

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a los profesores de la Escuela de Ingeniería de Petróleo por mantener una relación de enseñanza rodeada de pedagogía, dedicación y esfuerzo. A la Universidad Simón Bolívar, y a todas las empresas por haber aportado conocimientos importantes en la realización de este trabajo.

A Luis Norberto Bueno, por apoyarme tanto desde el día que lo conocí, y por tratarme como si fuera un hijo para él. A Liber Videla, por nunca abandonarme. Perdona todo lo malo, pero hay cosas que muchas veces se nos van de las manos

Al Instituto de Nuevas Profesiones y a Marisela González, por darme esa bonita experiencia de poder guiar a un grupo de estudiantes, me enseñó muchas cosas, posiblemente los profesores puedan aprender más de los alumnos que los alumnos de los profesores.

A mis hermanos, Meche, Charo, Carlos y Mario por permitirme una vida de tranquilidad. A mis padres por haberme dado la estabilidad emocional, el cariño y amor para mi óptimo desenvolvimiento durante mi carrera.

A Luis Rattia, Carlos Hernandez, Neel Montoya, Luis Emilio Navarro, Rómulo Ramírez por compartir tantos momentos durante nuestra estadía en la Escuela. A Primavera Alvarado por escucharme cuando lo necesitaba.

A Mónica Alvarez, por enseñarme a querer y mostrarme que todavía hay personas que mantienen como prioridad vivir feliz sin hacer daño a nadie. Al señor Manelic, por mostrarme mis errores, y aún más importante, por enseñarme a enmendarlos.

A Karlyn, por aceptar compartir a mi lado, si Dios quiere, por el resto de nuestras vidas.

A Daniela Yaskerlyn, por haberme motivado a culminar mis estudios, y por haberme dado la mayor alegría de mi vida.

A Dios, por todo lo recibido.

Paredes G., Jorge L.
DETERMINACIÓN DEL CAÑONEO ÓPTIMO DE UN POZO

Tutor Académico: Prof. Luis Norberto Bueno. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Año 2002. 86 pp.

Palabras Claves: Cañoneo, Gomecánica, Daño, Rvestimiento

Resumen. En las operaciones de perforación y completación de pozos una de las fases más críticas es la definición correcta de los parámetros involucrados en el proceso de cañoneo, ya que nos permitirá drenar los fluidos de la arena productora de la forma más eficiente. Muchas veces problemas operacionales obliga a efectuar trabajos de reparación prematuros, y muchas veces el daño producido al yacimiento no puede recuperarse por completo. Un problema común durante la fase producción es la migración de arena hacia el pozo, el cual obstaculiza los canales porosos y restringe el paso de fluidos. En los últimos años la geomecánica, ciencia que nos permite estudiar el comportamiento de las rocas, ha experimentado avances de gran importancia, los cuales han sido aplicados a la ingeniería de petróleo. En el proceso de cañoneo, es necesario tomar en cuenta los esfuerzos a los cuales está sometido la formación, esto nos permitirá definir direcciones de disparo que ofrezcan una mayor estabilidad del túnel de perforación. Esto permitirá minimizar el daño en las zonas adyacentes a las perforaciones, para obtener una mayor productividad en la vida útil del pozo. La geomecánica nos permitirá conocer las direcciones de los esfuerzos principales in situ, para esto se utiliza la técnica del paleomagnetismo. En base a la señal magnética medida en los núcleos es posible determinar la orientación de la muestra en el subsuelo, esta información acompañada de un ensayo de laboratorio que nos permita conocer las magnitudes de los esfuerzos, permitirá conocer los esfuerzos in situ, lo cual hará posible definir direcciones de disparo óptimas que reduzcan la tendencia a la migración de finos hacia el pozo. Analizando la información desde el punto de vista de daño a la formación se elegirá la técnica de cañoneo más óptima según el diferencial de presión.

Durante el proceso de cañoneo se perfora el revestimiento, el cemento, la zona dañada hasta llegar a la zona virgen. Debido a la perforación del revestimiento, el acero sufre daño, el cual no siempre puede ser controlado. En primer lugar, podemos encontrar la reducción del área lateral por los orificios producidos por el jet de perforación; y en segundo lugar, la creación de grietas e hinchamiento del acero ocasiona una reducción en la resistencia imposible de ponderar. Para el primer tipo de daño, podrán utilizarse modelos matemáticos, para lo cual se planteará un modelo y nociones básicas necesarias para el análisis por elementos finitos.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
LISTA DE FIGURAS	ix
1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- CAÑONEO DE UN POZO	3
2.1.- Antecedentes	3
2.2.- Tipos de cañones	4
2.3.- Clasificación de los cañones tipo chorro	4
2.3.1.- Recuperables	5
2.3.1.1.- Ventajas	5
2.3.1.2.- Desventajas	5
2.3.2.- Desechables y parcialmente desechables	5
2.3.2.1.- Ventajas	6
2.3.2.2.- Desventajas	6
2.3.3.- Diferencias entre los cañones desechables y parcialmente desechables	6
2.4.- Partes de un cañón tipo chorro	7
2.4.1.- Iniciadores	7
2.4.2.- Cordón detonante (primacord)	7
2.4.3.- Cargas huecas	8
2.4.3.1.- Antecedentes	8
2.4.3.2.- Cargas huecas con liner y si liner	8
2.4.3.3.- Componentes de la carga hueca	9
2.4.3.4.- Tipos de carga hueca	10
2.4.4.- Secuencia de explosión	11
2.5.- Materiales explosivos	14
2.5.1.- Selección del tipo de explosivo	14
2.6.- Tipos de cañoneo	15
2.6.1.- Cañoneo a través del revestimiento “Wireline Casing Gun”	16
2.6.2.- Cañoneo a través del educor “Wireline Through-Tubing”	17

