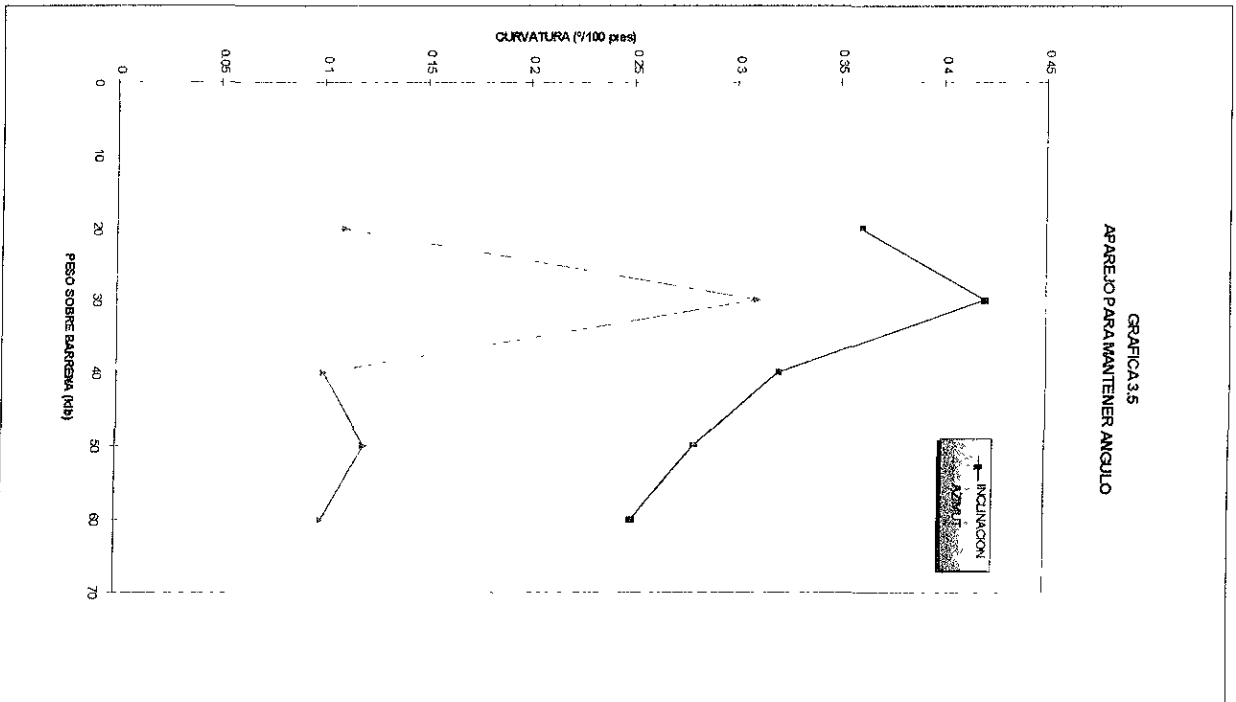
MANTENER ANGULO

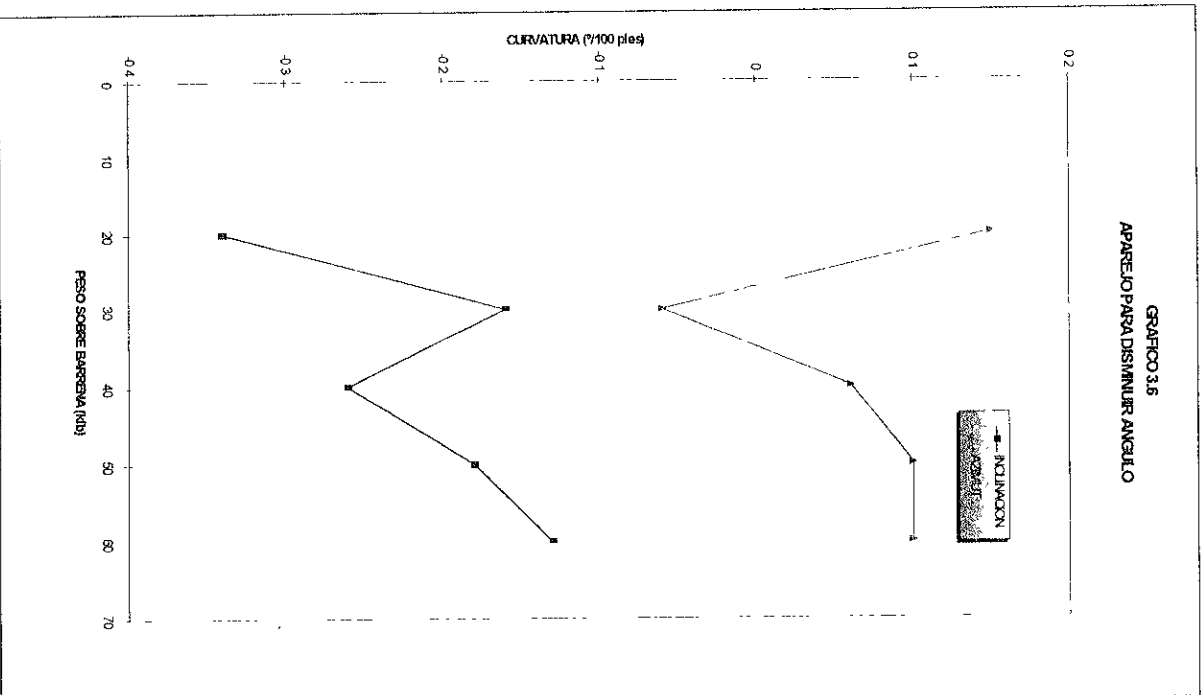
- ♦ A un peso sobre barrena de 30,000 lb, la curvatura de la inclinación y del azimut alcanzan su valor máximo, mientras que para otros pesos ya sean mayores o menores se tienen disminuciones en las curvaturas.

DISMINUIR ANGULO

- ♦ El aparejo de decremento disminuye más el ángulo a bajos pesos sobre barrena, se muestra una tendencia de disminución del ritmo de decremento al incrementar el peso sobre barrena. La respuesta de "giro derecha" disminuye solo ligeramente al incrementar el peso
- ♦ La curvatura del azimut se mantiene en una tendencia más homogénea. Los resultados se muestran en las graficas 3.4, 3.5 Y 3.6 para aumentar, mantener y disminuir ángulo respectivamente.





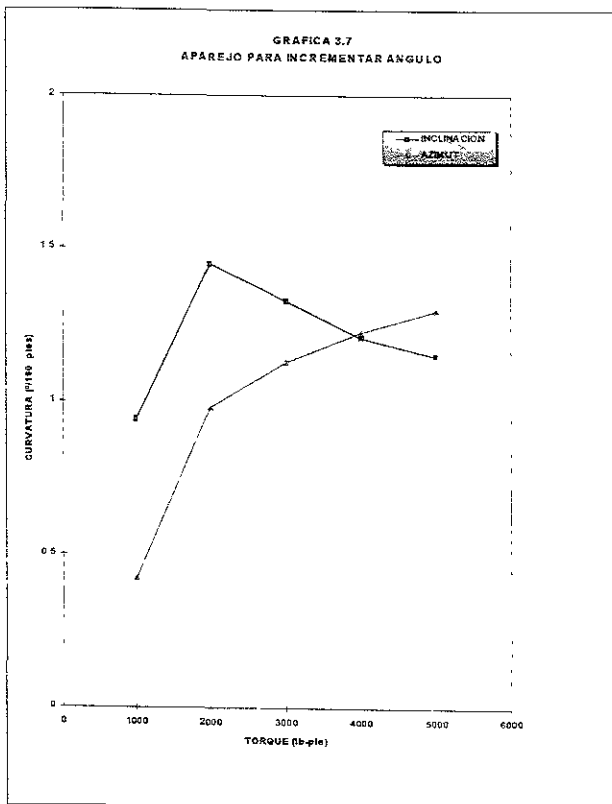


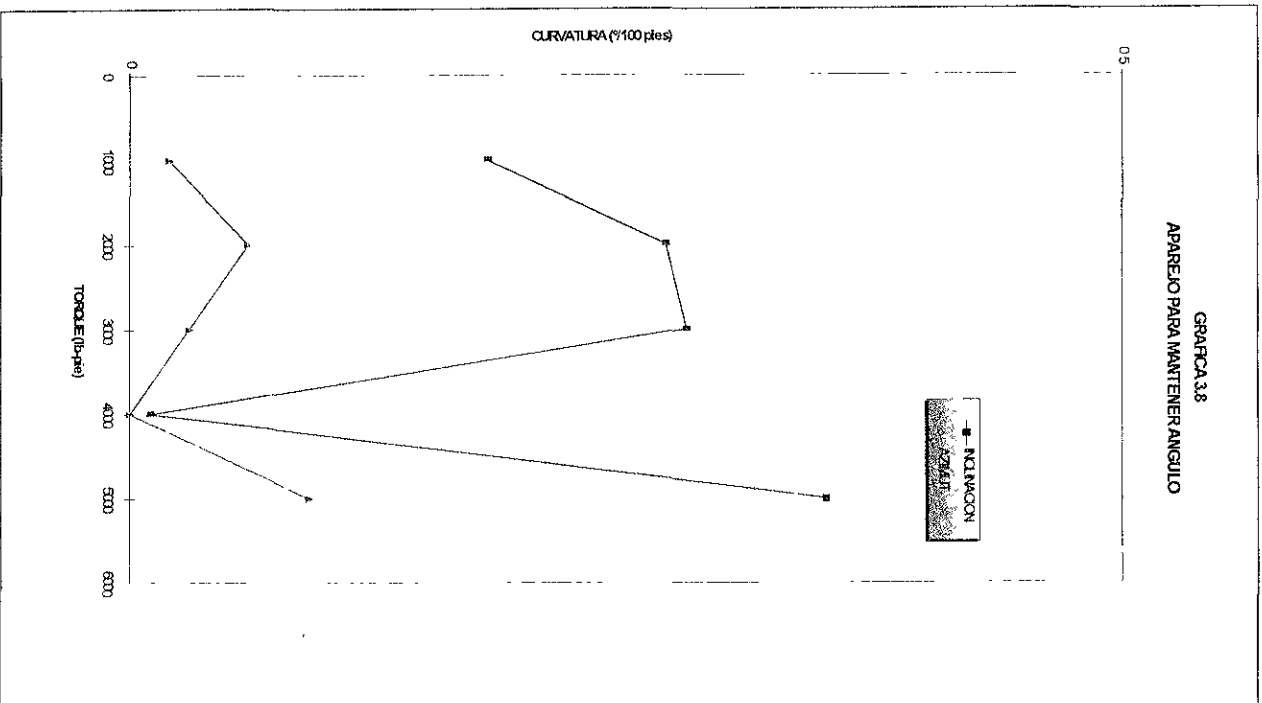
III.4 TORQUE

En las figuras 3.7 a 3.9 se presentan los resultados de la influencia del simulador, donde se observa que:

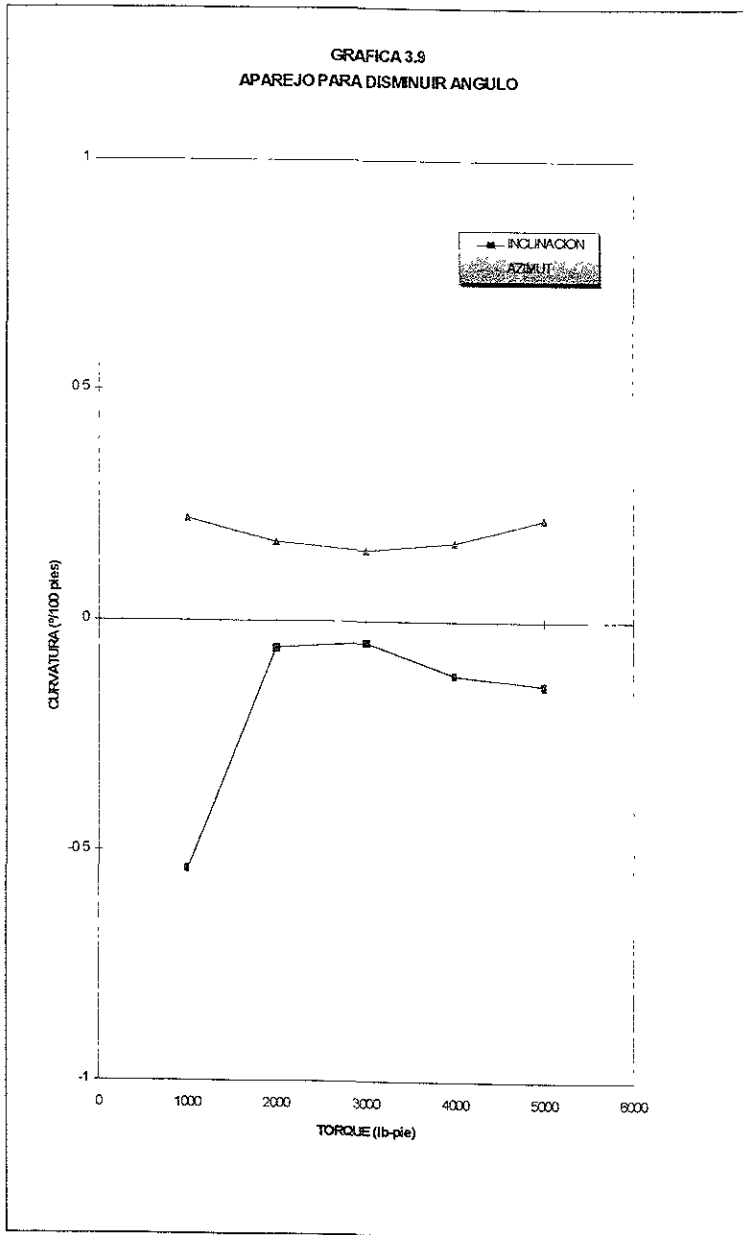
Existe una respuesta en la variación de las curvaturas mínima en los tres aparejos tipo

Aunque es conocido que el torque puede ser capaz de afectar la tendencia de "caminamiento de la barrena" en un aparejo de fondo. Dado que se presenta una variación en la curvatura de la inclinación y azimut mínima se concluye que es independiente del torque de la barrena



GRAFICA 3.8
APAREJO PARA MANTENER ANGUILO

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

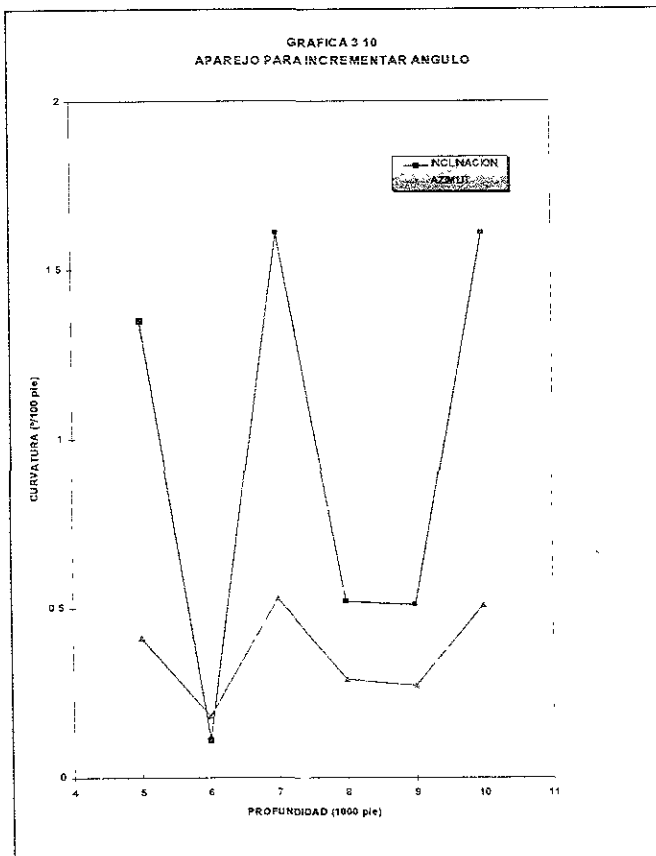


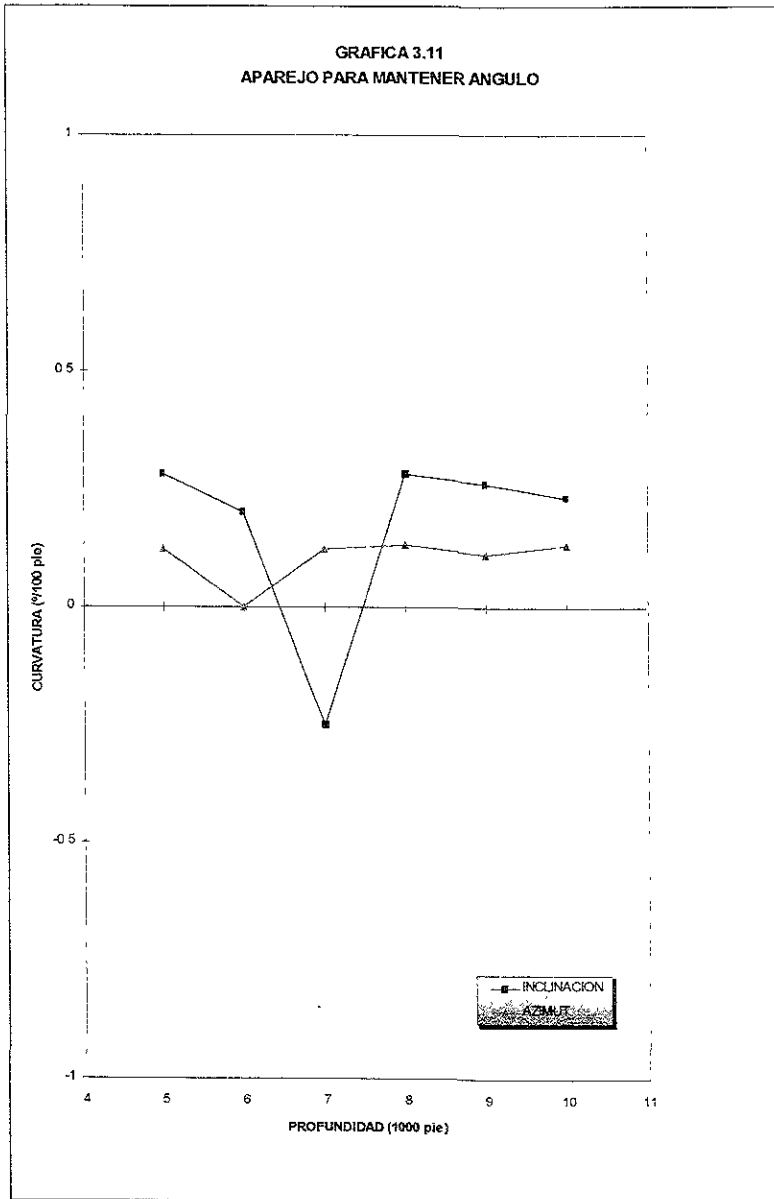
III.5 PROFUNDIDAD

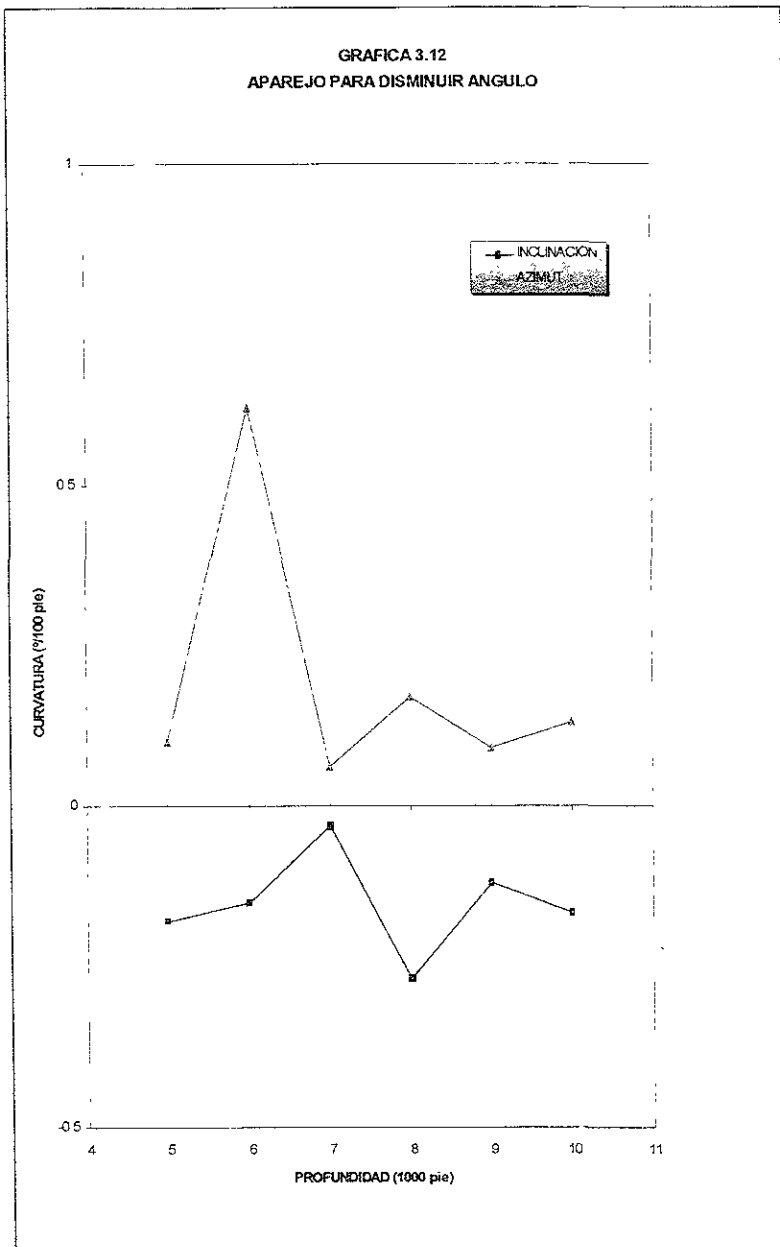
En los gráficos 3.10 a 3.12 se presentan los resultados encontrados al efectuar la simulación de la perforación de los tres aparejos tipo, de donde se concluye:

Al efectuar la simulación a diferentes profundidades que oscilan entre 5,000 y 10,000 pies de profundidad para azimut e inclinaciones con y sin iteración roca barrena, en ambos casos no se encontraron diferencias significativas finales.