2.6.3.- Cañoneo con tubería (TCP) “Tubing Conveyed”	17
2.7.- Métodos de cañoneo según el diferencial de presión utilizado	18
2.7.1.- Técnica de disparo sobrebalance o diferencial de presión positivo.	19
2.7.2.- Técnica de disparo bajo balance o diferencial de presión negativo.	20
2.7.3.- Técnica de disparo en balance.	20
2.8.- Parámetros que afectan el rendimiento de un proceso de cañoneo	21
2.8.1.- Rendimiento de la perforación	21
2.8.2.- Densidad de cañoneo	21
2.8.3.- Dirección de tiro (fase)	21
2.8.4.- Separación entre el liner y la carga hueca	22
2.8.5.- Separación entre el cañón y el revestimiento	23
2.8.6.- Penetración y diámetro a la entrada de la perforación	24
2.8.7.- Relación de productividad	26
2.8.8.- Centralización de la herramienta	27
2.8.9.- Selección del tamaño del cañón	27
2.8.10.- CFE	27
2.8.10.1.- Determinación de CFE	27
2.9.- Parámetros que determinan la eficiencia de las perforaciones	28
2.9.1.- Penetración de las perforaciones	29
2.9.2.- Lavado de las perforaciones	29
2.9.3.- Densidad y distribución lineal radial de las perforaciones	29
2.9.4.- Diámetro de las perforaciones	30
3.- EFECTOS DEL DAÑO PRODUCIDO POR EL PROCESO DE CAÑONEO	31
3.1.- Daño	31
3.2.- Daño a la formación	31
3.3.- Daño producido por el proceso de cañoneo	31
3.4.- Mecanismos de creación de la zona dañada	32

3.5.-	Tipos de daño	34
3.6.-	Mecanismos de la reducción de permeabilidad	34
3.7.-	Flujo en el área de completación	35
	3.7.1.- Flujo hacia el pozo	35
	3.7.2.- Flujo de entrada al pozo	35
	3.7.3.- Flujo por orificio y divergencia dentro del hoyo	35
3.8.-	Fuerzas dinámicas involucradas en la limpieza de las perforaciones	36
	3.8.1.- Presión diferencial	36
	3.8.2.- Fuerza de arrastre	37
3.9.-	Perforación bajo balance como mecanismo de limpieza	38
3.10.-	Parámetros a considerar en la perforación bajo balance	38
4.-	GEOMECÁNICA	40
4.1.-	Introducción	40
4.2.-	Gráficos esfuerzo deformación	40
4.3.-	Distribución de esfuerzos sobre la formación	41
4.4.-	Características de los materiales geológicos	42
4.5.-	Criterios de rotura de roca	43
4.6.-	Presión de poro y esfuerzo efectivo	44
4.7.-	Medición de las propiedades mecánicas de la roca	44
	4.7.1.- Pruebas de laboratorio	45
	4.7.2.- Pruebas de campo	45
4.8.-	Círculo de Mohr	46
4.9.-	Interpretación de la envolvente de Mohr	46
4.10.-	Mecanismos de falla	47
	4.10.1.- Falla por cohesión	47
	4.10.2.- Falla por tensión	47
	4.10.3.- Falla por colapso de poros	48
	4.10.4.- Falla por corte	48
4.11.-	Aplicaciones de la mecánica en la ingeniería de petróleo	48
	4.11.1.- Pozos horizontales y de gran desviación	48
	4.11.2.- Operaciones de cañoneo	49
	4.11.2.1.- Cañoneo en dirección del esfuerzo mínimo	50
	4.11.2.2.- Cañoneo en dirección del esfuerzo máximo	51

6.1.-	Introducción	69
6.2.-	Antecedentes	69
6.3.-	Descripción del método de elemento finito	70
6.4.-	Fundamentos de la simulación de elementos finitos	72
6.5.-	Principios de modelaje	
	74	
7.-	EI PROBLEMA	77
7.1.-	Planteamiento del problema	77
7.2.-	Justificación y Alcance	77
7.3.-	Objetivos	78
	7.3.1.- Objetivo general	78
	7.3.2.- Objetivos específicos	78
7.4.-	Limitaciones	79
8.-	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	80
8.1.-	Diferencial de presión utilizado	80
8.2.-	Fase de disparo	80
8.3.-	Densidad de disparo	81
8.4.-	Modelo de elemento finito	81
	CONCLUSIONES	83
	RECOMENDACIONES	84
	REFERENCIAS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Comportamiento de los tipos de cañones en función de los esfuerzos de compresión	4
Figura 2.2:	Cargas huecas con liner y sin liner	5
Figura 2.3:	Componentes de una carga hueca	5
Figura 2.4:	Tipos de cargas huecas	10
Figura 2.5:	Funcionamiento de la carga hueca en el proceso de cañoneo	12
Figura 2.6:	Simulación del efecto de la detonación sobre la carga hueca durante los primeros 16 microsegundos	13
Figura 2.7:	Tabla de capacidad de tiempo - temperatura de los explosivos utilizados para el proceso de cañoneo	15
Figura 2.8:	Tipos de cañoneo	16
Figura 2.9:	Los efectos adversos de cañonear en presencia del lodo de perforación.	19
Figura 2.10:	Dirección de disparo	22
Figura 2.11:	Separación	23
Figura 2.12:	Diámetro a la entrada de la perforación y penetración en un proceso de cañoneo	24
Figura 2.13:	Efectos del diámetro del cañón y la cantidad del explosivo sobre la penetración y el diámetro a la entrada de la perforación	25
Figura 2.15:	Relación de productividad en función de la penetración de la perforación y de la densidad de disparo	26
Figura 2.16:	Determinación de la permeabilidad original del núcleo para el cálculo de CFE	28
Figura 2.17:	Determinación de la permeabilidad de la perforación para el cálculo de CFE	28
Figura 3.1:	Movimiento de la roca durante la perforación del túnel	32
Figura 3.2:	Fuerzas que afectan la roca una vez realizada la perforación	33
Figura 3.3:	Fracturas producidas en la roca originadas por el cañoneo en la formación	33
Figura 3.4:	Ilustración de la onda de descompresión	36
Figura 3.5:	Fuerza de arrastre	37
Figura 4.1:	Grafico esfuerzo deformación	40

Figura 4.2	Distribución de esfuerzos	42
Figura 4.3	Envolvente de falla	46
Figura 4.4	Mecanismos de falla	47
Figura 4.5	Dirección de disparo en función máximo y mínimo	50
Figura 4.6	Cañoneo en dirección del mínimo esfuerzo	51
Figura 4.7	Cañoneo en dirección del máximo esfuerzo	51
Figura 4.8	Riesgo del colapso provocado por el crecimiento de la cavidad formada por el cañoneo	52
Figura 4.9	Linea de orientación maestra	56
Figura 5.1	Diagrama mecánico de revestimientos	61
Figura 5.2	Gráfica presión de detonación vs tiempo	66
Figura 5.3	Daño al revestimiento producido durante el proceso de cañoneo	67
Figura 5.4	Orificio causado por el jet de perforación sin daño adicional al revestimiento	68
Figura 6.1	Método utilizado para el cálculo de la circunferencia de un círculo mediante la aproximación de un círculo	69
Figura 6.2	Cilindro sometido a una presión P	73
Figura 6.3	Modelo de una sección de un cilindro sometido a una presión P	73
Figura 6.4	Modelo de axisimetría de un cilindro sometido a una presión P	74

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DETERMINACIÓN DEL CAÑONEO ÓPTIMO DE UN POZO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Luis Norberto Bueno

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
de Ingeniero de Petróleo
Por el Br. Jorge Paredes

Caracas, Mayo de 2002.

1.- INTRODUCCIÓN

Cuando se perfora un pozo y se realiza el proceso de cañoneo, el ingeniero debe buscar aproximarse lo más posible al caso ideal de daño a la formación igual a cero. Esta condición nunca se presenta, debido a que los canales porosos se obstruyen con material desprendido de la misma roca, con los sólidos presentes en los fluidos de perforación y completación, y con material del jet de perforación.

Debido a los problemas que pueden presentarse por la migración de finos y granos de mayor tamaño hacia el pozo, se han buscado técnicas de cañoneo que minimicen el daño a la formación. La técnica de cañoneo bajo balance se ha venido utilizando como mecanismo de limpieza, ya que permite el flujo hacia el pozo y el acarreo de los granos en suspensión limpiando los canales porosos.

La resistencia de materiales estudia el comportamiento de materiales e inicialmente fue enfocada hacia la ingeniería mecánica. La aplicación de esta ciencia a los materiales rocosos dio origen a la geomecánica. A pesar de que a partir de 1900 ya se encontraban trabajos sobre el comportamiento de las rocas, no fue sino hasta los últimos años que se ha aplicado en forma eficiente en el área de la ingeniería de petróleo. La geomecánica ha permitido un estudio de la estabilidad de la roca lo cual ha tomado gran importancia en las operaciones de perforación, completación y producción.

La geomecánica ha sido estudiada desde el punto de vista de daño a la formación para obtener un hoyo con paredes más estables y unos túneles de perforación con menor tendencia al desmoronamiento. Para obtener las magnitudes y direcciones de los esfuerzos principales horizontales, será necesario: ensayos de laboratorio aplicados sobre muestras de roca y orientar las muestras. El paleomagnetismo es una técnica de orientación de núcleos que se ha desarrollado en los últimos años, y permite utilizar muestras que hayan sido recogidas con anterioridad. La técnica consiste en tomar una muestra y reducir la señal magnética con el aumento de la temperatura. Esto debe realizarse en varias etapas, hasta que la muestra alcance la décima parte de la señal inicial. La orientación de núcleos se realiza teniendo el comportamiento de la señal magnética en función de la temperatura.

Con el análisis de daño a la formación, geomecánica y orientación de núcleos podrá definirse una dirección óptima (fase) y densidad de disparo, necesarias para obtener túneles de perforación que ofrezcan una mayor productividad.

Los revestimientos son diseñados para soportar determinadas cargas de colapso, estallido, tensión y efectos biaxiales. Al momento de cañonear, producto de la onda de alta presión se produce un daño, debido a la reducción del área lateral y a las altas presiones a las cuales es sometido, pudiéndose crear fracturas y grietas en la estructura del revestimiento.

Será necesario realizar un estudio utilizando un modelo de elementos finitos para obtener resultados confiables sobre la resistencia del acero debido a la reducción de su área lateral. Pero este tipo de trabajos serían aproximaciones no aplicables a la realidad hasta que pueda controlarse el daño adicional al acero y obtenerse orificios que describan una perfecta circunferencia, lo cual permitirá aplicar altas densidades de disparo sin riesgo de fractura del revestimiento.