Sólo en las curvaturas de inclinación como de azimut se presentan ligeras variaciones para el caso del aparejo de mantener ángulo.







III.6 COEFICIENTE DE FRICCION

El coeficiente de fricción entra en juego al hacer contacto el aparejo de fondo con la pared del pozo. Más allá del contacto, las fuerzas de fricción son calculadas y reaplicadas al aparejo de fondo como fuerzas externas (vectores con magnitud y dirección) y torque externo (oponiéndose a la rotación en el sentido de las manecillas del reloj)

INCREMENTAR ANGULO

El factor de fricción tiene un efecto mínimo en la curvatura de inclinación. El azimut es afectado por la aplicación de las fuerzas de contacto que actúan empujando al aparejo hacia el lado derecho del agujero

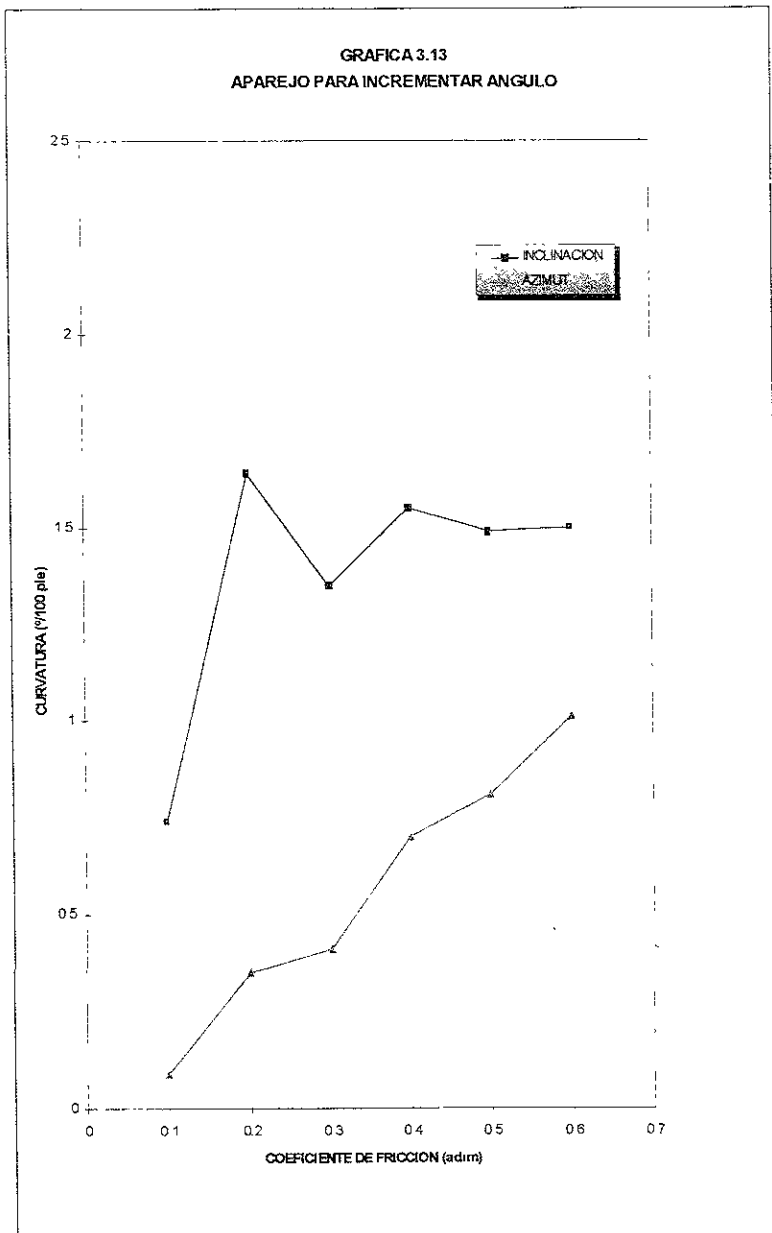
MANTENER ANGULO

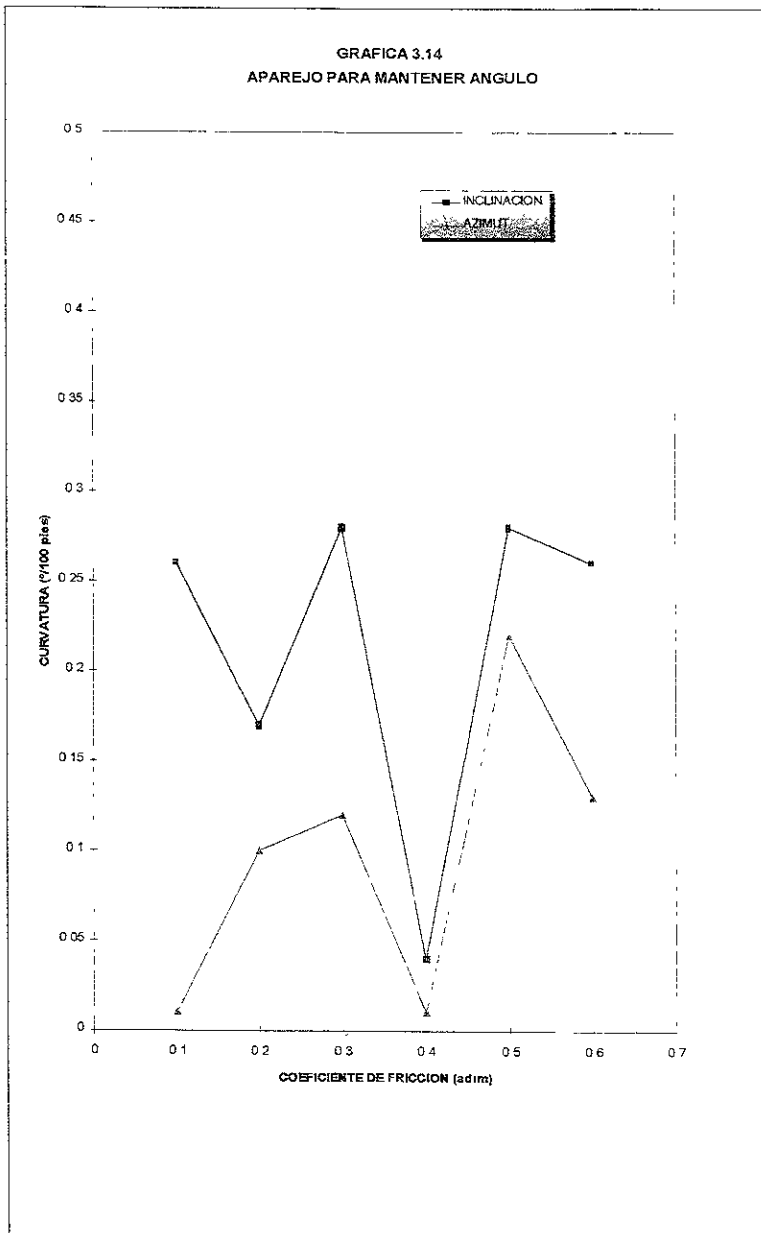
En este caso las curvaturas de inclinación y azimut se ven afectadas al incrementarse el coeficiente de fricción el aparejo incrementa su ritmo de caídas y *posteriormente presenta un comportamiento contrario*

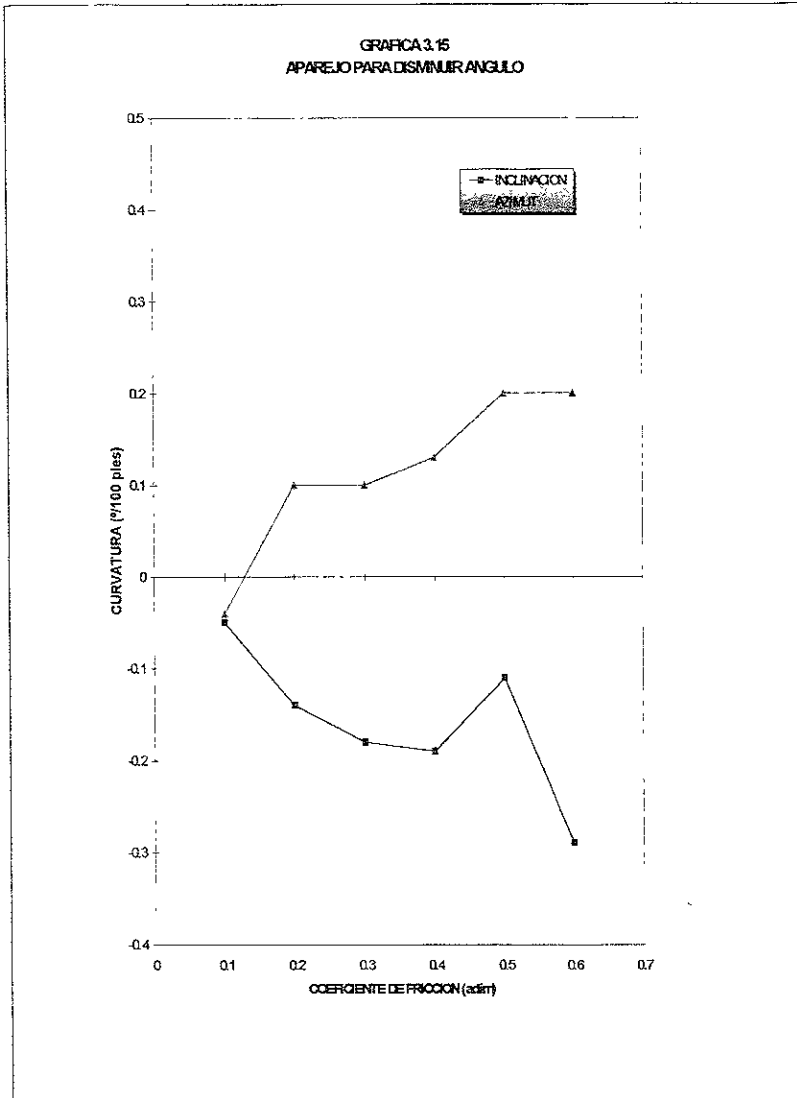
DISMINUIR ANGULO

La respuesta a la inclinación no es mayormente afectada por el parámetro de fricción. El incremento en el torque debido al incremento de las fuerzas de fricción incrementa su tendencia al "caminamiento hacia la derecha"

Los resultados de los análisis del coeficiente de fricción se presentan en las figuras 3.13, 3.14 y 3.15 para aumentar, mantener y disminuir ángulo respectivamente.





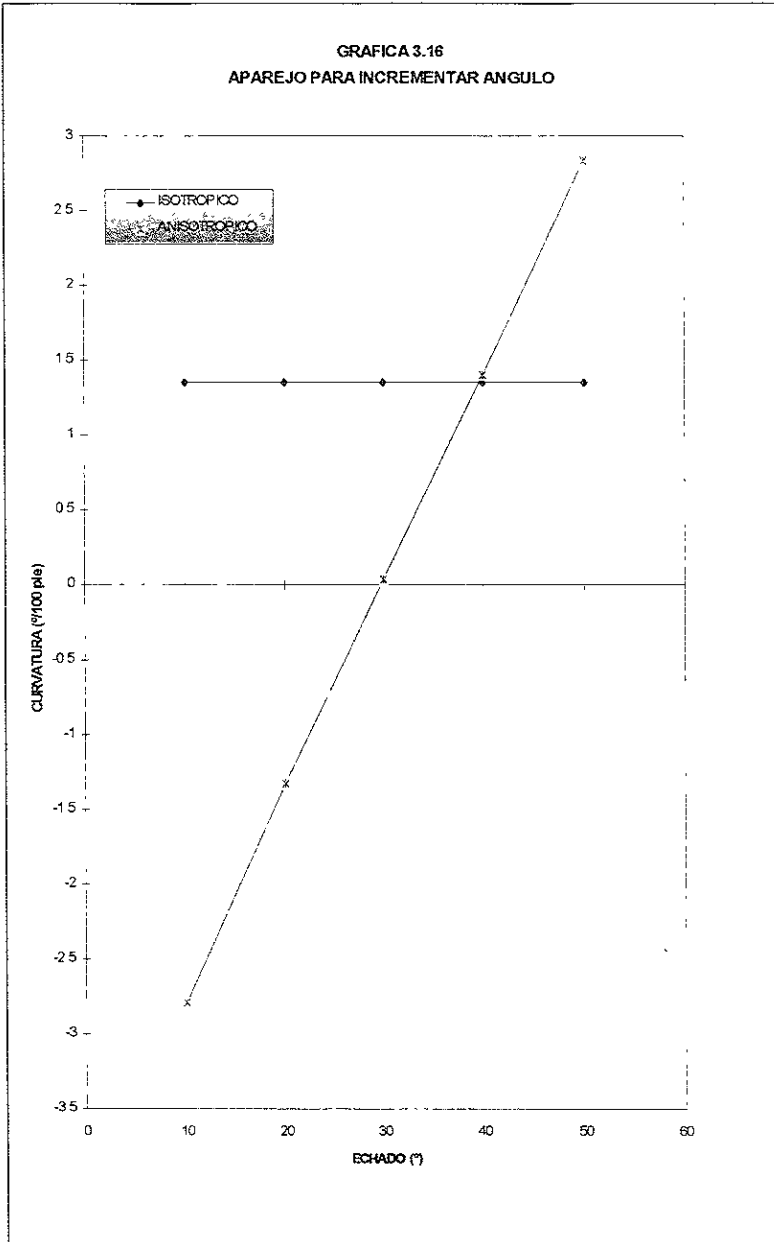


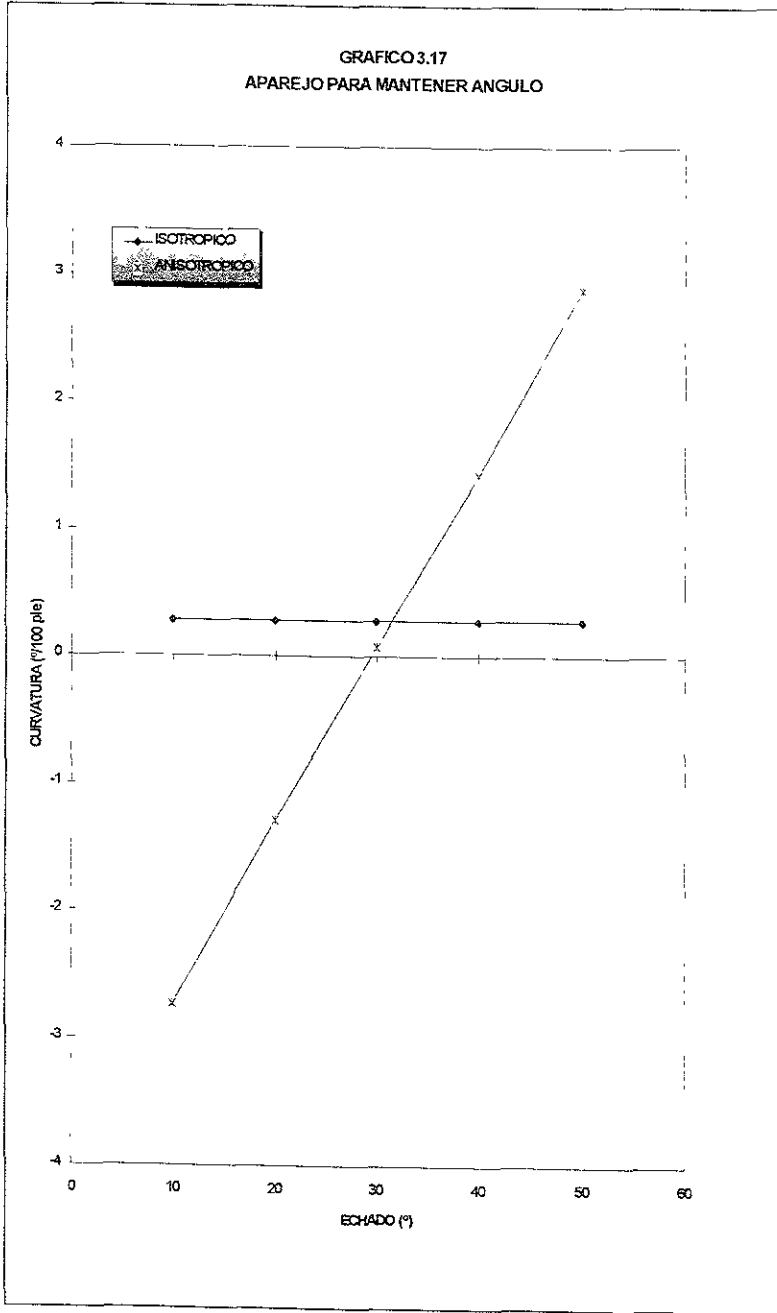
III.7 ECHADO DE LA FORMACION

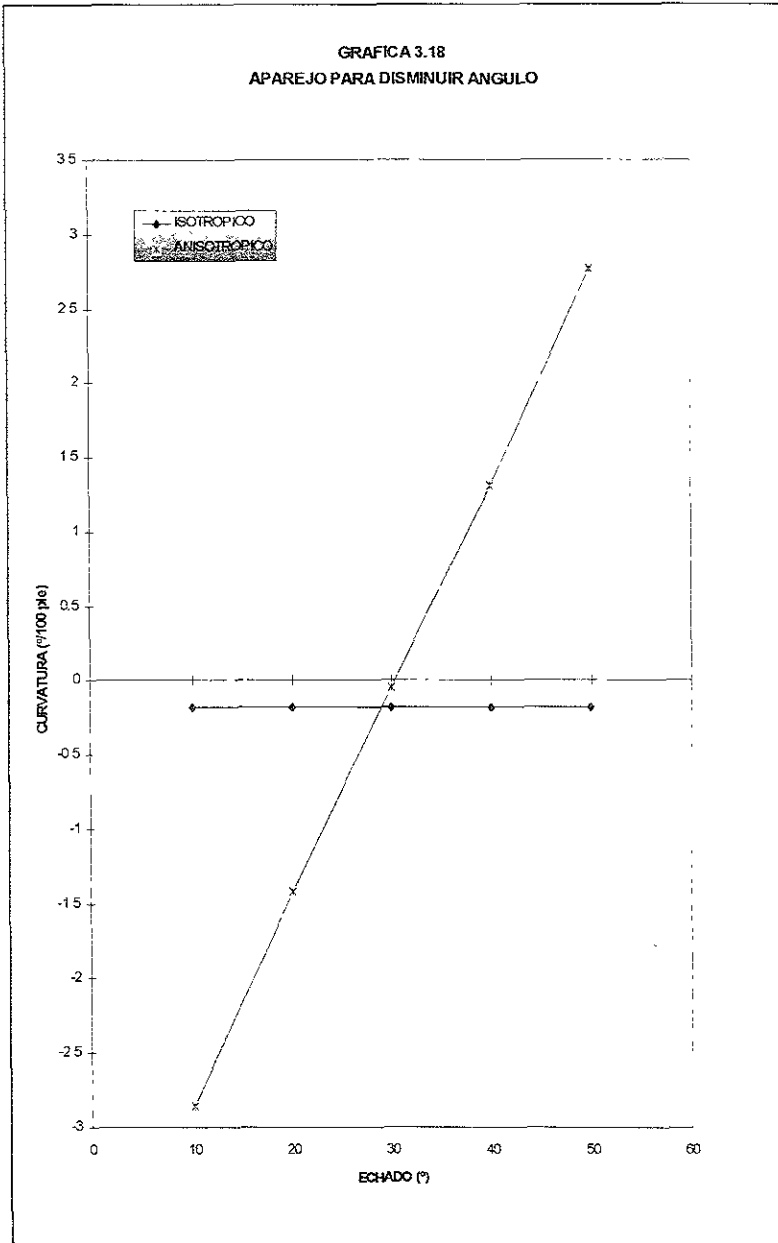
Formaciones con echados menores a 30° harán que el aparejo decremente la inclinación. La reacción de incrementar/disminuir es debida al diseño del modelo anisotrópico, el aparejo siempre tenderá a perforar echado arriba y en dirección del echado. En adición a la respuesta anisotrópica, se muestra la respuesta isotrópica. El análisis de isotropía ignora todo parámetro de la formación y predice una tendencia a disminuir ángulo.

- ♦ El echado de la formación puede causar que el aparejo construya ángulo o lo decremente dependiendo de la posición del agujero. En la prueba de echado de la formación el ángulo de inclinación del agujero fue de 30° , el índice de anisotropía fue mantenido en 0.1° . Cualquier echado mayor que la inclinación del agujero (mayor de 30°) permitirá construir ángulo al aparejo de fondo

Los resultados de los análisis del echado de la formación se presentan en las figuras 3.16 a 3.18.







III.8 LONGITUD DE LA SIMULACION

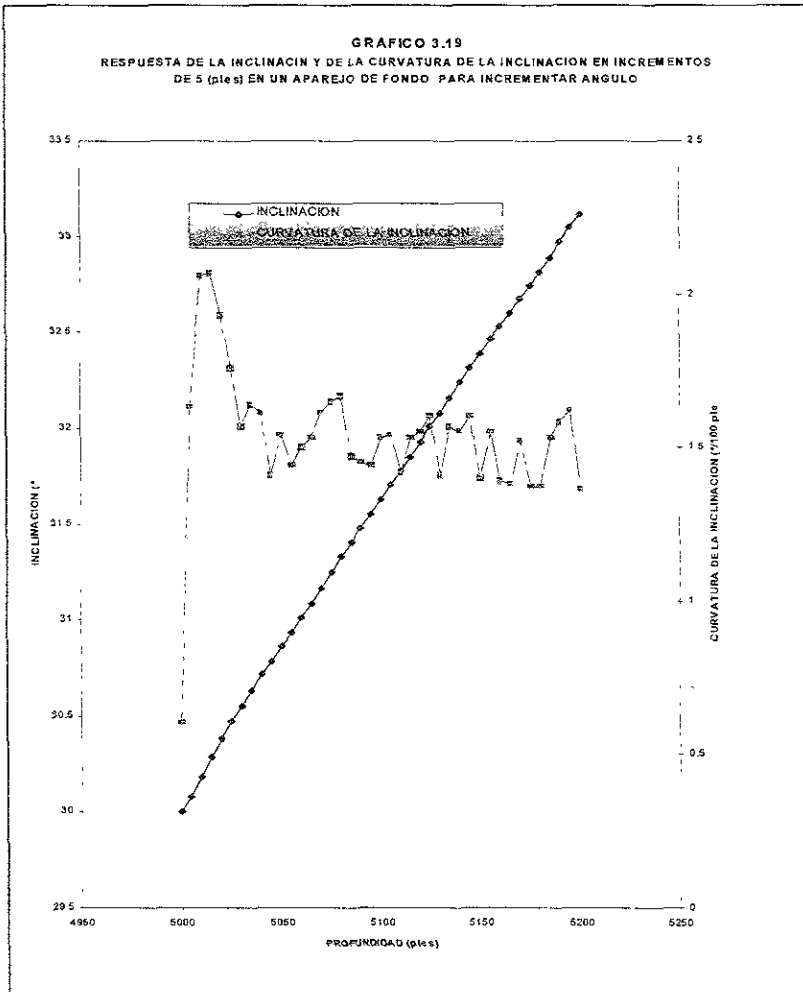
La longitud del incremento para la simulación es el parámetro que especifica que tan rápido es analizado el aparejo de fondo o que tan rápido avanza éste dentro del agujero.

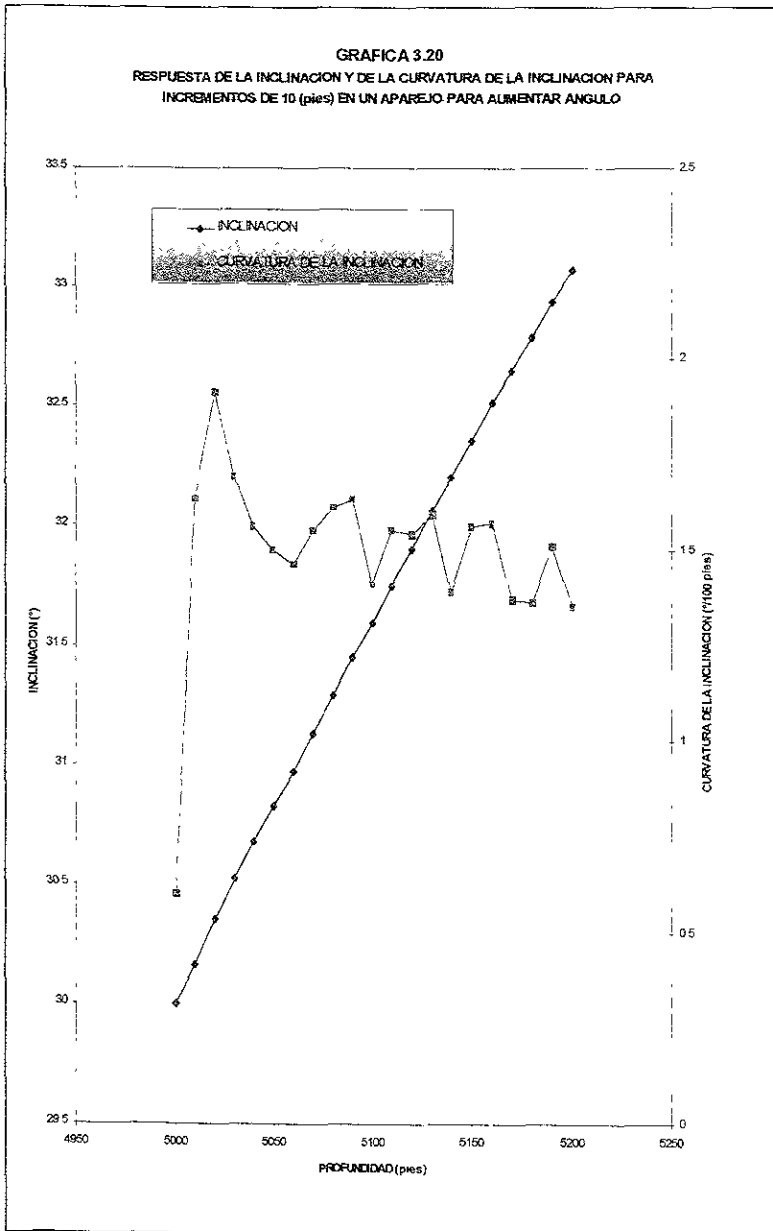
Los resultados muestran que el esquema de predicción de la perforación requiere que el aparejo permanezca cerca al agujero inicial en el que el aparejo empieza a perforar. El modelo de predicción utiliza el agujero para posicionar al aparejo de perforación y para mantener el control sobre la deflexión del aparejo y puntos de contacto.

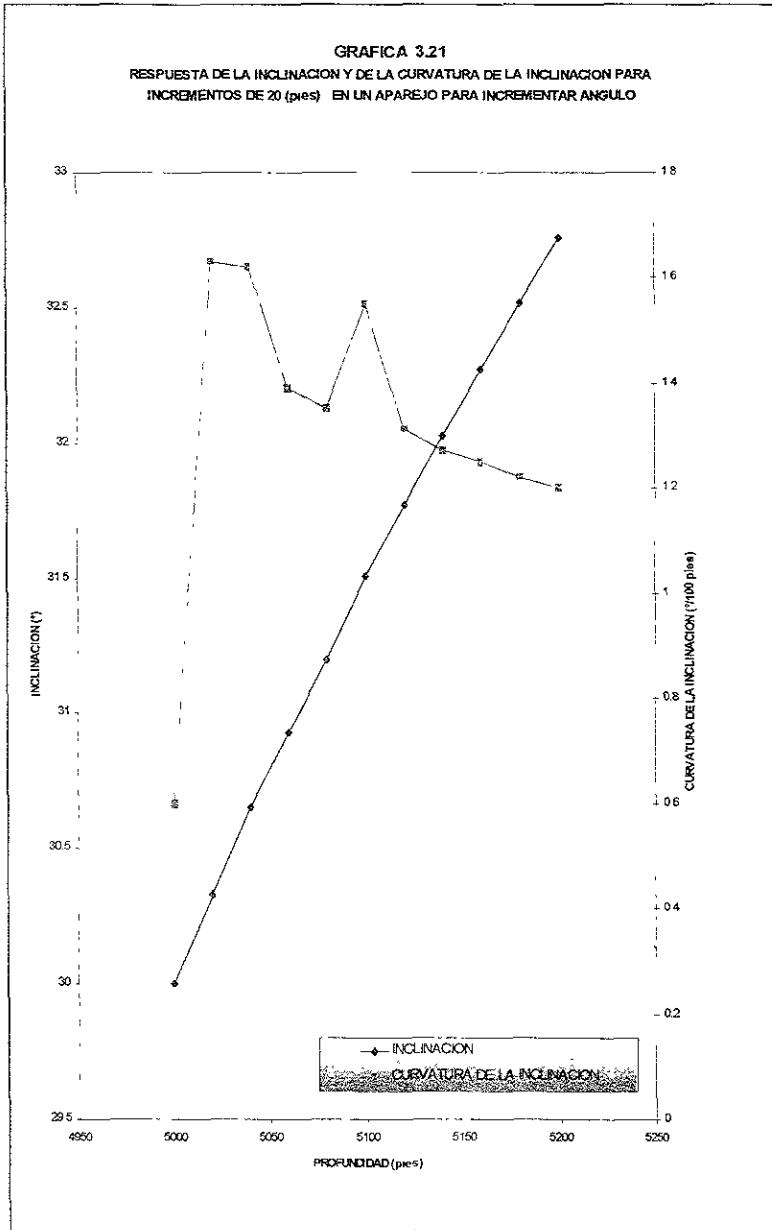
- ◆ La longitud de incremento especifica el intervalo a ser perforado, por ejemplo, 200 pies de intervalo requieren 10 incrementos de 20 pies y se requiere dos veces el tiempo de corrida en incrementos de 10 pies.
- ◆ Es ventajoso utilizar grandes incrementos de simulación para minimizar el tiempo de corrida, pero como se muestra en las figuras, grandes incrementos pueden causar inestabilidad en el algoritmo de cálculo.
- ◆ Primero se muestra la curvatura de inclinación y azimut para un incremento de 5 pies. Existe una "reacción inicial" de disminuir ángulo, posteriormente se alcanza el equilibrio. Un incremento de 10 pies muestra oscilaciones, ambas en frecuencia y amplitud a las obtenidas con incremento de 5 pies
- ◆ Continuar con incrementos de 20 pies resultará en mayores oscilaciones. El algoritmo intenta determinar el equilibrio del ritmo de curvatura, pero tiene dificultades debido a lo grande del incremento. Como el agujero avanza 20 pies cada intervalo de perforación, el aparejo "piensa" que es un nuevo agujero "inicial". En efecto, esta avanzando fuera del agujero inicial muy rápidamente.

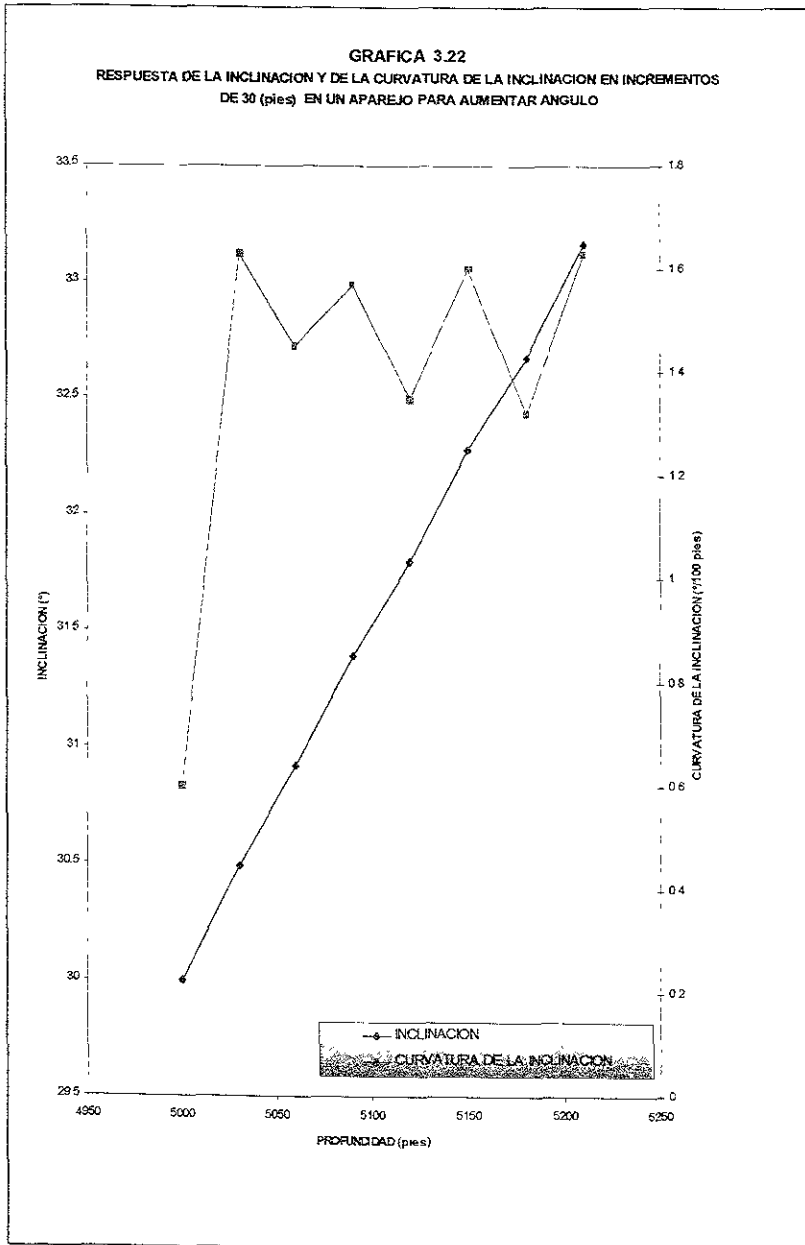
♦ Un incremento tan grande como 40 pies de intervalo, resulta en predicciones pobres. El modelo fluctúa erráticamente y nunca se estabiliza en un ritmo de curvatura constante. El algoritmo no continúa con una predicción adecuada debido a lo grande del incremento de simulación.

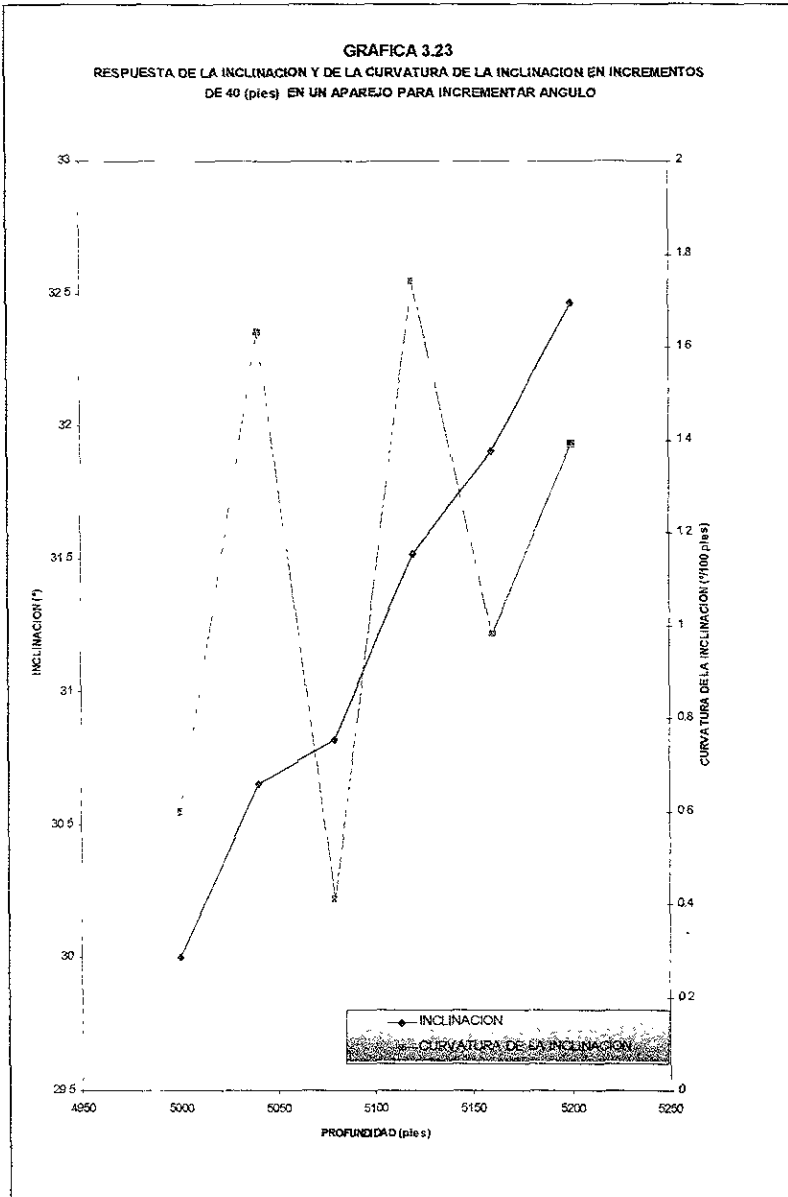
En la siguiente serie de gráficas (3.19 a 3.33) se muestran los resultados de los tres aparejos tipo con variaciones de 5,10,20,30 y 40 pies