CAPÍTULO II CAÑONEO DE UN POZO

2.1.- ANTECEDENTES

Las técnicas de perforar o cañonear un revestidor tienen como objetivo principal establecer una comunicación entre dos sistemas: yacimiento y pozo. Esto da origen al movimiento de fluidos, lo cual permite:

- ❖ Evaluar zonas productoras
- ❖ Maximizar el caudal de producción del pozo
- ❖ Obtener el drenaje más eficiente del yacimiento
- ❖ Efectuar trabajos de inyección de cemento a la formación
- ❖ Repartir el flujo entre varias perforaciones y reducir daños en los equipos mecánicos

A partir del año de 1932, se emplearon cañones con proyectiles de acero y cargados con explosivos a base de nitrocelulosa. A partir de la segunda guerra mundial se desarrollan y perfeccionan los cañones del tipo chorro.[15]

Para lograr un trabajo efectivo de perforación al revestidor, se requiere que el trayecto de la perforación penetre: el revestidor, el cemento y parte de la formación de hidrocarburos.

Cuando las técnicas de cañoneo se aplican incorrectamente se pueden originar resultados adversos, tales como:

- ❖ Daño al revestidor
- ❖ Daño al yacimiento
- ❖ Daño a la tubería
- ❖ Perforación de una zona no deseada
- ❖ Evaluaciones incorrectas de los sistemas: yacimiento y pozo

Estas consecuencias negativas pueden conducir al abandono de la zona cañoneada y hasta el abandono de todo un campo que posea potencial para producir hidrocarburos. Igualmente, se puede incurrir en costos elevados al implementar las operaciones necesarias, para corregir algunos de los problemas causados. Entre estas operaciones están: trabajos de estimulación a altos costos, recañoneo de zonas y cambios de zonas productoras, transporte de cañones por tubería o mediante equipo de guaya.[15]

2.2.- TIPOS DE CAÑONES

Actualmente, alrededor de un 90% de los trabajos de perforación de revestidores, a escala mundial, utilizan cañones del tipo chorro. En Venezuela, prácticamente, la totalidad de los trabajos de cañoneo se realizan con cañones del tipo chorro; por esta razón, se hará énfasis en este tipo de cañones para el desarrollo del presente trabajo, debido a esto, no es recomendable aplicar toda la información presente en el trabajo a otro tipo de cañones sin una revisión previa de su funcionamiento.[15]

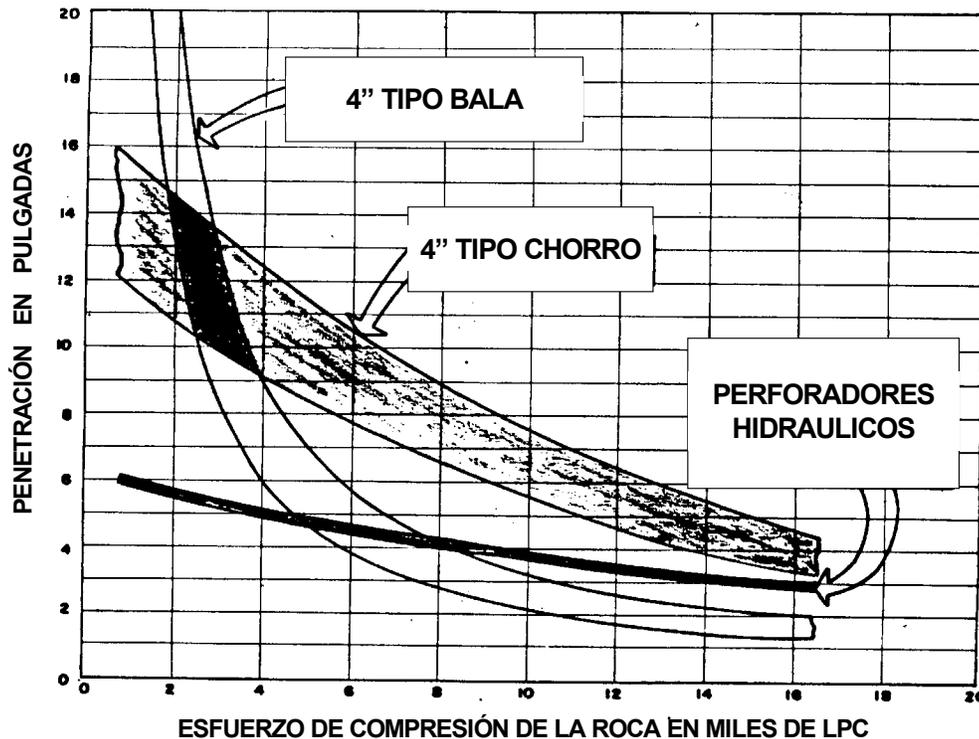


Figura 2.1

Comportamiento de los tipos de cañones en función de los esfuerzos de compresión

La mayor utilización de estos cañones se debe, como se observa en la figura 2.1, a su mayor capacidad de penetración.

2.3.- CLASIFICACIÓN DE LOS CAÑONES TIPO CHORRO

Los cañones tipo chorro se clasifican en tres grupos: recuperables, desechables y parcialmente desechables

2.3.1.- CAÑONES RECUPERABLES

Poseen un tubo de acero a prueba de presiones. Las cargas explosivas se colocan en el tubo y en forma radial con respecto a su eje. El tubo se cierra herméticamente y el detonante es rodeado de aire a presión atmosférica. La detonación causa una pequeña expansión del tubo, el cual puede ser extraído del pozo junto con los residuos generados durante el proceso de cañoneo.[15]

2.3.1.1.- VENTAJAS

- ❖ No dejan residuos en el pozo
- ❖ No causan deformaciones en la tubería de revestimiento.
- ❖ Son operacionalmente seguros, ya que el material explosivo está completamente encerrado.
- ❖ Se pueden operar a grandes profundidades y a presiones relativamente altas.
- ❖ Son selectivos
- ❖ Poseen buena resistencia química

2.3.1.2.- DESVENTAJAS

- ❖ Son más costosos que los otros tipos de cañones
- ❖ Su rigidez limita la longitud del ensamblaje, especialmente en cañones de gran diámetro.
- ❖ En cañones pequeños se limita la cantidad de explosivos que puede ser utilizada, obviamente debido al tamaño de la carga. Por lo tanto, se reduce la penetración que puede alcanzar.