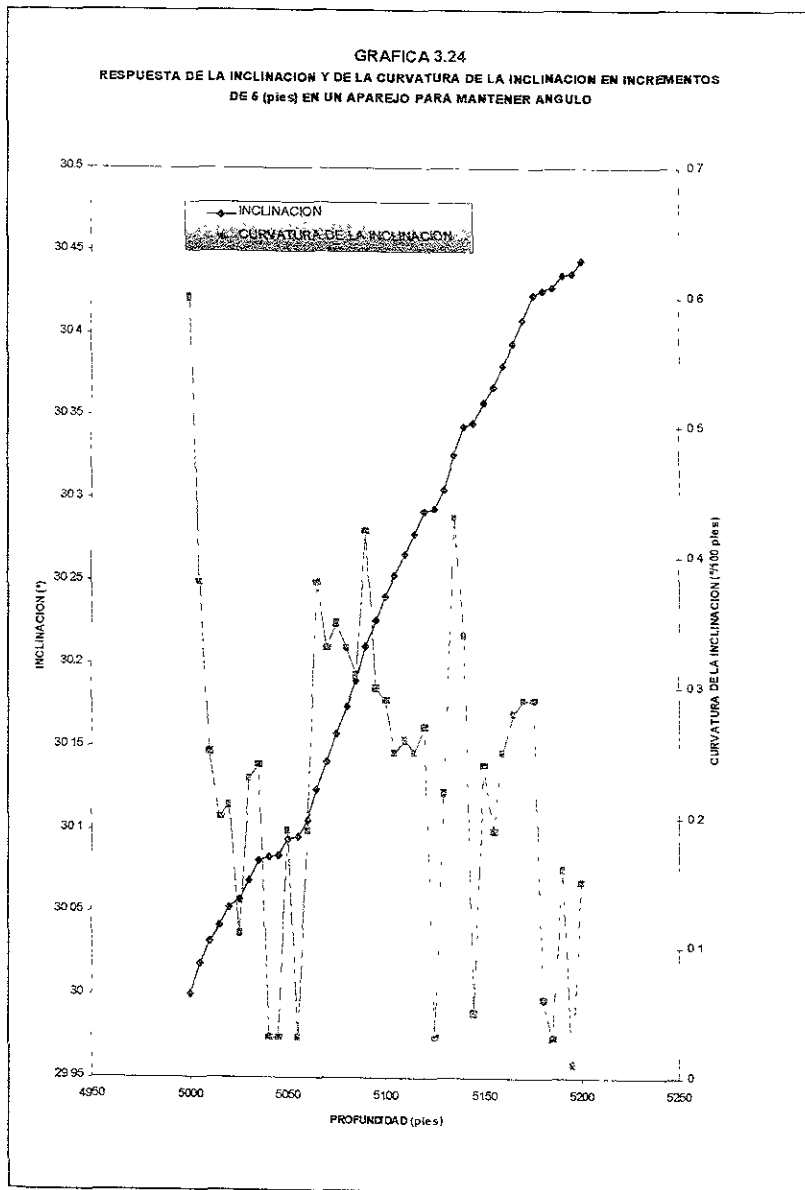


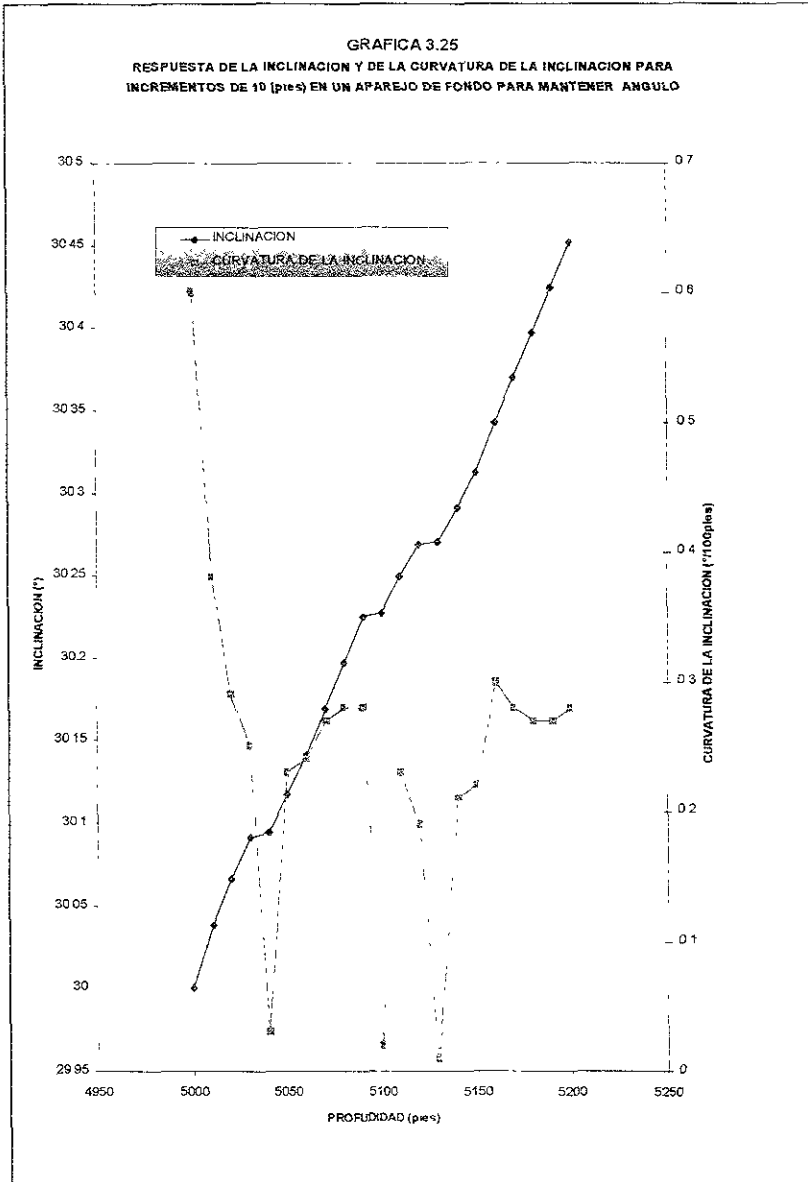


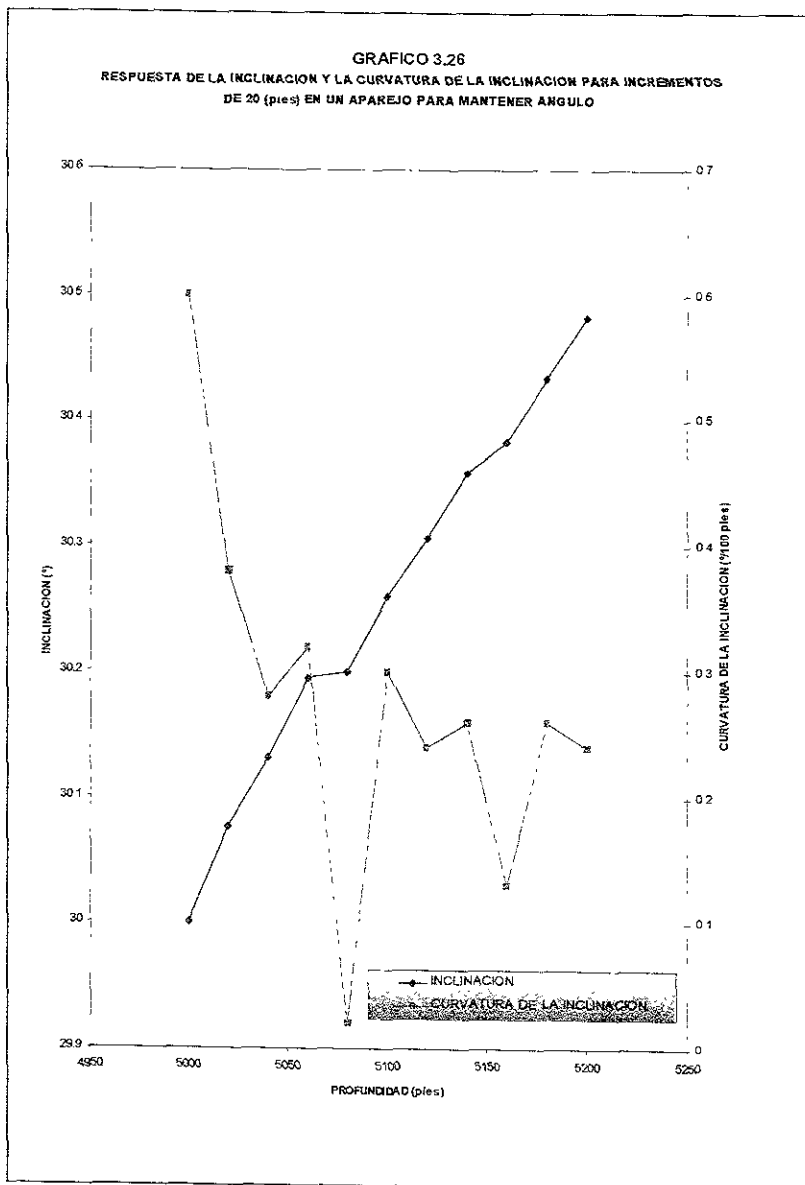


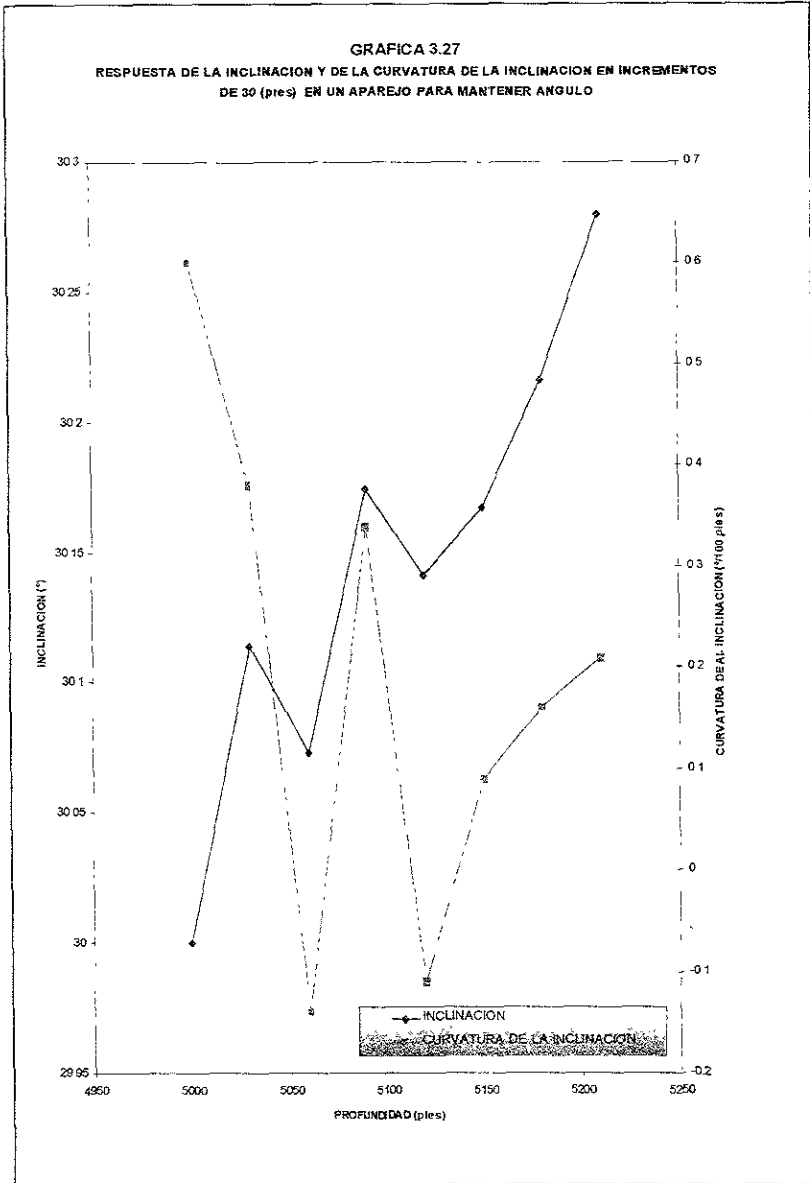


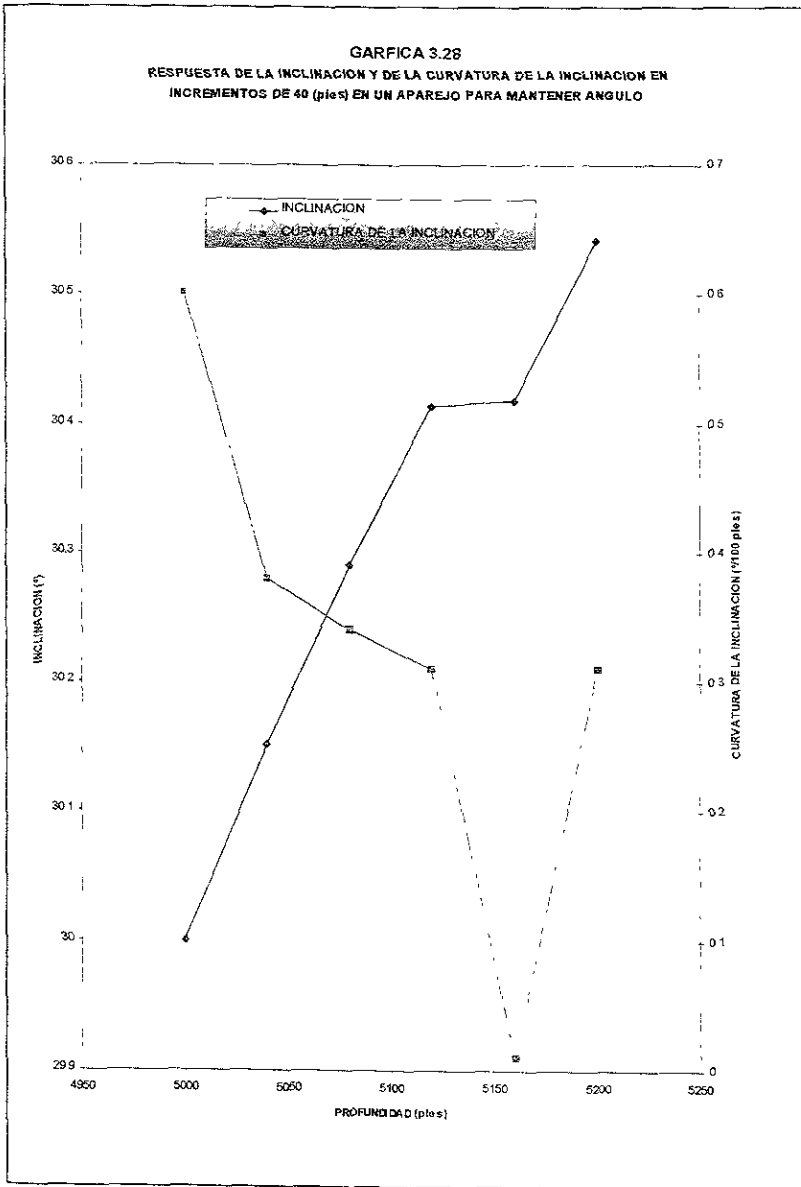


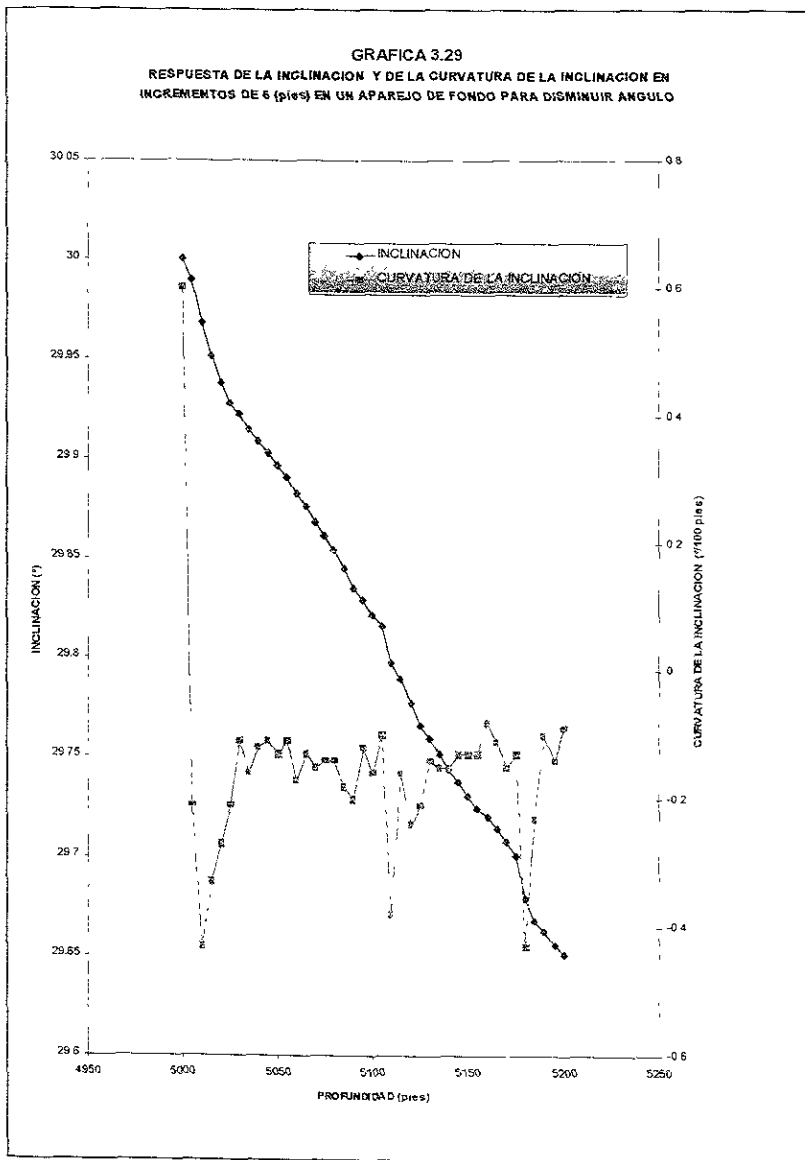


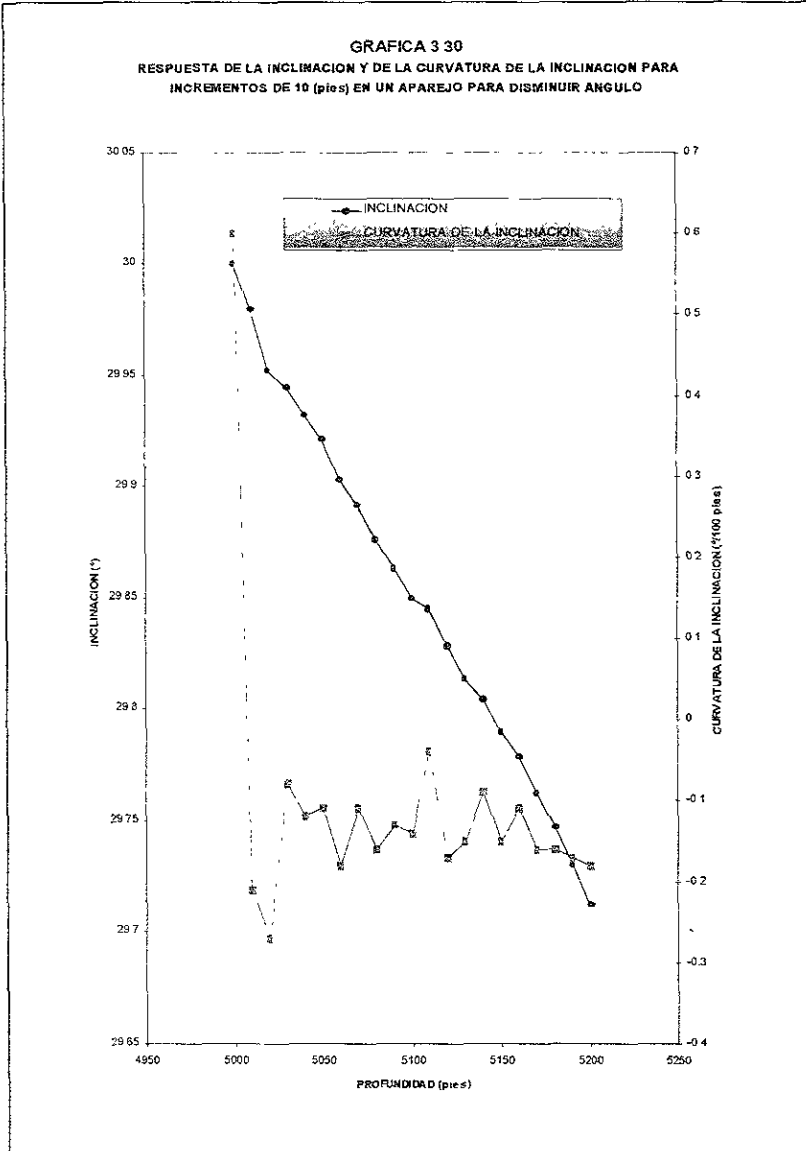


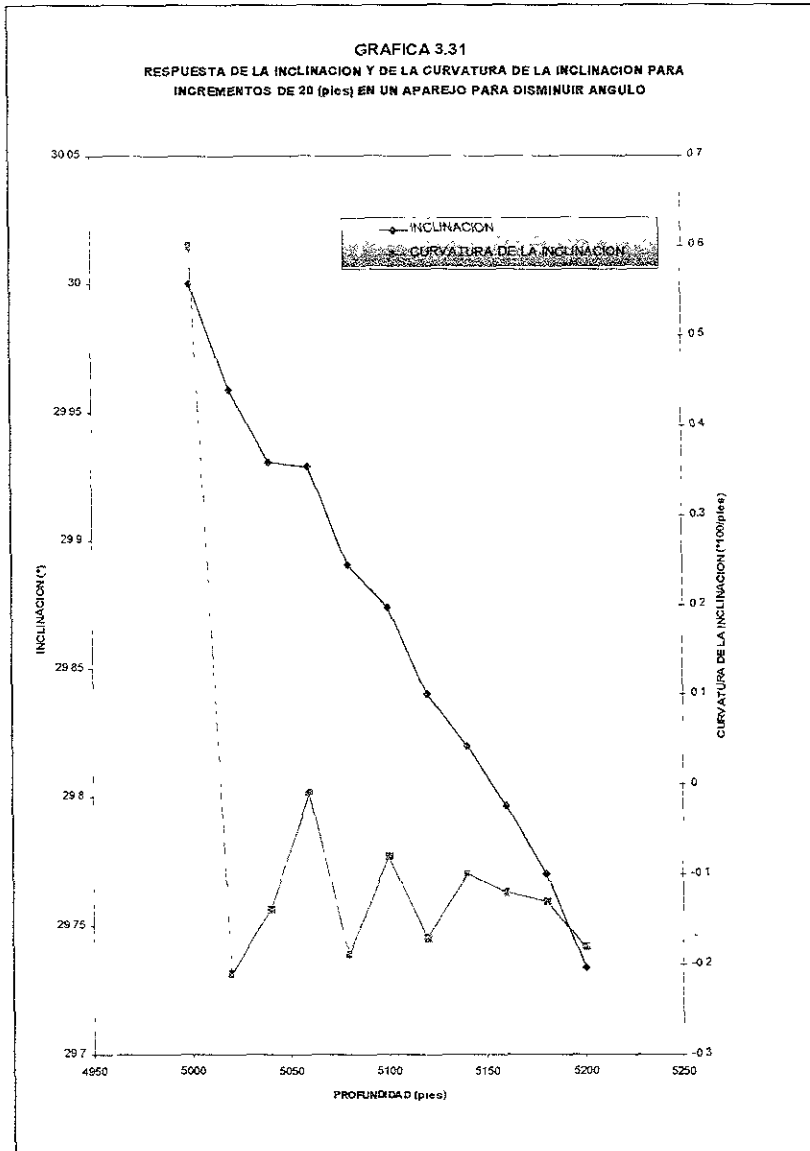


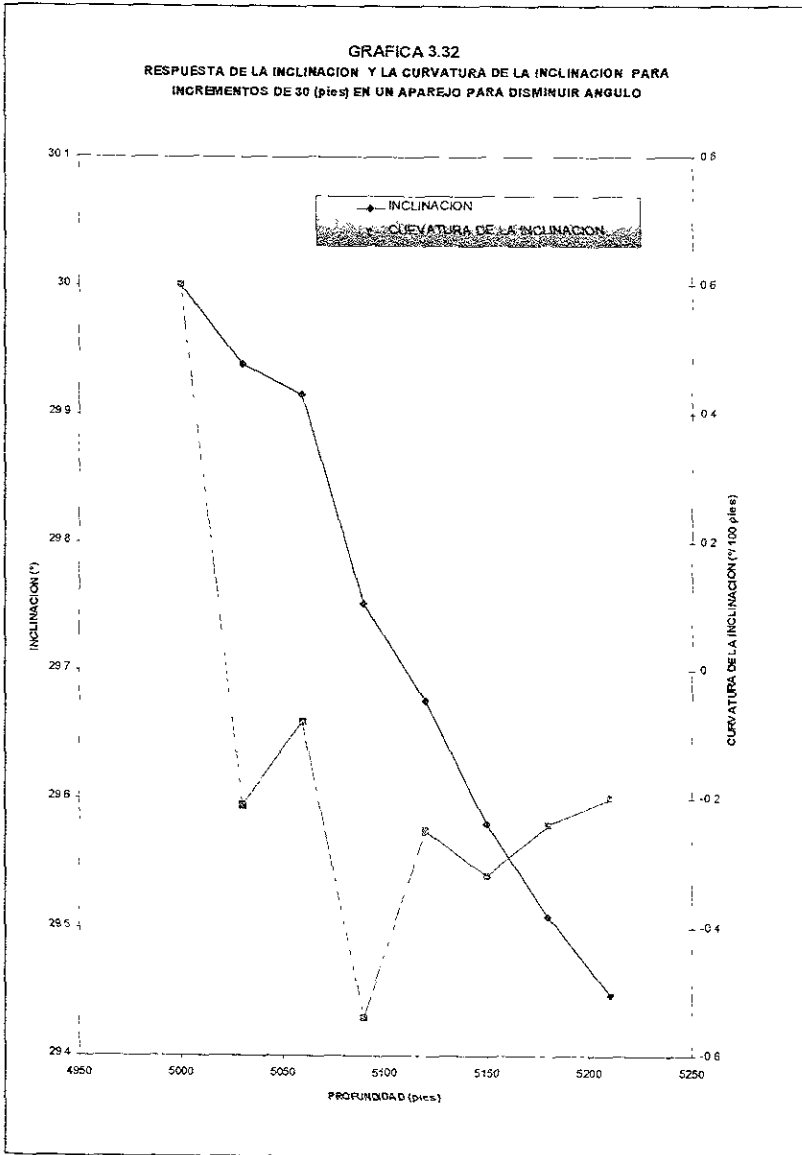


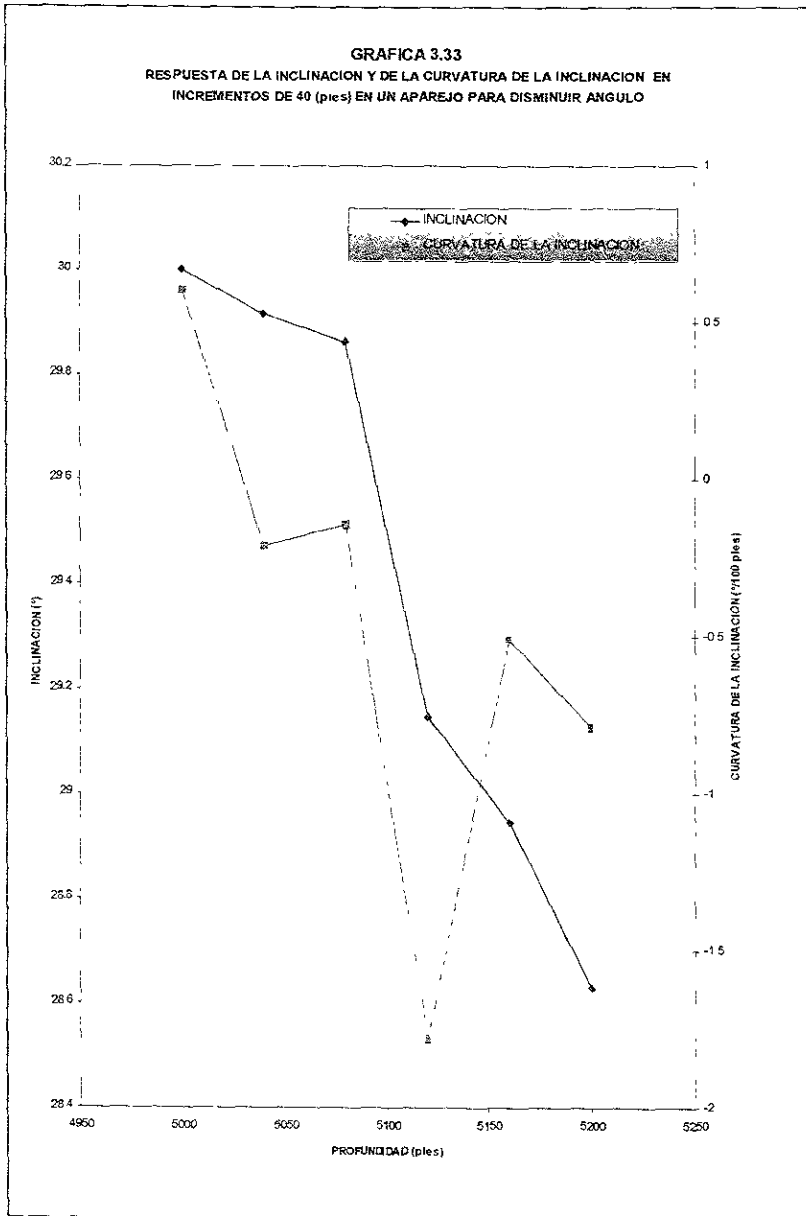






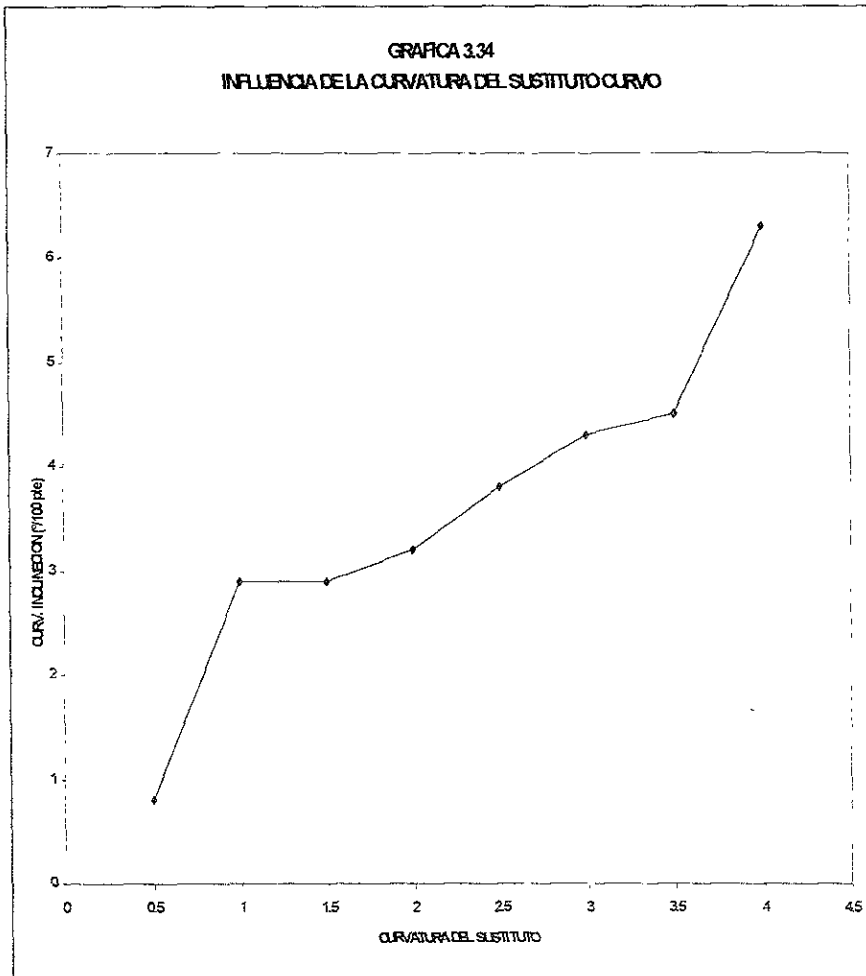






III.9 ANGULO DEL SUSTITUTO CURVO

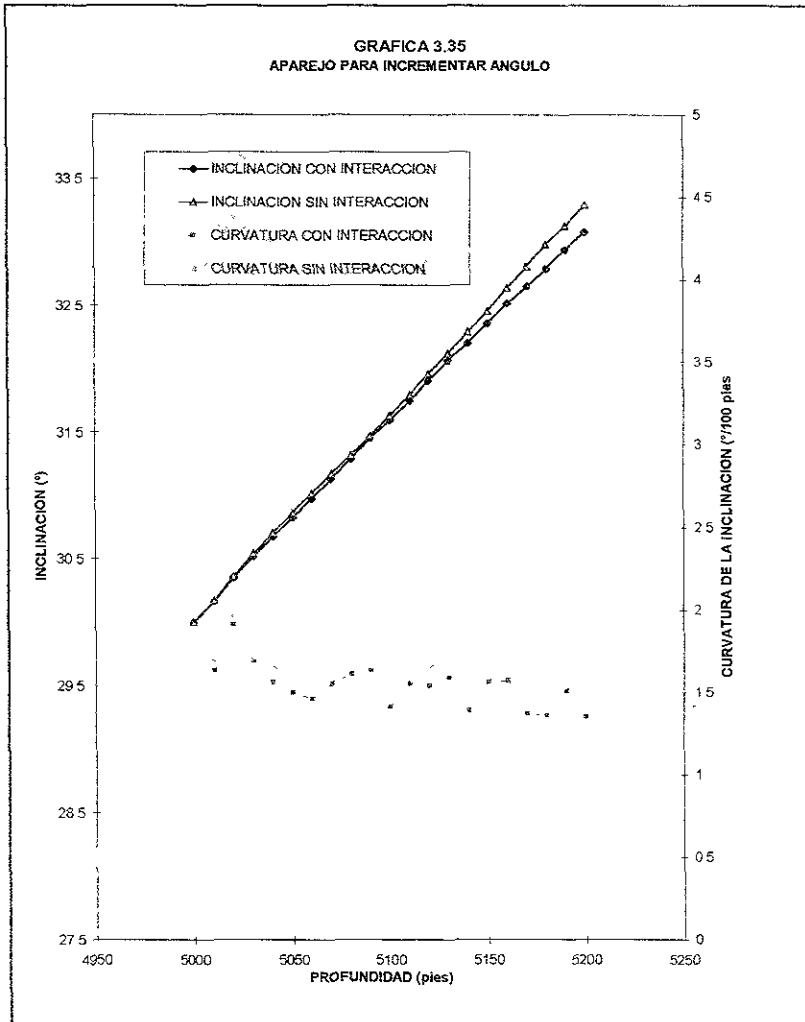
La gráfica 3.34 muestra como el aparejo comienza a construir ángulo al incrementar el ángulo del sustituto curvo. Es importante aclarar que la orientación de la cara del sustituto va de 0° a 360° empezando en la parte alta del pozo 0° y en la baja 180° , la medición se hace en sentido de las manecillas del reloj.



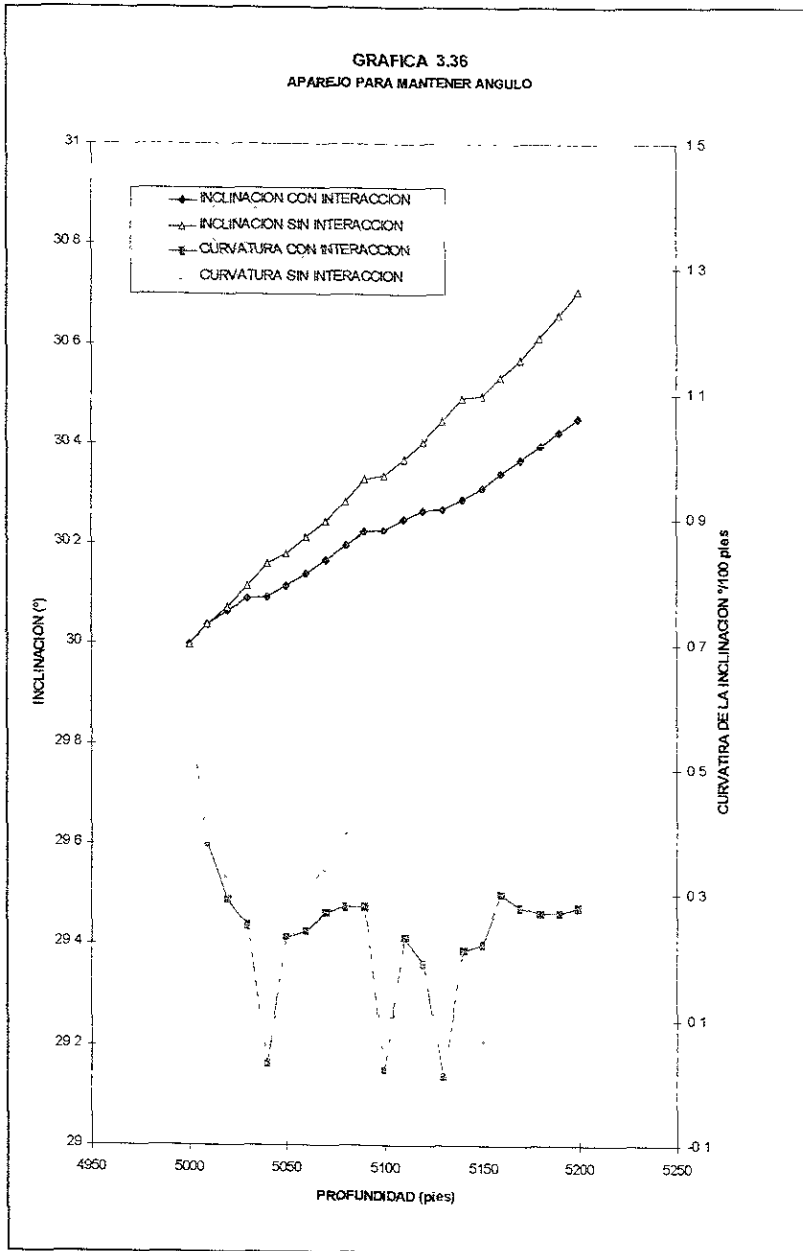
III.10 ITERACIÓN ROCA BARRENA

Las gráficas 3.35, 3.36 y 3.37 muestran los ritmos de curvaturas e inclinaciones para los tres aparejos tipo para el caso en que se utilize el simulador con y sin iteración roca barrena.

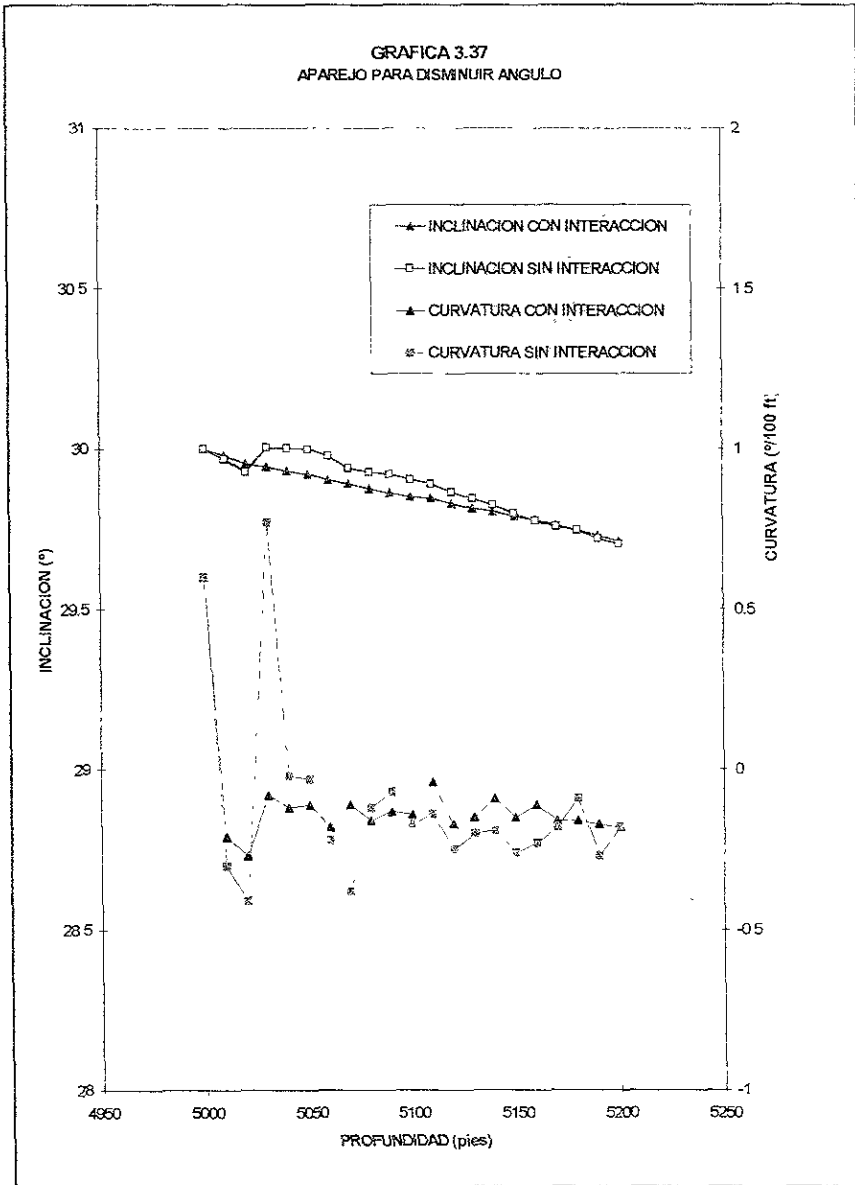
INCREMENTAR ÁNGULO



MANTENER ÁNGULO



DISMINUIR ÁNGULO



CAPITULO IV

VALIDACION DEL SIMULADOR

IV.1 INTRODUCCIÓN

Antes de iniciar el empleo del simulador para el diseño de los aparejos de fondo es conveniente el efectuar una validación de los resultados apartados. Esto preferentemente se debe efectuar en campo, mediante la medición continua de variaciones en el comportamiento de diferentes aparejos con respecto a la respuesta esperada de este simulador.

Sin embargo por cuestiones económicas y de tiempo, se decidió efectuar esta validación a través de la comparación de resultados obtenidos, con datos ya medidos del pozo Cuitláhuac 671-H A partir de la información de registros de desviación, echados conocidos y sartas de perforación, hasta obtener mediante el ajuste de las variables pertinentes, un resultado igual o aproximado a los resultados obtenidos durante la perforación del pozo mencionado.

En esta sección se presentan las respuestas obtenidas del simulador, a los datos introducidos de la información proporcionada del pozo Cuitláhuac 671- H, se comparan los resultados obtenidos con los medidos

IV.2 SIMULADOR DE PERFORACIÓN

Los parámetros que influyen en el comportamiento del aparejo de fondo son

- ◆ Forma y dimensiones de cada componente
- ◆ Módulo de elasticidad 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

El programa TUIMP se presenta detallado en el anexo 1 acompañado de una guía de instalación

IV.3 VALIDACIÓN DE TUIMP

Con el objeto de validar la utilidad del simulador de perforación TUIMP, se recabó información del pozo Cuittáhuac 671 H, de donde se efectuaron las corridas del simulador, considerando los aparejos 1 - 8 mostrados en este mismo capítulo, se presentan en gráficos los resultados obtenidos de cada aparejo simulado

Los aparejos 1, 2 y 3, (figura 4.1) son idénticos y sólo se hacen variar las condiciones de operación. Así mismo los aparejos 4, 5 y 6 (figura 4.2) y finalmente los aparejos 7 y 8. (figura 4.3)

A continuación se muestra inicialmente el dibujo del aparejo simulado seguido de su gráfico resultante de la simulación efectuada, dichas gráficas corresponden a **profundidad vs. azimut y profundidad vs. inclinación.**

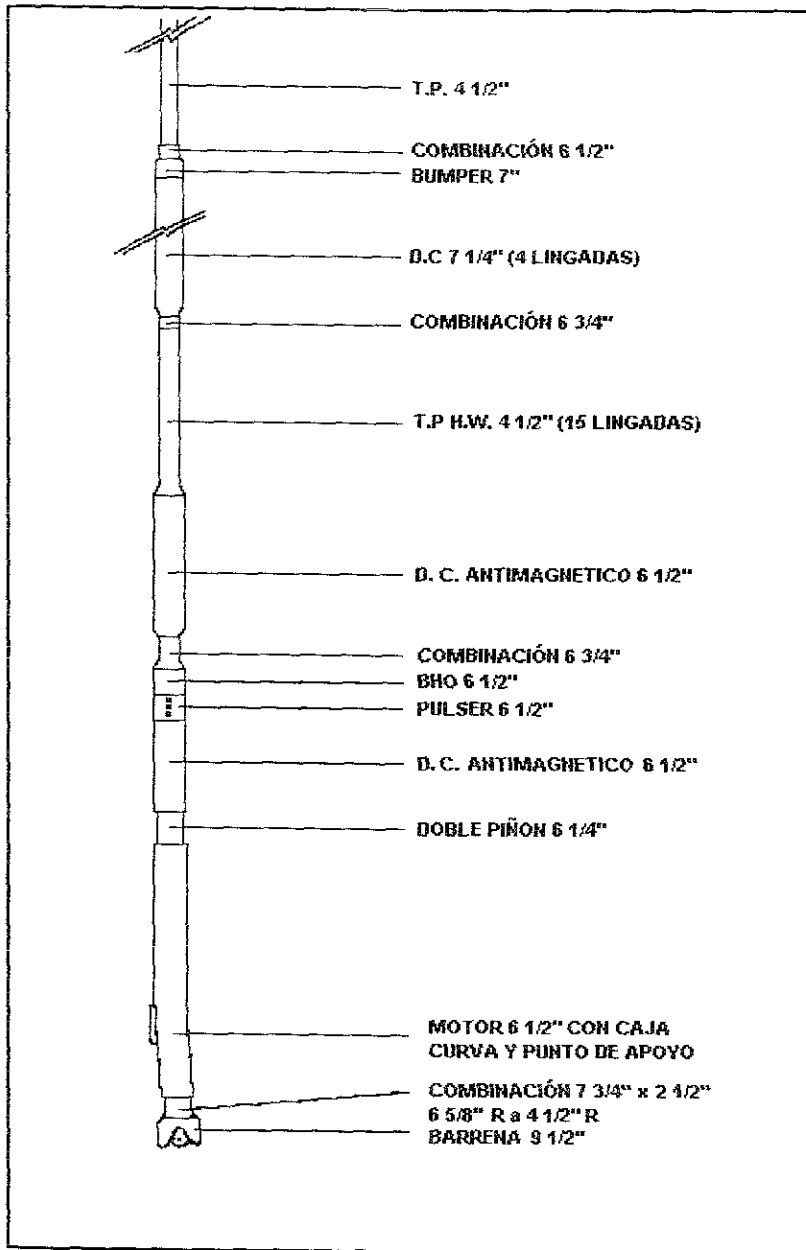
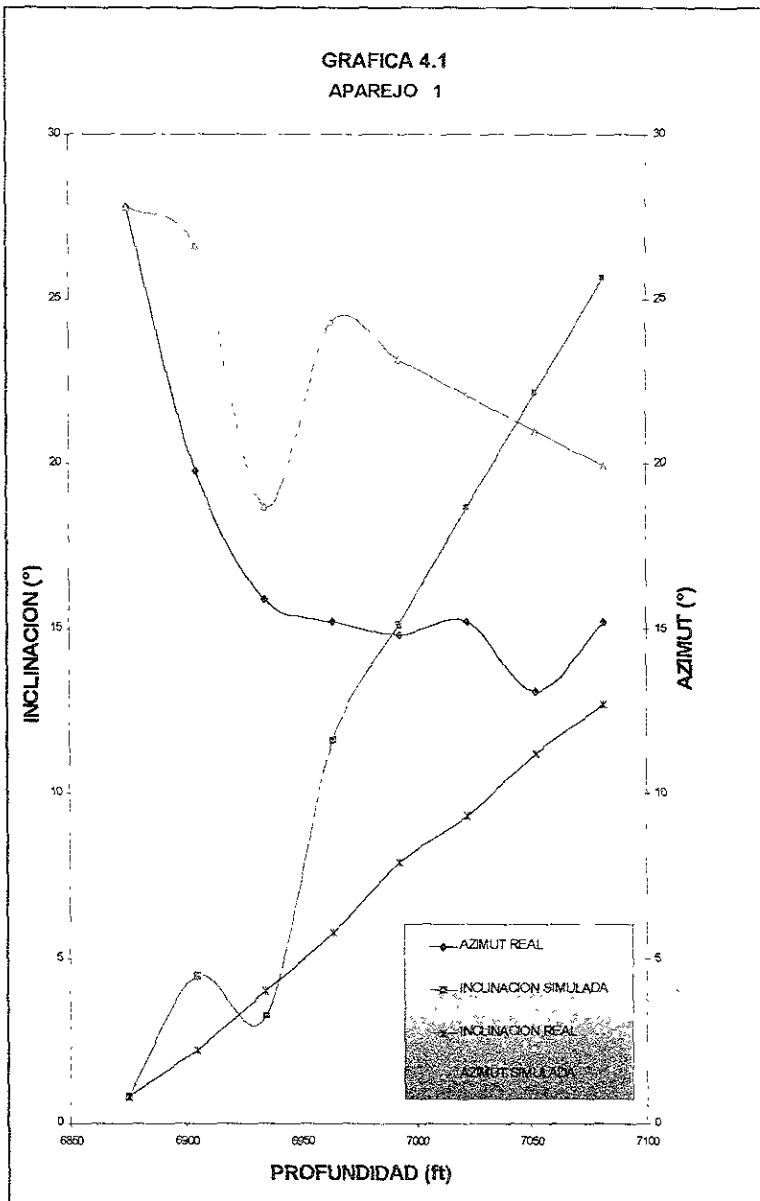
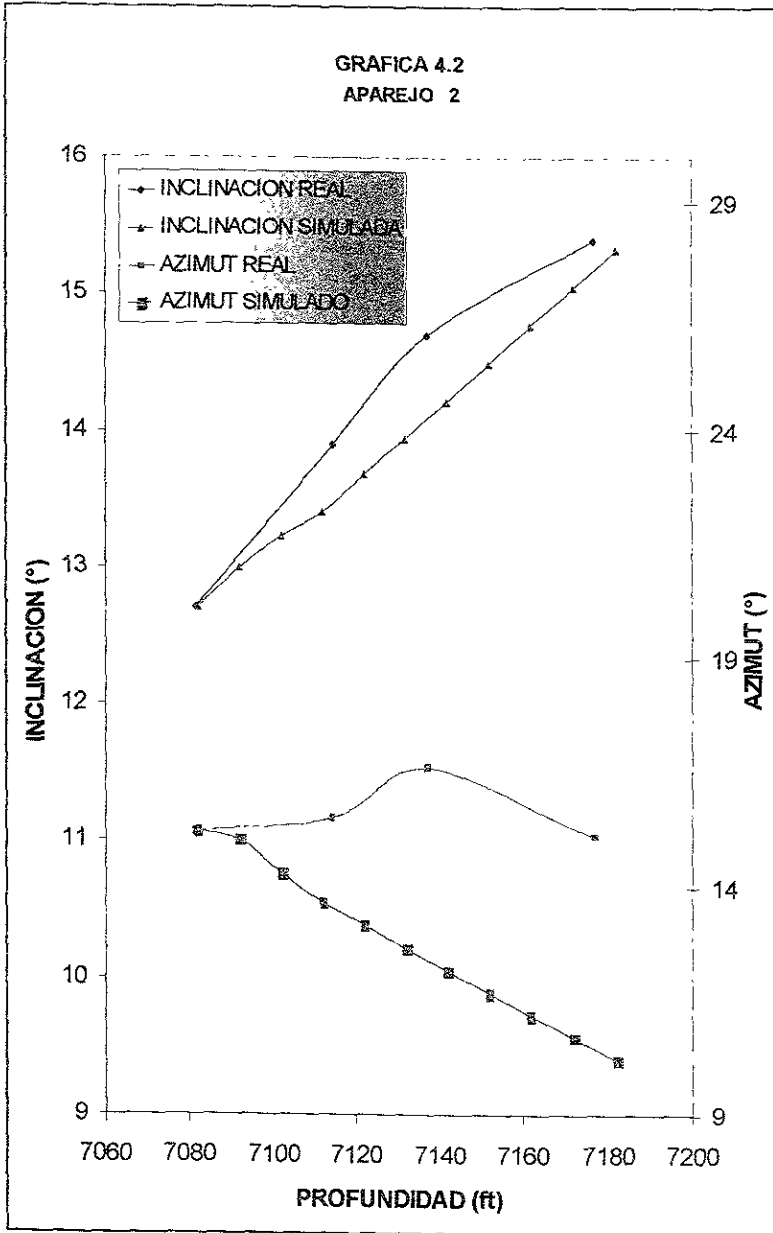