2.3.2.- CAÑONES DESECHABLES Y PARCIALMENTE DESECHABLES

Consisten en cañones envasados individualmente y en forma hermética. Los envases están contruidos de materiales tales como plástico, vidrio, aluminio, hierro colado y materiales cerámicos. Al detonar los cañones, los envases se desintegran, en pequeños trozos, mientras que la energía desarrollada no es absorbida por el soporte de los explosivos. [15]

Los soportes pueden ser o no recuperados después de la detonación, sin embargo, en el fondo del pozo siempre quedan restos de carga.[15]

2.3.2.1.- VENTAJAS

- ❖ Dispositivos ligeros y flexibles
- ❖ Su paso a través de tuberías de diámetros pequeños es generalmente sencillo. Por esta razón, es posible usarlos en pozos ya completados o en tubería con empacaduras de prueba.
- ❖ Facilita las operaciones de cañoneo en trabajos de aislamiento y cementación de intervalos.
- ❖ Permite el cañoneo de bajo balance y con mayor seguridad en pozos con elevadas presiones de fondo.

2.3.2.2.- DESVENTAJAS

- ❖ Los cañones no recuperables no son selectivos.
- ❖ En algunos casos se produce deformación de la tubería de revestimiento.
- ❖ En caso de que se rompa el cable, la pesca del cañón se hace difícil.
- ❖ Los desechos quedan en el pozo, parcial o totalmente.
- ❖ Por lo general, la longitud máxima del cañón está limitada a 30'.
- ❖ En pozos desviados algunas veces se presentan problemas para bajar el cañón al fondo del mismo.

2.3.3.- DIFERENCIAS ENTRE LOS CAÑONES DESECHABLES Y PARCIALMENTE DESECHABLES

Los cañones parcialmente desechables poseen algunas ventajas sobre los desechables, tales como:

- ❖ Dejan menos residuos en el pozo. Esto se debe al uso de cintas o alambres recuperables, en lugar de usar cables desechables para suspender el equipo, como es el caso de los cañones desechables.
- ❖ Las características del residuo en los cañones parcialmente desechables se mejora al usar envases de cerámica o vidrio. De esta manera se reducen las posibilidades de taponamiento.

- ❖ Los residuos de cerámica o vidrio ofrecen resistencia al desgaste, a la acción química y a las presiones.

En resumen, los cañones parcialmente desechables ofrecen un término medio de beneficios entre los recuperables y los desechables.

2.4.- PARTES DE UN CAÑÓN TIPO CHORRO

2.4.1.- INICIADORES

Los iniciadores son usados para la detonación de la secuencia de explosión en la sarta de cañones. El iniciador siempre está localizado en el cabezal de disparo, el cual se encuentra justamente arriba de los cañones de perforación. Los cabezales de disparo pueden tener un martillo que es forzado a iniciar el impacto en la parte superior del iniciador. Cuando el martillo hace reaccionar el iniciador con un impacto suficientemente fuerte, el iniciador convierte el impacto de detonación, la cual es entonces transferida al resto de la secuencia de explosión. Todos los iniciadores están diseñados para ser extremadamente sensibles al impacto mecánico y deben ser manejados con cuidado y respeto. Los iniciadores se encuentran entre los componentes más peligrosos y sensibles en la secuencia de explosión.[4]

El ensamble del iniciador está soldado completamente, sellado de manera hermética, con una unidad sellada que funcionará de manera apropiada después de ser expuesto a la humedad y a las altas temperaturas. [4]

2.4.2.- CORDÓN DETONANTE (PRIMACORD)

Un sistema de conexiones es usado para transmitir la detonación del iniciador a las cargas huecas. El cordón detonante y los detonadores (boosters) son usados para extender la detonación a cada una de las cargas huecas. El cordón detonante actúa como un camino dirigiendo la detonación de cada una de las cargas huecas. Los detonadores (boosters) están sujetos a las terminales del cordón detonante y actúan como terminales que transmiten la detonación de un cañón al siguiente a través de un espacio de 1/4" a 1/2". Es necesario utilizar los detonadores donde es físicamente imposible conectar el cordón detonante.[4]

Recuerde que el cordón detonante es un explosivo, y que puede causar heridas muy graves y mucho daño, así que necesita ser manejado con cuidado. El cordón detonante debe mantenerse alejado del fuego, ya que el calor extremo, las chispas (incluyendo las causadas por la soldadura y los afiladores); no debe aplastarse o arrastrarse, ya que la fricción del material podría causar su detonación.[4]

2.4.3.- CARGAS HUECAS

2.4.3.1.- ANTECEDENTES

Las cargas huecas son los componentes explosivos que realmente hacen el trabajo de crear las detonaciones. El primer diseño se piensa que fue creado por F.X. von Baader, de Alemania. Esta persona escribió en una revista de minería alrededor del año 1700 acerca del uso de un cono, o de un espacio en forma de hongo en el extremo frontal de una carga explosiva para aumentar el efecto explosivo y para ahorrar pólvora. [4]