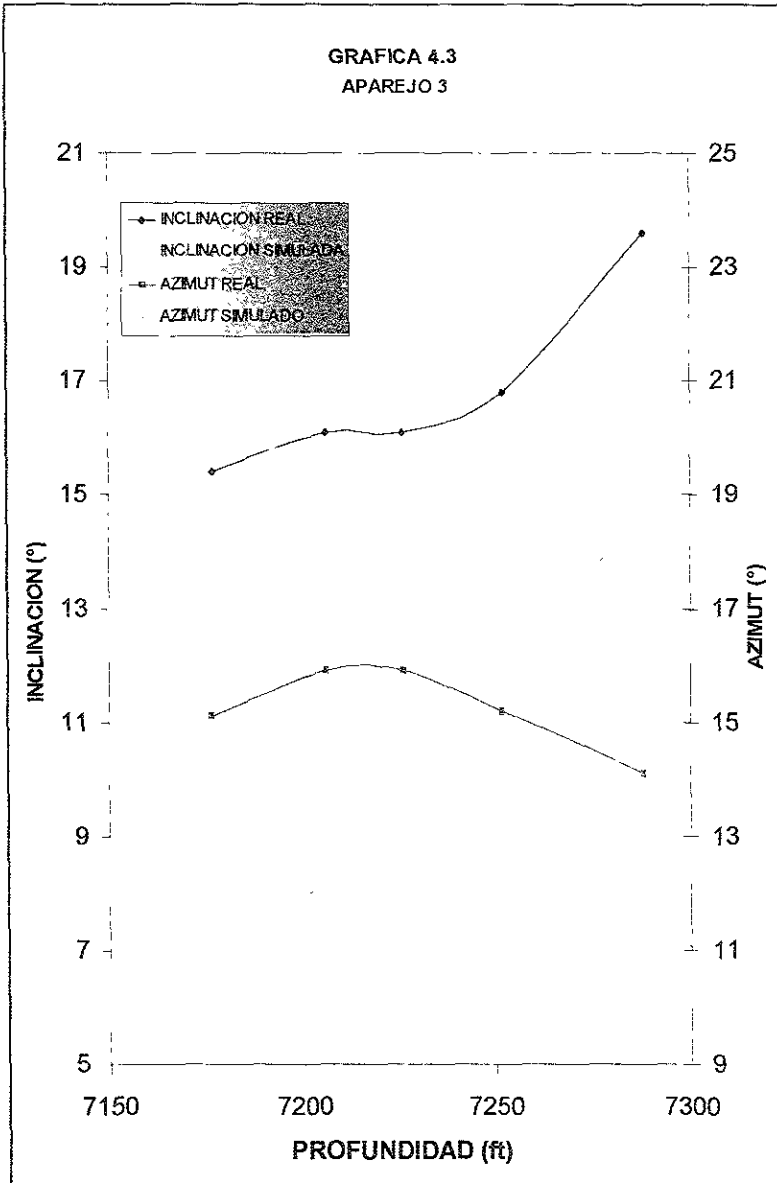
Figura 4.2 Aparejos de fondo 1, 2 y 3



Gráfica 4.1 Respuesta del simulador del aparejo 1 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.



Gráfica 4.2 Respuesta del simulador del aparejo 2 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.



Gráfica 4.3 Respuesta del simulador del aparejo 3 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.

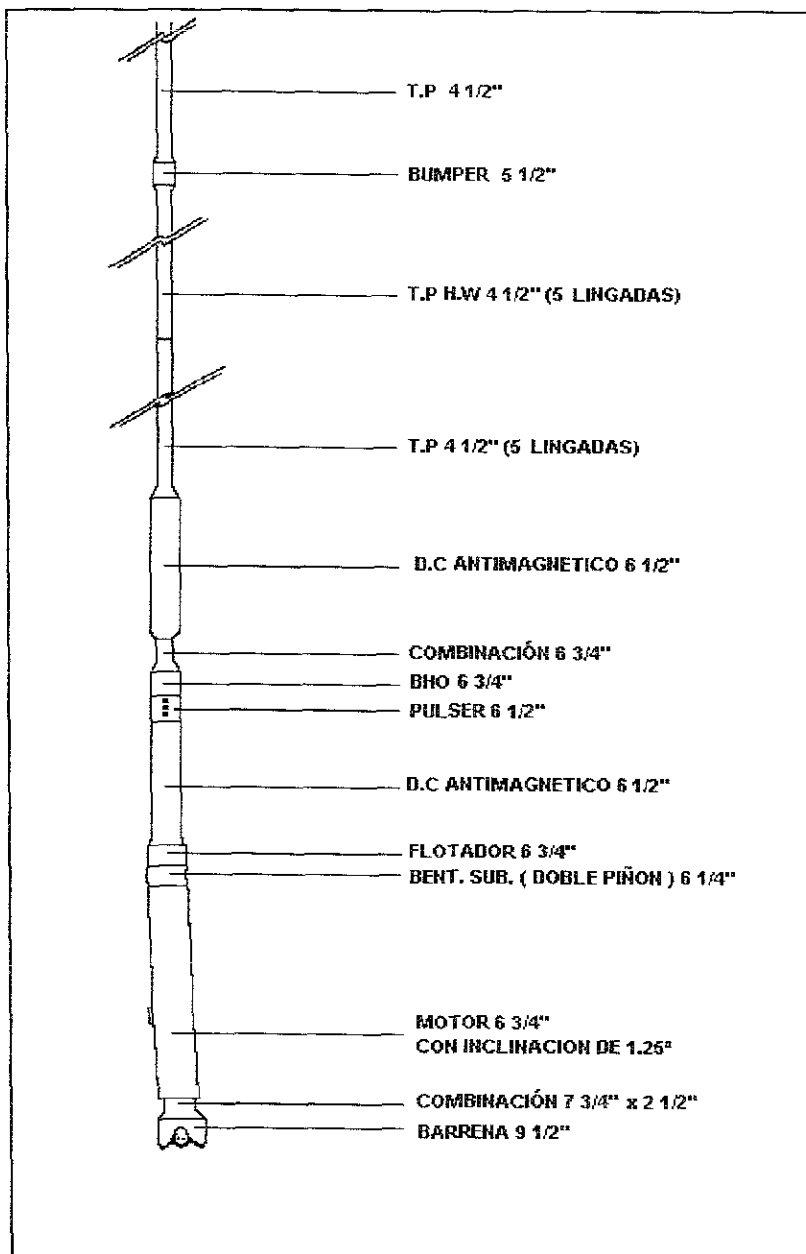
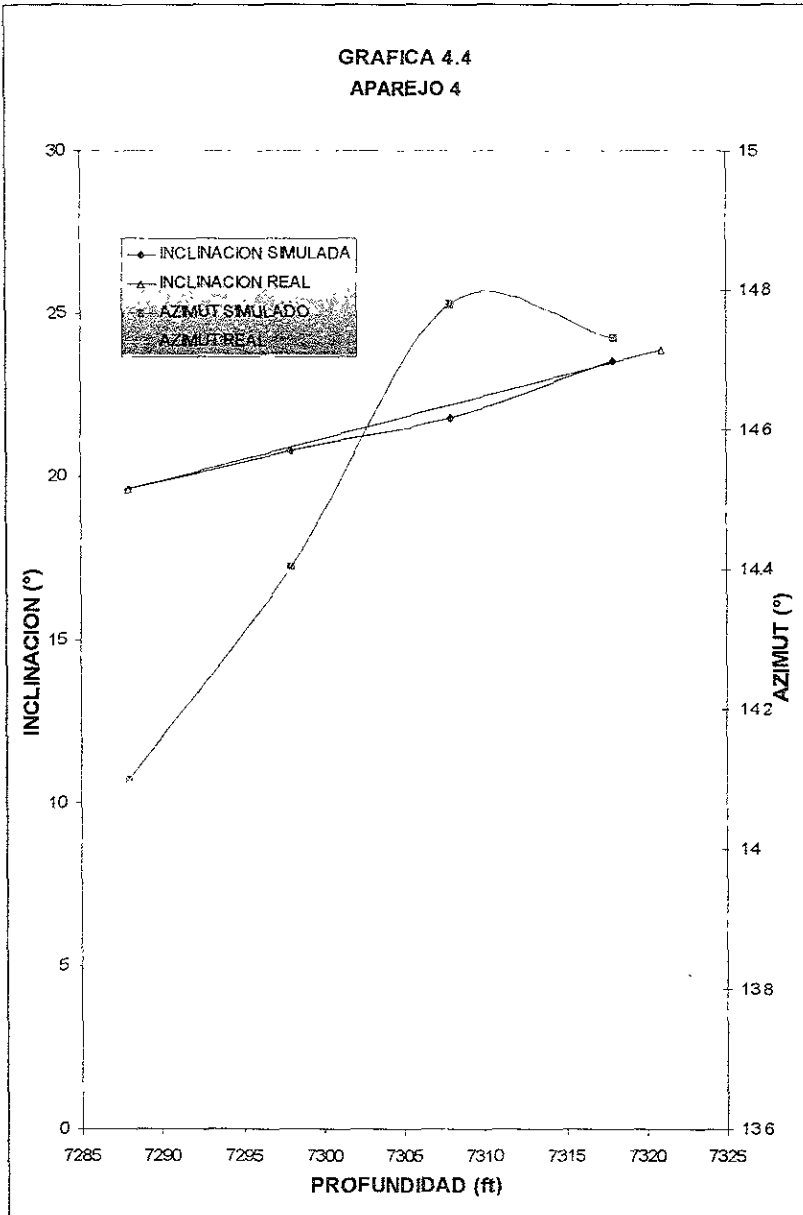
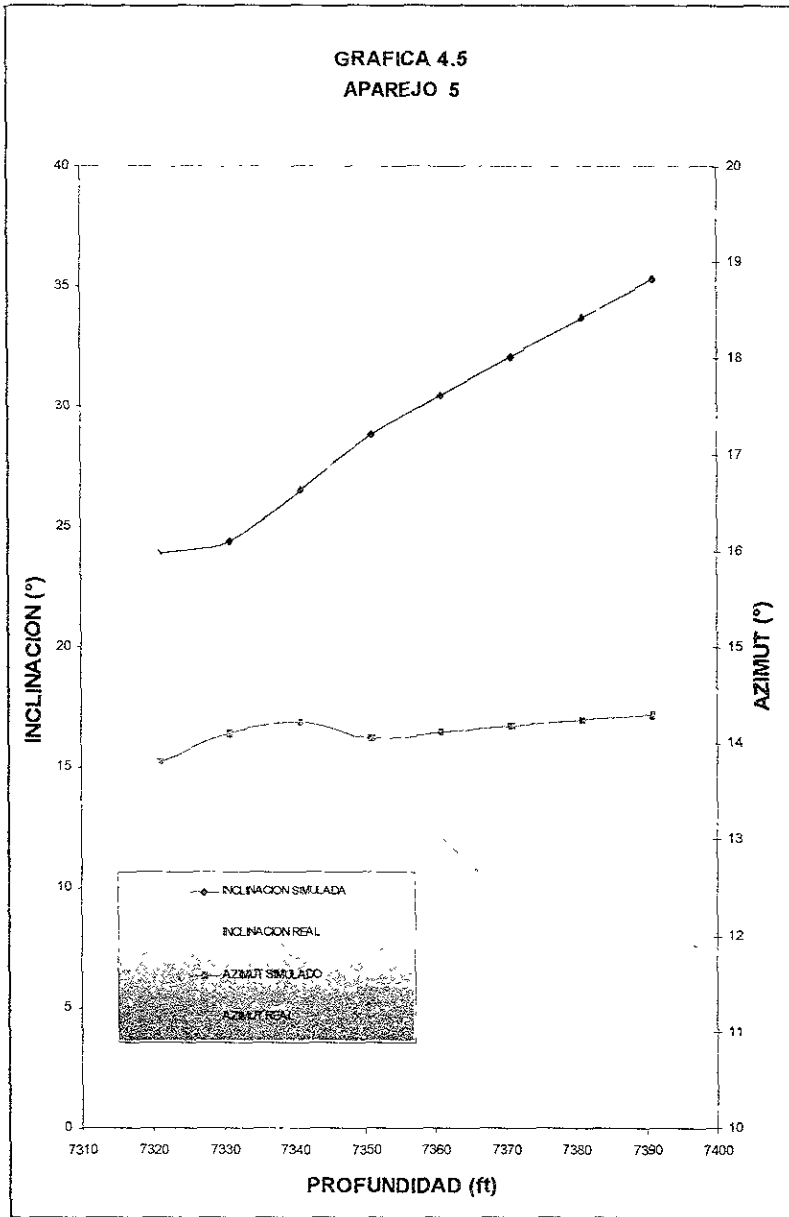


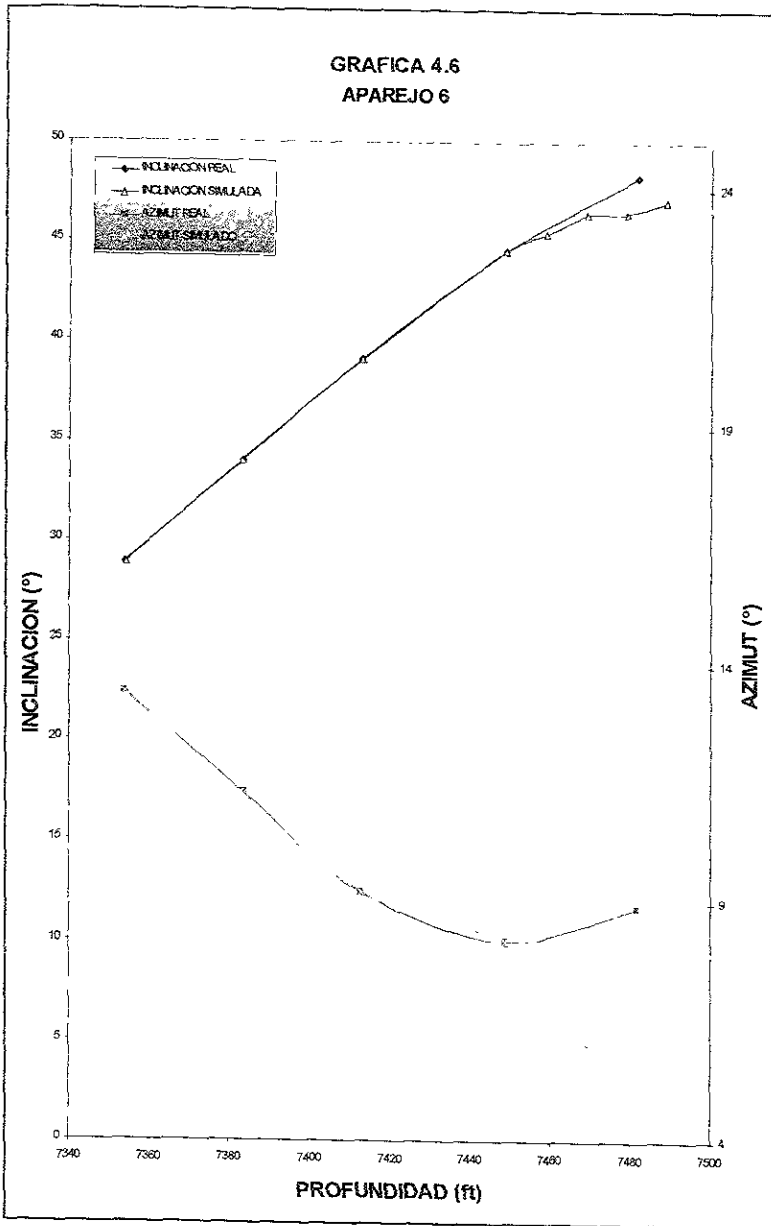
Figura 4.2 Aparejos de fondo 4, 5 y 6



Gráfica 4.4 Respuesta del simulador del aparejo 4 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.



Gráfica 4.5 Respuesta del simulador del aparato 5 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.



Gráfica 4.6 Respuesta del simulador del aparejo 6 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.

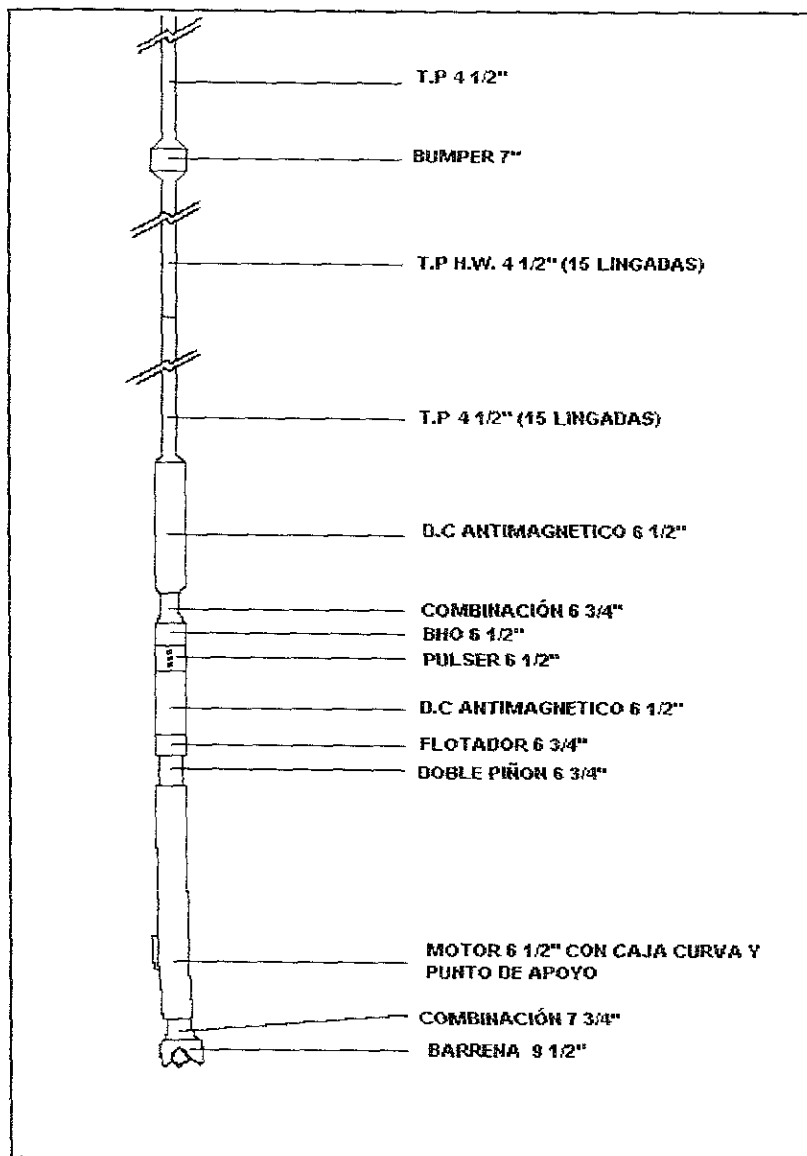
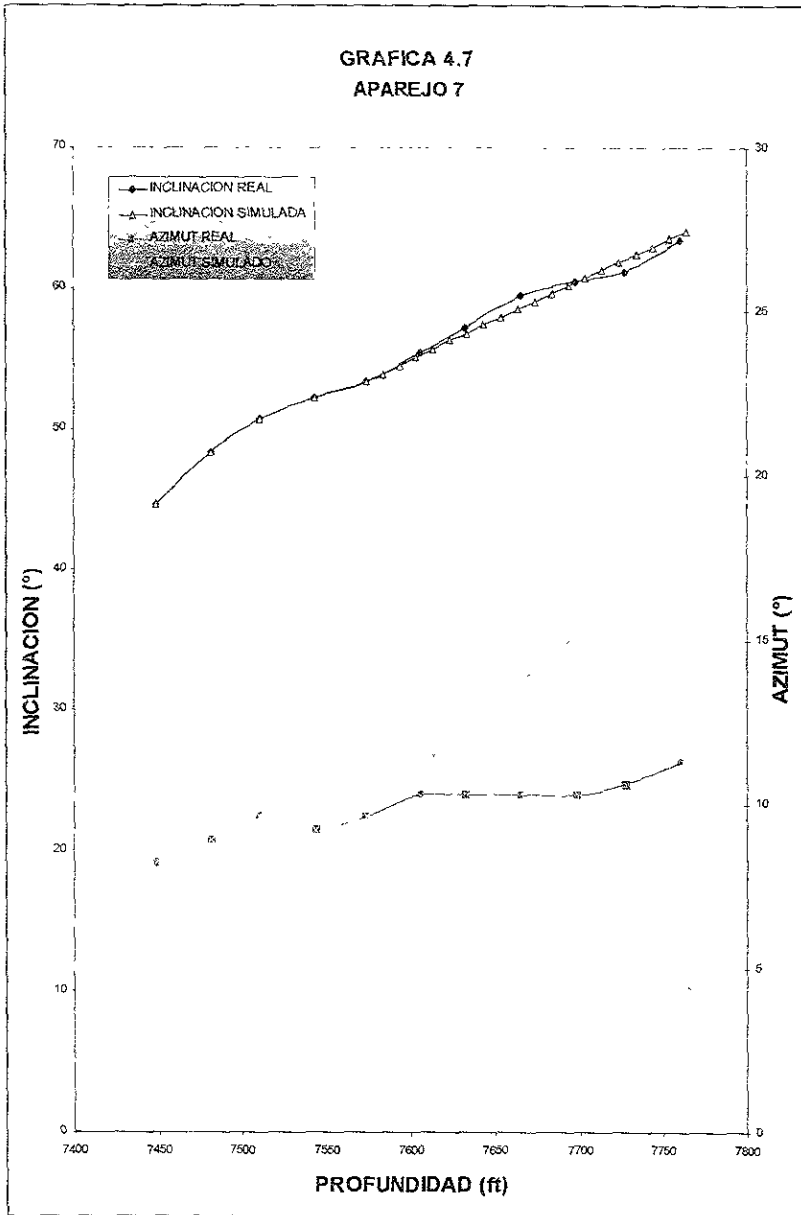
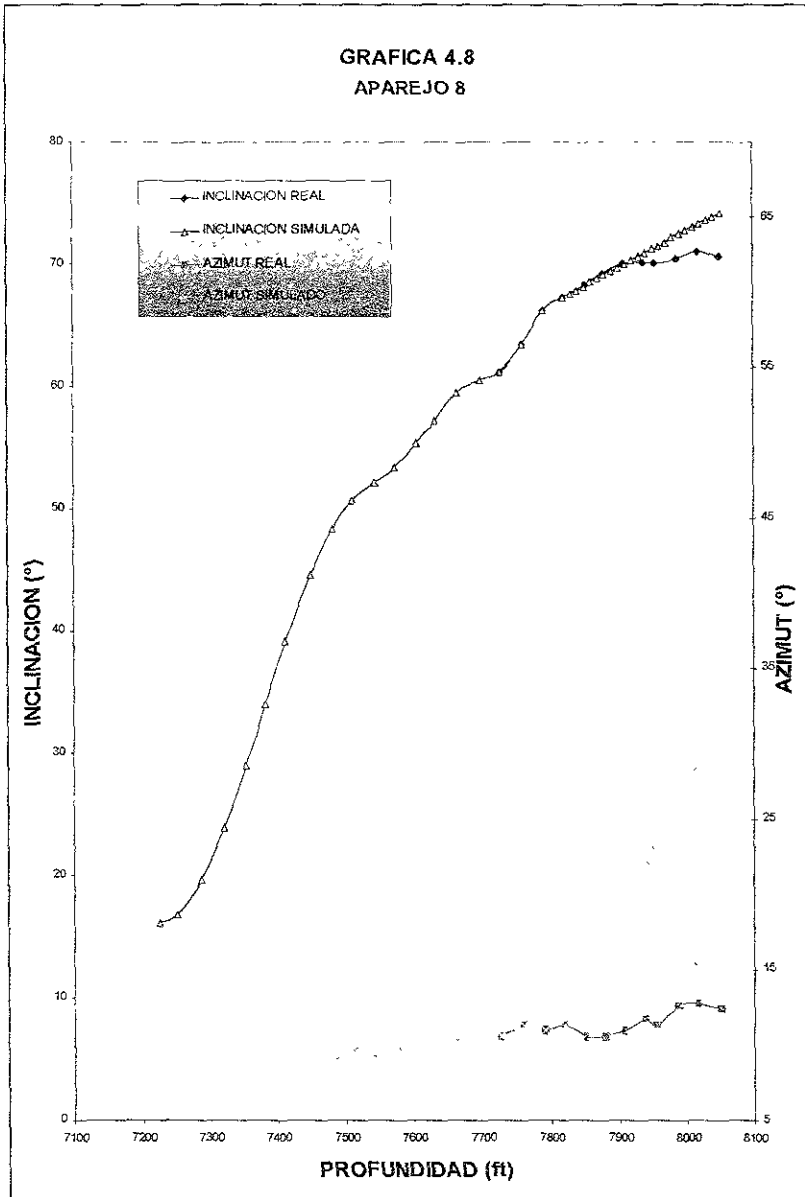


Figura 4.3 Aparejos de fondo 7 y 8



Gráfica 4.7 Respuesta del simulador del aparejo 7 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.



Gráfica 4.8 Respuesta del simulador del aparato 8 obtenida con los datos del pozo, se comparan con los resultados medidos.

IV.4 COMPARACION CON OTROS SIMULADORES.

En la tabla 6 se muestra la comparacion de los resultados de la simulación del comportamiento del TUIMP, y del WELLPLAN⁴¹ Esta comparacion se hace con datos del pozo Nazareth No.1 Con el fin de hacer esta comparación Se obtuvieron datos de campo reales relativos a la trayectoria del registro multishot, configuraciones de los aparejos de fondo y condiciones de operación del registro diario de operaciones así como de datos de echados de pozos vecinos. Es importante aclarar que el WELLPLAN opera de un modo dinámico mientras que el TUIMP es cuasiestatico.

APAREJO	TUIMP		REAL		WELLPLAN	
	INCLINACION	AZIMUT	INCLINACION	AZIMUT	INCLINACION	AZIMUT
1	0.85	30	1	40	1.26	23.86
2	0.96	35.6	0.5	40	2.85	20.71
3	0.71	42	0.75	40	0.53	51.37
4	0.74	39.9	1	40	0.78	45.42
5	1.51	41.43	1	40	1.06	42.63
6	0.81	39.6	2	40	1.22	49.53
7	3.04	45	2.75	40	2.03	40.96
8	2.56	55.17	2.75	55	3.01	52.92

Tabla 5 Comparación de los resultados de los simuladores TUIMP Y WELLPLAN en cada aparejo ⁴¹

En general ambos simuladores presentan resultados aceptables para la inclinación y azimut con las peculiaridades que son características de cada uno.

Para el caso del WELLPLAN en su modo dinámico presenta resultados con mejor ajuste que los obtenidos en el modo estático, al comparar con datos reales, mientras que el TUIMP presenta mejor ajuste en su modo anisotrópico en lo relativo al echado de las formaciones atravesadas.

El WELLPLAN presenta el inconveniente de no considerar el echado y rumbo de las formaciones así como el truncamiento de la simulación debido al número de componentes.

Para el TUIMP, que si considera el echado, la limitante es que opera en modo cuasiestático, pues el planteamiento teórico se complicaría considerablemente y los tiempos de simulación se elevarían siendo contrario a los objetivos planteados para este simulador, lo cual está respaldado por pruebas y datos de campo en los que se presenta un comportamiento bastante aceptable.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se han desarrollado un gran número de modelos para tratar de predecir la trayectoria del pozo a partir del comportamiento del aparejo de fondo. Actualmente existen simuladores que incluyen la mayoría de las variables involucradas en el fenómeno. Estas pueden ser agrupadas de la siguiente forma:
 - ◆ Geometría del pozo; trayectoria y estado mecánico
 - ◆ Condiciones de operación
 - ◆ Descripción del aparejo de fondo
 - ◆ Características de la formación; dureza, índices de anisotropía, echado, rumbo, etc.

- No es posible emplear todas las variables anteriores simultáneamente, debido a la complejidad matemática que implica el incluirlas dentro de la técnica de elemento finito (FEM). Por lo anterior, TUIMP, que considera el echado y rumbo de la formación, es cuasiestático. Por lo tanto la velocidad de rotación y el ritmo de penetración no se toman en cuenta.

- El estudio de sensibilidad mostrado en esta tesis resalta la habilidad de respuesta del simulador para los diferentes aparejos de fondo y condiciones de operación. Esto es de suma importancia, ya que proporciona una base para comprender el funcionamiento y el rango de variación de ciertos parámetros (para optimizar su empleo), con la finalidad de obtener diseños más precisos de los aparejos de fondo que se utilizaran en campo.

- La versatilidad mostrada por el simulador indica que puede ser empleado para una gran variedad de aparejos, prácticamente sin restricciones.

- Para el simulador de la presente tesis, se realizó una validación con datos de campo, obteniendo resultados aceptables,
- Se recomienda que para el empleo de este simulador en un campo específico, se realice un ajuste de los parámetros apropiados como es la dureza de la formación, los índices de anisotropía de la formación, etc.
- Los gráficos desarrollados pueden ser empleados como una primera aproximación para la utilización del TUIMP, en el diseño de los aparejos de fondo, pues consideran valores de los parámetros denominados "base" (densidad de lodo, dureza de la formación, tipo de barrena, claro radial, peso sobre barrena, etc.), los cuales al tener variación pueden afectar los resultados. Esta variación se puede analizar a través del estudio de sensibilidad.
- Debido a que el programa se desarrolló en lenguaje de programación Visual Basic 5.0, cualquier usuario con conocimientos básicos en programación puede ejecutar las rutinas y correr el simulador.
- TUIMP puede ser ejecutado en campo cuantas veces sea necesario debido al ahorro de tiempo de cada corrida y la facilidad con que se accesan los datos.
- TUIMP como todo programa es susceptible de ser mejorado.
- Finalmente se recomienda anexar gráficas en versiones posteriores.

NOMENCLATURA

A	Elemento de área transversal
E	Módulo de Young (con subíndices)
F	Fuerza interna (con subíndices)
$[F_e]$	Elemento de vector de fuerza interna
$[F_{ge}]$	Elemento de vector de fuerza geométrica
F_{gl}, F_{el}	Vector de fuerzas internas global, local
F_r	Fuerza de contacto resultante
F_{TH}	Componente horizontal de carga axial
F_{Y1}, F_{Z1}	Componentes de fuerzas de contacto
$[]_G$	Sistema de referencia de coordenadas global
h	Índice de anisotropía
h'	Relación de permeabilidades paralela a perpendicular
I	Momento de inercia
J	Momento polar de inercia
$[K_e]$	Elemento de matriz de rigidez
K	Parámetro de carga axial
L	Elemento de longitud
$()_L$	Sistema de referencia de coordenadas local
M	Momento interno (con subíndices)
MD	Profundidad medida
N	Número de componentes en el segmento de longitud libre
N,E,V	Coordenadas rectangulares Norte, Este, Vertical
m	Número total de elementos en la malla del BHA
N	Fuerza axial
R	Radio de curvatura
R'	Radio de curvatura exterior
T	Carga axial
Ti	Elemento de matriz de transformación
ΔT	Incremento de carga axial
$[T]$	Matriz de transformación
u	Desplazamiento

$[U_e]$	Elemento de vector de desplazamiento
$[U]^n$	n-esima iteración del desplazamiento
x	Posición axial
w	Peso
ΔP	Caída de presión

SÍMBOLOS GRIEGOS

β	Rotación alrededor del eje Z, Inclinación
Γ	Sistema de coordenadas (con subíndices)
ν	Relación de Poisson (con subíndices)
ω	Desplazamiento angular (con subíndices)
θ	Rotación alrededor del eje Y, Azimut

ABREVIACIONES

BHA	Aparejo de fondo
DC	Lastrabarrena
FEM	Método de elemento finito
MWD	Medición mientras se perfora
ROP	Ritmo de penetración
SS	Estabilizador de la sarta
ID	Diámetro interno
OD	Diámetro externo

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1 Brakel, J D., y Azar, J: J.: "Prediction of Wellbore Trajectory Considering Bottomhole Assembly and Drill Dynamics" Dissertation, the University of Tulsa, Department of Petroleum Engineering, (1986)
- 2 Lubinski, A. y Woods, H. B.: "Factor Affecting the Angle of Inclination and Dog Legging in Rotary Boreholes", API Drilling and Production Practice, (1953) pp 222.
3. Bourgoyne Jr., A. T., et al.: Applied Drilling Engineering, SPE Textbook Series, Vol. 2, SPE, Richardson, TX, (1986).
4. Hernández M.D. "Diseño de los aparejos de fondo en la perforación de pozos petroleros" Tesis profesional, F.I. UNAM, octubre 1986.
5. Jiazhi B "Bottomhole Assembly Problems Solved Beam-Column Theory". SPE 10561 (1986)
6. Timoshenko S. "Theory of Elastic Stability". McGraw Hill. New York, 1936.
- 7 Lubinski, A: Developments in Petroleum Engineering, Gulf Publishing, Houston, Vol. 1, (1987).
- 8 Murphey, C E. y Cheatham, J. B.: "Hole Deviation and Drill String Behavior", paper SPE 1259 presented at the 40th Annual Meeting of the SPE, Denver, CO, Octubre 3-6, 1965
- 9 Nicholson, R.W., Jr., "Analysis of Constrained Directional Drilling Assemblies" Ph. D Dissertation, The University of Tulsa, Department of Petroleum Engineering, (1972)
10. Fischer, J. F.: "Analysis of Drill strings in Curved Boreholes", paper SPE 5071 presented at the 49th Annual Meeting of the SPE. Houston, TX, Octubre 6-9, 1974.
11. Wolfson, L.. "Three-Dimensional Analysis of Constrained Directional Drilling Assemblies in a Curved Hole", M.S. Thesis, The University of Tulsa, Department of Petroleum Engineering, (1974)
- 12 Millheim, K., Jordan, S., y Ritter, C : "Bottom - Hole Assembly Analysis Utilizing the Finite Element Method", paper SPE 6057 presented at the 51st Annual Fall Conference of the SPE, New Orleans, LA, Octubre 3-6, 1976

13. Sutko, A. A.: "Directional Drilling - A Comparison of Measured and Predicted Changes in Holes Angle", paper SPE 8336 presented at the 54th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE, Las Vegas, NV, Septiembre 23 - 26, 1979.
14. Millheim, K. "Operators Have Much to Learn About Directional Drilling", Oil & Gas J., Eight Part Series, (Noviembre 6, 1978 - Febrero 12, 1979).
15. Toutain, P.: "Analyzing Drill String Behavior", World Oil, Three Part Series, (Junio, Julio, y Septiembre 1981)
16. Baird, J. A., et al.: "GEODYN: A Geological Formation/Drillstring Dynamics Computer Program", paper SPE 13023 presented at the 59th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE, Houston, TX, Septiembre 16 - 19, 1984
17. Williamson, J. S. and Lubinski, A.: "Predicting Bottomhole Assembly Performance", paper SPE 14764 presented at the 1986 IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, TX, Febrero 10 - 12, 1986.
18. Rafie, S., Ho, H. S., y Chandra, U.: "Applications of a BHA Analysis Program in Directional Drilling", paper SPE 14765 presented at the 1986 IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, TX, Febrero 10 - 12, 1986.
19. Brett, J. F. et al.: "A Method of Modeling the Directional Behavior of Bottomhole Assemblies Including Those With Bent Subs y Downhole Motors", paper SPE 14767 presented at the 1986 IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, TX, Febrero 10 - 12, 1986
20. Jopi, P. M., Burgess, T. M., y Bowling, J. P.: "Predicting the Build/Drop Tendency of Rotary Drilling Assemblies", SPE Drilling Engineering, (Junio 1988), pp 177 - 185.
21. Birades, M. y Fenoul, R. "A Microcomputer Program for Prediction of Bottomhole Assembly Trayjectory", SPE Drilling Engineering, (Junio 1988), pp 167 - 172.
22. Birades, M.: "Static y Dynamic Three - Dimensional Bottomhole Assembly Computer Models", SPE Drilling Engineering, (Junio 1988), pp. 160 - 166.
23. Ho, H. S.: "General Formulation of Drillstring Under Large Deformation y Its Use in BHA Analysis", paper SPE 15562 presented at the 61st Annual Technical Conference y Exhibition of the SPE, New Orleans, LA, Octubre 5 - 8, 1986
24. Birades, M. y Gazaniol, D.: "ORPHEE 3D: Original Results on the Directional Behavior of BHA's With Bent Subs", paper SPE 19244 presented at the 64th

-
- Annual Conference y Exhibition of the SPE, San Antonio, TX, Octubre 8 - 11, 1989
- 25 Williams, J. B., Apostle, M. C., y Haduch, G. A.: "An Analysis of Predicted Wellbore Trayectory Using a Three Dimensional Model of a Bottomhole Assembly With Bent Sub, Bent Housing, y Eccentric Contact Capabilities", paper SPE 19545 presented at the 64th Annual Technical Conference y Exhibition of the SPE, San Antonio, TX, Octubre 8 - 11, 1989.
26. Chenevert, M. E y Gatlin, C.: "Mechanical Anisotropies of Laminated Sedimentary Rocks", paper SPE 890 presented at the 39th Annual Meeting of the SPE, Houston, TX, Octubre 11 - 14, 1964.
- 27 McLamore, R. T. y Gray, K. E.: "A Strength Criterion for Anisotropic Rocks Based Upon Experimental Observations", paper SPE 1721 presented at the 96th Annual AIME Meeting, Los Angeles, CA, Febrero 19 - 23, 1967.
- 28 Bradley, W. B.: "Factors Affecting the Control of Borehole Angle in Straight y Directional Wells", paper SPE 5070 presented at the 49th Annual Meeting of the SPE, Houston, TX, Octubre 6 - 9, 1974.
29. Brown, E. T., Green, S. J., y Sinha, K. P.: "The Influence of Rock Anisotropy on Hole Deviation in Rotary Drilling - A Review", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, (1981), pp. 387 - 401
30. Cheatham, J. B y Ho, C. Y.: "A Theoretical Model for Directional Drilling Tendency of a Drill Bit in Anisotropic Rock", paper SPE 10642, (Unsolicited), Septiembre 1981.
- 31 Xun Yao, Y.: "An Equation of Formation Deviating Force y its Application", paper SPE 14850 presented at the International Meeting on Petroleum Engineering, Beijing, China, Marzo 17-20, 1986.
32. Ho, H. S.: "Prediction of Drilling Trajectory in Directional Wells Via a New Rock-Bit Interaction Model", paper SPE 16658 presented at the 62nd Annual Technical Conference y Exhibition of the SPE, Dallas, TX, Septiembre 27-30, 1987.
33. Azar, J. J.: Matrix Structural Analysis, Pergamon Press, New York, (1972).
Reddy, J. N.: An Introduction to the Finite Element Method, McGraw Hill, New York, (1984)
34. McLamore, R.: "The Role of Rock Strength Anisotropy in Natural Hole Deviation", JPT, Nov 1971, pp 1313-1321.
-

-
- 35 Paul A. Larson. The University of Tulsa Drilling Research Projects "Three-Dimensional, Quasi-Statics Drill ahead BHA Model With Rock-Bit Interaction" Enero 1993
 - 36 Peterson, : " Roller-Cutter Forces", SPEJ, Marzo 1970, pp 57-65.
 - 37 . Shigley, J. E. y Mitchell, L. D.: Mechanical Engineering Design: McGraw Hill Series in Mechanical Engineering, 4th edition, McGraw Hill, New York, (1983).
 - 38 Hernández M.d. "Diseño de los aparejos de fondo para el control de la desviación", Tesis de maestría, F.I UNAM, (Octubre 1994)
 - 39 Larson, P.. "Modifications to the Bottom Hole Assembly Design Program", TUDRP Advisory Board Meeting, Noviembre 13, 1990.
 - 40 PEMEX Expediente consecutivo y registro diario del pozo cutláhuac 671-H Reynosa, tamaulipas.
 - 41 IMP reporte CEA-0104: "Diseño de sartas para pozos verticales y desviados"

APENDICE A

GUIA DE INSTALACIÓN

A.1 INTRODUCCIÓN

La siguiente guía de usuario del programa TUIMP tiene como objetivo apoyar al usuario en el manejo del programa, para así obtener resultados satisfactorios y tomar decisiones prudentes para mantener la desviación del pozo, dicho sistema se desarrollo en lenguaje de programación Visual Basic versión 5.0.