Después de 1886, una patente en Estados Unidos le fue otorgada a Gustav Bloem por el diseño de una cavidad hemisférica lo que supuestamente concentraba el efecto de la explosión en una dirección axial. Para este momento no era utilizado el liners. [4]

En 1888 Charles Monroe, un químico civil que trabajaba para la estación naval de torpedos en Newport, Rhode Island, demostró el efecto que tenía un liner en la cavidad de las cargas huecas diseñadas. Su experimento llevó al mejoramiento de esta técnica mediante la incorporación de un liner en la superficie del material explosivo de las cargas huecas que actúan al enfocar el efecto explosivo y en la formación del jet. [4]

En 1948, la compañía Welex usó por primera vez las cargas huecas en un pozo petrolero. Al día de hoy, la mayor aplicación para cargas huecas se encuentra en la industria petrolera, para la perforación de petróleo y gas. [4]

2.4.3.2.- CARGAS HUECAS CON LINER Y SIN LINER

La efectividad del liner puede observarse en la figura 2.2, donde el liner permite la formación de un jet a alta velocidad que mejora penetración en la formación al enfocar la onda explosiva.

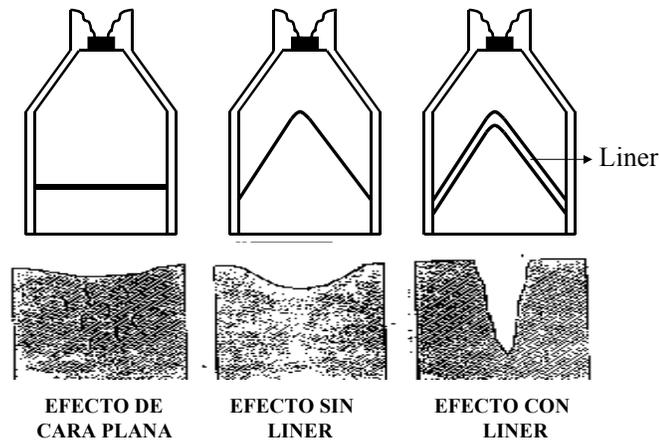


Figura 2.2
Cargas huecas con liner y sin liner

2.4.3.3.- COMPONENTES DE LA CARGA HUECA

Los cuatro componentes principales de una carga hueca (figura 2.3) son una carcasa o envase hecha de zinc o acero suave para encerrar la carga y protegerla durante el manejo mecánico, una carga de explosivo principal, y un liner hecho de algún material inerte como cobre comprimido, aluminio, acero suave o alguna aleación. [4]

El explosivo de alta velocidad (prime explosive) sirve como terminales entre los cordones detonantes y los demás explosivos del equipo., Los detonadores están formados por una carcasa de aluminio que se encuentra cerrado en un extremo y abierto en el otro extremo. El material explosivo está empacado de manera incrementada dentro de la carcasa de manera que llena un poco más de la mitad del mismo. [4]

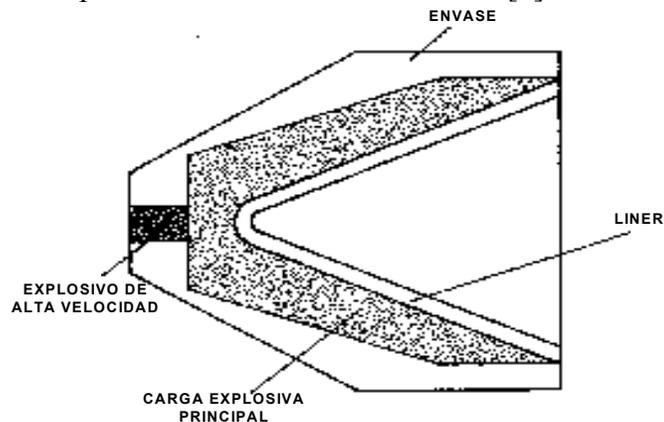


Figura 2.3
Componentes de la carga hueca

Dentro del extremo abierto del detonador se introduce uno de los extremos del cordón detonante, que está recién cortado para éste propósito, hasta que el extremo hace contacto ligeramente con el explosivo dentro del detonador. Los dos componentes son colocados de manera que se mantengan en contacto mientras están aprisionados. Un detalle sumamente importante es que el explosivo en el cordón detonante haga contacto con el explosivo en el detonador. Si no hubiese contacto, la detonación no podrá continuar, y el resultado será la llamada “interrupción en la secuencia de explosión o “stop fire”. Si ocurriese una interrupción en la secuencia de explosión, el resto de las cargas huecas no detonarán. [4]

2.4.3.4.- TIPOS DE CARGA HUECA

Generalmente las cargas huecas usadas para perforación se encuentran disponibles en dos variedades: cargas de penetración profunda (DP) y cargas de empacado con grava (GP). [4]

La forma interior de la carcasa y la forma del liner determinan la forma y tamaño del jet formado por la carga. El liner de una carga de penetración profunda normalmente tiene un ángulo agudo y profundo, normalmente de 42 a 45° (figura 2.4). El ángulo del liner actúa para enfocar el jet y lograr una mayor profundidad de penetración. Las cargas de máxima penetración crean una perforación que deja en el revestimiento un hoyo de diámetro de entrada relativamente pequeño y una penetración relativamente grande. [4]

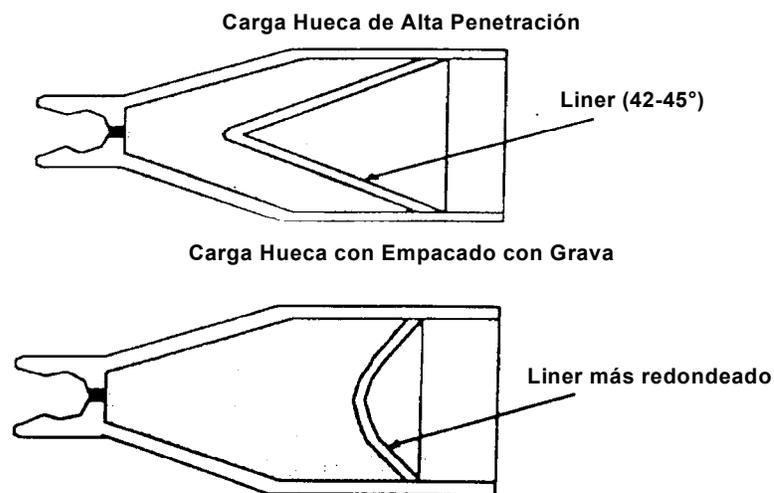


Figura 2.4
Tipos de Cargas Huecas

El liner de una carga empacada con arena tiene una forma menos profunda y más redondeada y parecido al interior de una esfera (figura 2.4). La carga GP deja en el revestimiento un hoyo con diámetro de entrada relativamente grande y con una profundidad de penetración relativamente menor. [4]

Características de un carga de máxima penetración

- ❖ Liner con ángulo profundo y agudo (de 42 a 45°)
- ❖ Diámetro de entrada del hoyo relativamente pequeño (de 3/8” a 1/2”)
- ❖ Longitud de penetración relativamente profunda (de 13” a 30”)

Características de cargas empacadas con arena:

- ❖ Liner redondeado y menos profundo
- ❖ Diámetro de entrada del hoyo relativamente grande (de 1/2” a 1”)
- ❖ Longitud de penetración relativamente corta (de 6” a 8”)

2.4.4.- SECUENCIA DE LA DETONACIÓN

La secuencia que sigue el proceso de detonación es la siguiente:

1.- El iniciador recibe el estímulo que lo obliga a iniciar una reacción en cadena que primeramente hace detonar el cordón detonante tipo cordón.[4]

2.- Se detona el explosivo de alta velocidad. [4]

3.- Se detona la carga explosiva principal. [4]

4.- La explosión de los diferentes detonantes crea un frente de onda expansiva, que se propaga a través de la carga explosiva principal. Esta onda viaja hacia el ápice de la camisa cónica hasta chocar con ella y crear una zona de alta presión. [4]

5.- La alta presión hace que la parte metálica de la camisa cónica fluya. De esta manera se logra separar la parte inferior y exterior de la camisa cónica. Esto da origen a un chorro “tipo aguja” de partículas muy finas, que se originan en el vértice del cono. A medida que el chorro se mueve hacia adelante, se alarga debido al gradiente de velocidad. Cuando el chorro hace impacto en el blanco se produce un proceso combinado de

pulverización y desplazamiento de las partículas que integran el blanco. Esto se debe a la compresión ejercida por el chorro y a la gran cantidad de energía que él transmite al blanco. [4]

Todo el proceso de perforación se realiza en aproximadamente 100 microsegundos. Es importante anotar que el agujero que se logra es mucho más grande que el chorro que lo forma. [4]

6.- Simultáneamente, al proceso descrito en el punto 5, la parte exterior de la camisa cónica colapsa para formar un “tapón” de partículas. Este tapón se desplaza en sentido contrario al desplazamiento del chorro de partículas de alta velocidad. El tapón puede eventualmente obstruir la perforación. Esto ha motivado el desarrollo de cañones “sin tapón”, lo cual consiste en reducir el tapón a pequeñas partículas que dejan poco o nada del residuo. [4]