En términos generales el programa se compone del sistema de computo desarrollado por la Universidad de Tulsa (TUDRPDAM), solo que en un ambiente Windows para hacerlo más amigable para el usuario

La guía esta compuesta de las siguientes secciones

1. **INSTALACIÓN.-** Define los requerimientos para al aplicación y el proceso de instalación
2. **EJECUCIÓN DEL PROGRAMA.-** Presenta el conjunto de datos necesarios a registrar, editar así como los procesos de ejecución para obtener los resultados y tener los reportes necesarios del comportamiento de los aparejos de fondo

A 1 1 INSTALACIÓN

Para efectuar la instalación es necesario disponer de ciertos requerimientos con el fin de obtener un buen funcionamiento del sistema. A continuación se describen estos:

A.1.2 REQUERIMIENTOS DE INSTALACIÓN

Es muy importante verificar en la computadora personal (PC) las siguientes características de Hardware y Software para iniciar y utilizar TUIMP en forma óptima.

- PC con procesador Pentium
- Tener 32 Megabytes o más en RAM
- Disco duro con 40 Megabytes libres mínimo
- Tarjeta de vídeo VGA o superior
- Ratón
- Windows 95,98 200/NT/Novell

A 1.3 RECOMENDACIÓN

Antes de instalar TUIMP se recomienda respaldar los discos. Este proceso se puede realizar mediante dos formas:

- Copiando discos desde MS-DOS,
- Copiando discos desde el Administrador de Archivos de Windows.

A.1.4 PROCESO DE INSTALACIÓN

El proceso de instalación de TUIMP consiste principalmente en cargar a disco duro los archivos necesarios para el buen funcionamiento del sistema. Para lograr este proceso se deben efectuar los siguientes pasos:

1. Colocar en el drive "A" el disco de instalación número uno
2. Desde el menú inicio de Windows 97 seleccionar Ejecutar y teclear en el diálogo A SETUP, este procedimiento se puede iniciar también desde el panel de control y seleccionar la opción agregar y quitar programas.
- 3 Se inicia la instalación con una ventana como la siguiente.

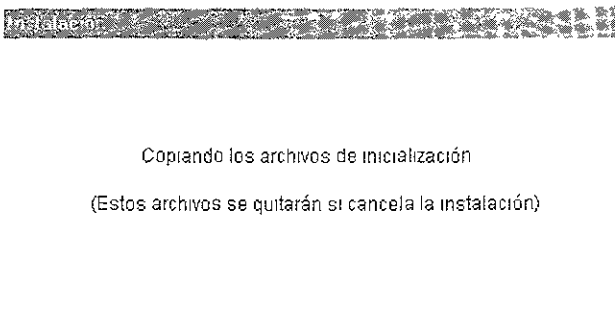


Figura A.1. Iniciando la instalación

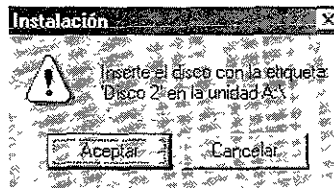


Figura A. 2 Discos de instalación

4. Colocar en el drive A los discos dos y tres, en ese orden para proseguir con la instalación.

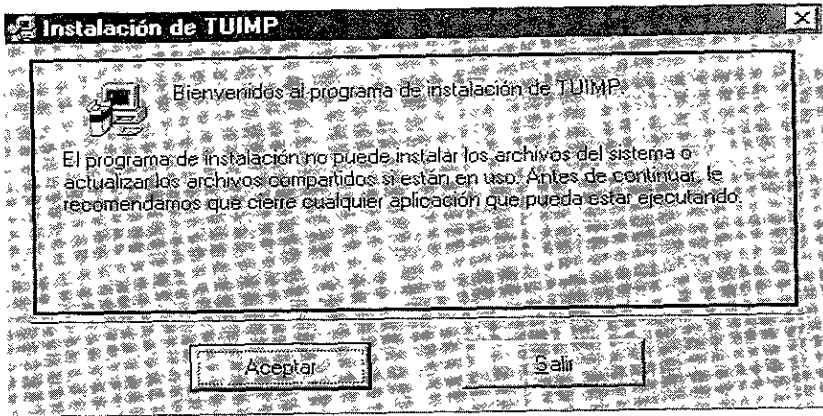


Figura A. 3 Bienvenido a la instalación de TUIMP

5. Se visualiza un diálogo de bienvenida.
6. En la ventana que se observa en la siguiente figura se tienen dos botones: El botón Cambiar directorio permite modificar la ruta en que se instalará el programa de simulación TUIMP y el botón que tiene la imagen de una computadora que permite instalar en definitiva el paquete.

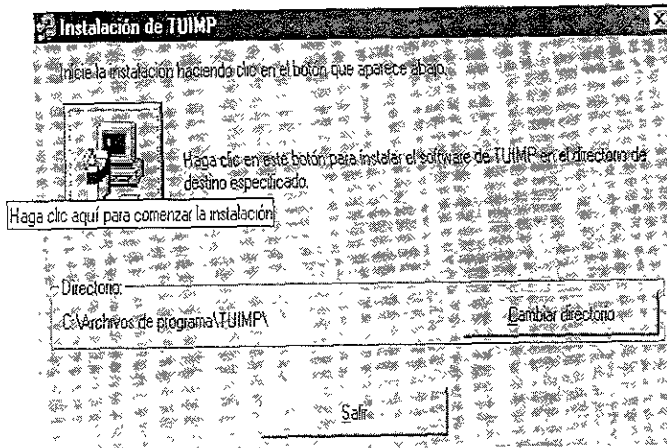


Figura A. 4 Directorio de instalación

Al seleccionar el botón con la imagen de la computadora se presentará un medidor de avance en la instalación en porcentaje



Figura A.5 Avance de la instalación

7. Termina la instalación, se actualiza el sistema y se crea el icono del programa.



Figura A.6 Fin de la instalación.

A.2 EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

Una vez instalado el sistema de computo TUIMP en el disco duro de la PC, se puede iniciar una sesión con este al activar el icono representativo, presentándose una ventana de inicio como la mostrada a continuación:

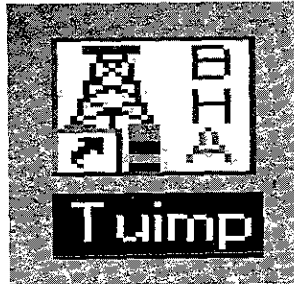


Figura A.7 Ventana de inicio

A.2.1 CARGANDO Y ALMACENAMIENTO DE DATOS

Para cargar datos se cuenta con el botón respectivo el cual al darle una click abre una caja de diálogo donde se puede seleccionar un archivo ya existente del tipo que maneja TUIMP. Dicha información es desplegada en sus respectivos lugares.

Para almacenar los datos se deben suministrar todos los datos en sus lugares respectivos, con las unidades que se piden para evitar errores, y después presionar el botón "guardar" o "guardar como" para salvar el archivo y que este quede almacenado por si se requiere en posteriores ocasiones.

Otro botón es el de salir; esta opción termina la sesión de trabajo con el sistema. Además existen otros dos botones con el signo de suma y resta (+ -) estos botones sirven para borrar datos (el signo negativo) y para adicionar más datos (el positivo); estos botones solo se utilizan cuando esta activada la aplicación ya sea para adicionar más datos o para eliminarlos.

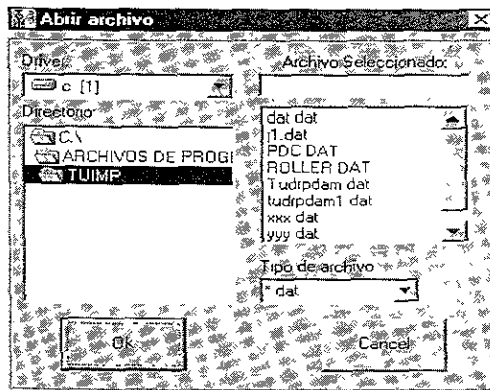


Figura A.8 Diálogos para los archivos abrir y guardar como.

Finalmente se cuenta con el botón de calcular, que es el encargado de ejecutar las iteraciones correspondientes a los datos proporcionados.

A.2.2 EDICION DE DATOS

Se tienen tres formas de edición de datos, dos son campos de entrada de datos y un adicional que es para las características de la barrena. De las dos primeras una contiene las condiciones de operación, los parámetros de perforación y la descripción de los componentes del aparejo de fondo llamado DESCRIPCIÓN DEL APAREJO Y CONDICIONES DE OPERACIÓN. El segundo campo contiene los datos de la trayectoria del agujero llamado REGISTRO DIRECCIONAL.

CAMPO DE DATOS DESCRIPCION DEL APAREJO. Este campo de datos contiene básicamente la entrada de datos del aparejo formadas por textos, etiquetas y comandos englobados dentro de un marco principal.

NUMERO DE COMPONENTES Con este valor se genera la malla

INCREMENTO DE PROFUNDIDAD. Generalmente se recomiendan 10 pies

NUMERO DE INCREMENTOS DESEADOS PARA PERFORAR. El número de incrementos determinará la tendencia de las líneas al momento de graficar (incremento de profundidad * numero de incrementos)=pies.

RLLR. Este parámetro únicamente puede ser 1 ó 0 Para una barrena tricónica deberá asignarse 0, lo cual permite que la barrena gire hacia la derecha, cuando se asigna 1 se utiliza una barrena PDC o bien un aparejo con un sustituto curvo (codo), esto permite el análisis de la orientación de la cara de la herramienta

LIST. Este parámetro únicamente puede ser 1 ó 0 Cuando LIST= 0 el análisis del elemento finito es generado pero no grabado. Mientras que en el caso de LIST = 1 todos los resultados del elemento finito son escritos en un campo llamado TUDRPDAM.OUT del programa fuente.

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 utilizar ILIN=0

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

SELECCION DEL METODO. Este parámetro sólo puede ser 1 ó 2 Para el caso en que sea 1 será para utilizar el método sin iteración roca barrena Para el caso en que el usuario decida utilizar 2 será para el caso de iteración roca barrena.

DESCRIPCION DEL APAREJO. Tres renglones para el título de la información el texto de la información puede ser escrita entre comillas

PESO SOBRE BARRENA (PSB). Peso aplicado a la barrena (lb_f)

DENSIDAD DEL LODO. Densidad del fluido de perforación en el pozo durante la perforación del intervalo (lb-gal).

DIAMETRO DEL POZO. Diámetro promedio del agujero en el intervalo perforado (pg).

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

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

BUZAMIENTO. 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 $0 \leq \text{buzamiento} \leq 179^\circ$.

INDICE ANISOTROPICO DE INCLINACION. Es el índice anisotrópico de la 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 0.0

INDICE ANISOTROPICO DEL AZIMUT. Los valores recomendados son de 0 a 0.1. Cuando no se desea el azimut en un análisis anisotrópico se asienta 0.0. Los índices anisotrópicos de la inclinación y del azimut son independientes y no requieren ser iguales.

NUMERO. Se refiere al número de nodos, el programa permite un máximo de 30 nodos para la descripción del aparejo de fondo, por lo cual se recomienda realiza la malla más adecuada para obtener la configuración total del aparejo.

SELECTOR. Este parámetro esta 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 tres columnas adicionales para la clara descripción del sustituto curvo. Los datos de estas columnas son.

ANGULO DEL CODO (grados) Se refiere al primer codo cercano a la barrena

ORIENTACION DE LA CARA DE LA HERRAMIENTA (0° a 360°). 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.

ANGULO DEL CODO (grados) Para el segundo codo (limitado a dos curvaturas)

5 = cilindro de aluminio.

25 = estabilizador de acero. Se requieren de dos columnas adicionales.

35 = estabilizador de monel. Se requiere de dos columnas adicionales.

Los datos de estas dos columnas para la clara descripción del aparejo son:

LONGITUD DE LAS ALETAS (pies) La longitud de las aletas del estabilizador no puede exceder la longitud del cuerpo.

DIAMETRO DE LAS ALETAS(pg). Se refiere al diámetro exterior de las aletas del estabilizador, el cual no podrá ser más grande que el diámetro de la barrena.

LONGITUD DEL COMPONENTE (pies).

DIAMETRO EXTERIOR DEL COMPONENTE (pg).

DIAMETRO INTERIOR DEL COMPONENTE (pg).

COEFICIENTE DE FRICCIÓN DEL COMPONENTE (adimensional)

Durante el desarrollo del elemento finito en el aparejo de fondo se discretiza 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 el estabilizador son tres y afecta el valor de los nodos, si no hay estabilizadores en el aparejo de fondo este valor es exactamente al número de componentes y es igual al numero de líneas requeridas para definir el componentes.

CAMPO DE DATOS REGISTRO DIRECCIONAL.

En este marco se tiene el campo que contiene los datos originales de las estaciones y son reescritos una vez iniciado el análisis. El campo mantiene los datos de las estaciones originales. Este campo es copiado automáticamente sobre el registro direccional antes de comenzar la ejecución del programa.

En la primer columna de este marco se muestra el número de estaciones originales en la etiqueta "No. De estaciones" y el valor se muestra en el texto que esta a continuación. Cada columna siguiente deberá contener, la profundidad desarrollada en (pies), la inclinación inicial del pozo desde la vertical (grados) y el azimut inicial del pozo a partir del Norte en sentido de las manecillas del reloj (grados).

Como ya se menciona anteriormente se tienen los datos (originales más la simulación) y cada columna siguiente del registro direccional presentará:

La profundidad desarrollada (pies).

La predicción de la inclinación del agujero (más allá de los valores de las estaciones originales) (grados)

La predicción del azimut del agujero (más allá de los valores de las estaciones originales) (grados).

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

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

Finalmente se tiene un campo adicional para las características de la barrena

Selector	Longitud [ft]	Díametro Exterior [pg]	Díametro Interior [pg]	Coef. Fricción [adim]	Long. Aletas [ft]	Díametro Aletas [pg]	Ángulo codo [°]	Orient. cara [0°-360°]	Amplitud codo [°]
1 Barrena									
2 25 Estabilizador de Acero									
3 4 Sustituto Curvo									
4 4 Sustituto Curvo									
5 3 Monel									
6 3 Monel									
7 3 Monel									
8 2 Cilíndrico									
9 2 Cilíndrico									
10 25 Estabilizador de Acero									

Figura A.9 Carpeta de datos TUIMP con la descripción del aparejo de fondo y las condiciones de operación.

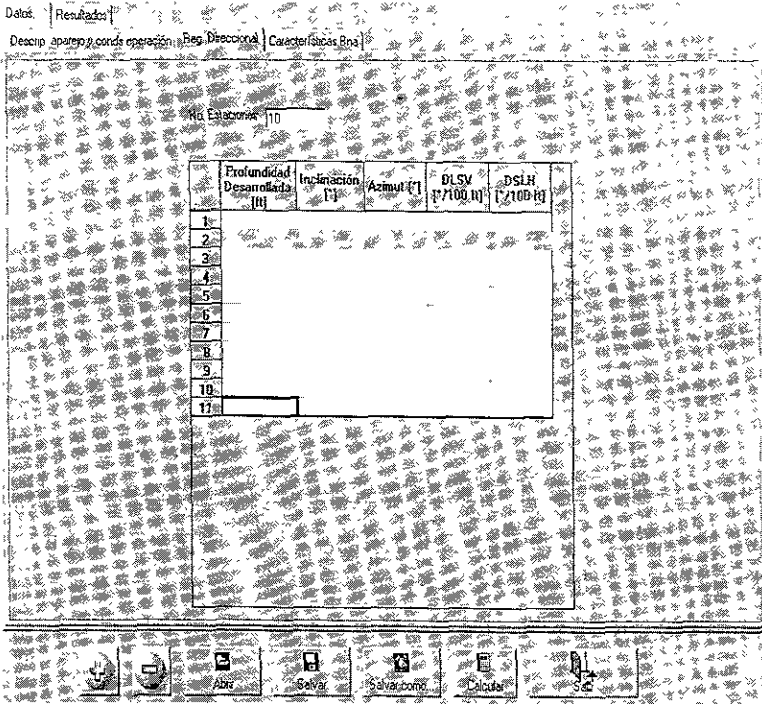


Figura A.10 Carpeta de datos TUIMP con el registro direccional.

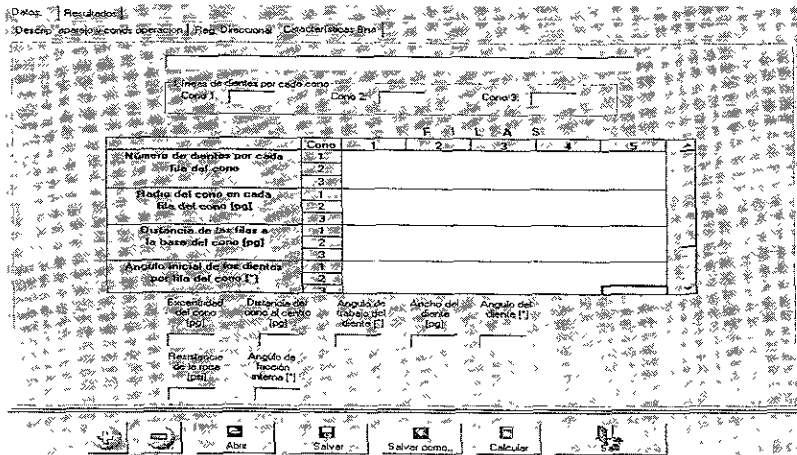


Figura A.11 Carpeta de datos TUIMP con las características de la barrena.

A.3. PROCESOS Y RESULTADOS.

Los procesos que realiza TUIMP son aquellos cálculos involucrados para obtener resultados Gráficos y Tabulares los cuales pueden ser impresos como reportes Para el caso de los gráficos con TUIMP se obtienen los valores y se gráfica con la ayuda de hojas de cálculo.

Una vez registrados los datos necesarios en las carpetas descripción de aparejos de fondo y registro direccional (se requiere de los datos de ambas carpetas para poder correr el programa); los siguientes pasos son necesarios para obtener Reportes.

a) activar el botón calcular, con esta operación se presentarán los resultados pero sólo se tendrá acceso a ellos activando el botón resultados, se presentará el siguiente cuadro.

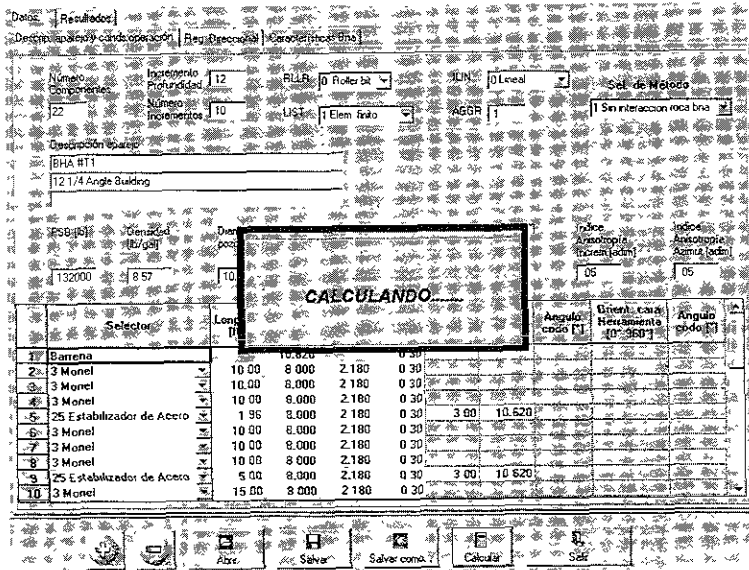


Figura A.13 TUIMP ejecutando la opción calcular

Datos: Resultados | Isotropía | Anisotropía | Listado elem. info

	Profundidad desarrollada (R)	Inclinación (°)	Azimet (°)	DLSV (°/1000ft)	DLSH (°/1000ft)
1	7100	16	30	0	0
2	7500	20	30	1	0
3	7510	20.1454	30.036	1.45	36
4	7520	20.3044	30.0723	1.59	36
5	7530	20.4584	30.0948	1.54	23
6	7540	20.6077	30.1128	1.49	18
7	7550	20.7504	30.1341	1.43	21
8	7560	20.8947	30.1543	1.44	2
9	7570	21.0405	30.1778	1.46	24
10	7580	21.1885	30.2033	1.48	26
11	7590	21.3375	30.2305	1.49	27
12	7600	21.4869	30.2576	1.49	27
13	7610	21.6307	30.2816	1.44	74
14	7620	21.7637	30.4185	1.33	67
15	7630	21.89	30.4618	1.26	43
16	7640	22.0196	30.5095	1.3	48
17	7650	22.1503	30.553	1.31	43
18	7660	22.2834	30.5921	1.33	39
19	7670	22.4189	30.6154	1.36	23
20	7680	22.5529	30.6428	1.34	27
21	7690	22.6896	30.6739	1.37	31
22	7700	22.8247	30.7101	1.35	36
23	7710	22.9612	30.7488	1.37	39
24	7720	23.0982	30.7876	1.37	39
25	7730	23.234	30.8279	1.36	4
26	7740	23.37	30.8685	1.36	41

Figura A.13 TUIMP ejecutando la opción resultados - isotropía/anisotropía.

b) Ir al menú archivo y activar el comando **guardar** ó **guardar como...** para salvar la información del simulador TUIMP.