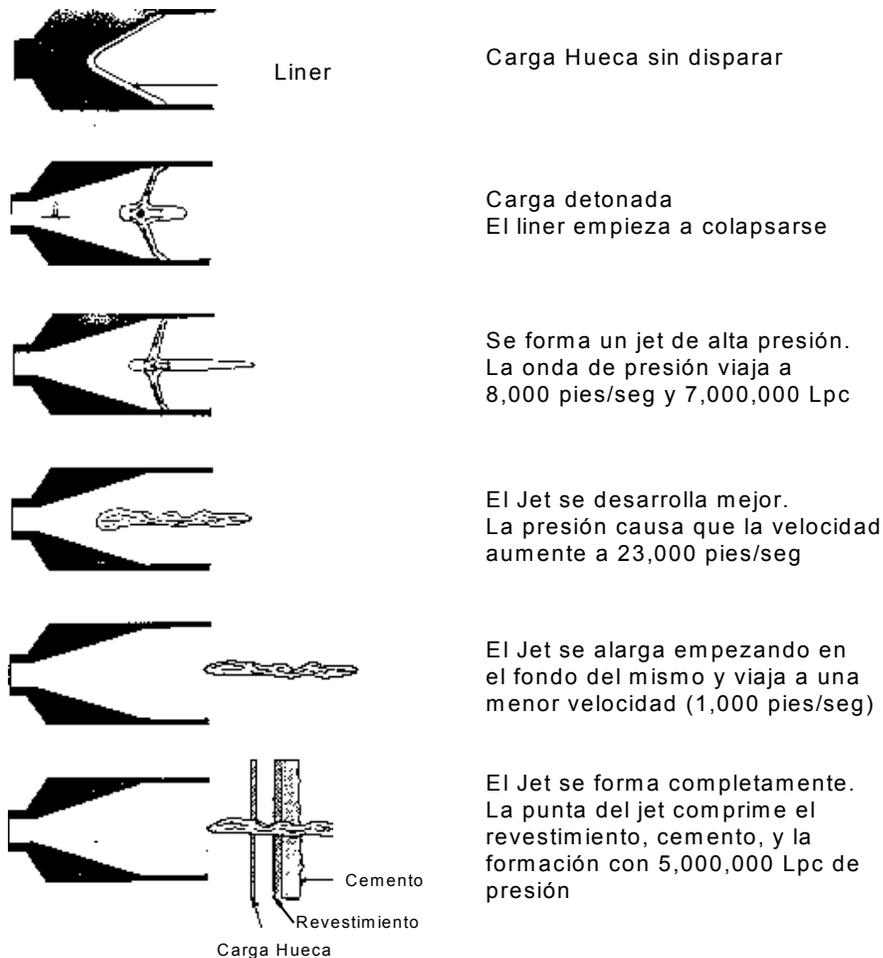


Figura 2.5
Funcionamiento de la Carga Hueca en el proceso de cañoneo

En la detonación, la carga hueca produce un plasma o jet que tiene una oleada de presión extremadamente alta (hasta 5,000,000 Lpc). Este jet produce un hoyo dentro del revestimiento, del cemento y de la formación. [4]

El liner de la carga hueca es el componente principal que efectivamente produce el jet. Cuando el explosivo es detonado, la detonación comienza en la parte de atrás de la carga hueca (la secuencia de explosión puede observarse en la figura 2.5). La detonación del explosivo continúa de la parte trasera hacia el frente de la carga. Esto produce una ola de presión extremadamente alta (aproximadamente de 5,000,000 Lpc) que colapsa el liner y lo impulsa al frente hacia la línea central de la carga. La ola de alta presión y el material colapsado del liner son proyectados hacia la línea central de la carga a una velocidad de 8,000 pies/seg., creando una presión aún mayor (de aproximadamente 7,000,000 Lpc). Ya que la única dirección por la que puede salir la ola de presión es dentro del extremo abierto de la carga, se forma un jet, el cual viaja a una velocidad de 23,000 pies/seg. [4]

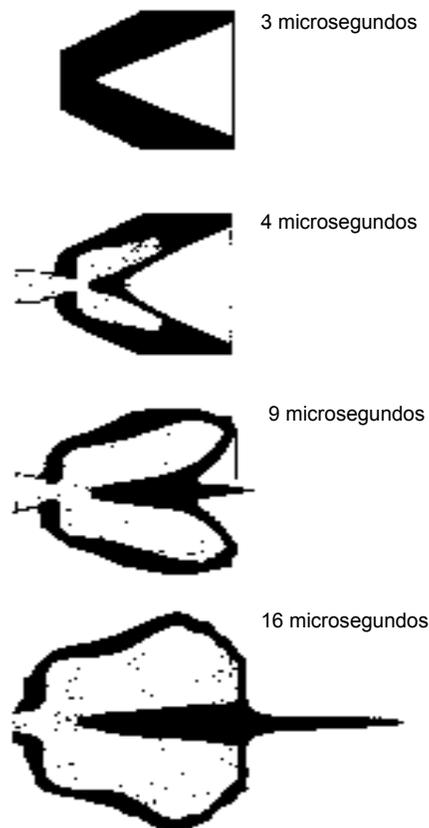


Figura 2.6

Simulación del efecto de la detonación sobre la carga hueca durante los primeros 16 microsegundos

A medida que ocurre la detonación y el liner es colapsado, una cantidad cada vez mayor del material del liner debe ser impulsada por menos explosivo disponible. De allí que, la velocidad en la punta frontal del jet sea aproximadamente 23 veces más grande que la velocidad en la parte de atrás del jet, que es de 1,000 pies/seg. Esto provoca que el jet se estreche o se alargue. La profundidad con que la carga hueca penetra en la formación está directamente relacionada con la elongación del jet. [4]

Al viajar a una velocidad de 23,000 pies/seg. y a una presión de 5,000,000 Lpc, el jet perfora el cañón vacío, el revestimiento, el cemento, y la formación al forzar a los materiales a abrir paso, fuera del paso del jet, esta presión es lo que forma la perforación. [4]

En la figura 2.6 se observa que debido a las altas presiones a las que la carga hueca es sometida la formación del jet produce el colapso del liner y de las carcasa a medida que se desarrolla la secuencia de explosión. El hoyo causado por la carga es provocado por la presión, y no por el calor. [4]

2.5.- MATERIALES EXPLOSIVOS

Es una sustancia que puede ser sometida a un cambio químico muy rápido, no requiere necesariamente una fuente externa de oxígeno. Cualquier material que contenga una cantidad grande de energía potencial que pueda ser soltada súbitamente, de manera que convierta la materia de gas comprimido y fragmentos de materia que se expanden con gran fuerza y velocidad. [10]

2.5.1.- SELECCIÓN DEL EXPLOSIVO

Los explosivos que son usados son seleccionados en base a la máxima temperatura existente en el pozo a la que el explosivo estará expuesto y al tiempo determinado a que estará expuesto bajo dicha temperatura. Ya que cada explosivo tiene un diferente punto de fusión, pueden soportar diferentes temperaturas máximas. [10]

La figura 2.7 “Temperatura vs Tiempo” son usadas para seleccionar el explosivo apropiado. 100 horas es el tiempo normalmente seleccionado como el tiempo máximo al que un explosivo estará expuesto a una determinada temperatura máxima. Es importante

destacar que las cargas explosivas utilizadas en los cañones transportados por tubería están expuestos a las temperaturas del fondo por intervalos de tiempo mayores que cuando se usan métodos convencionales de cañoneo.

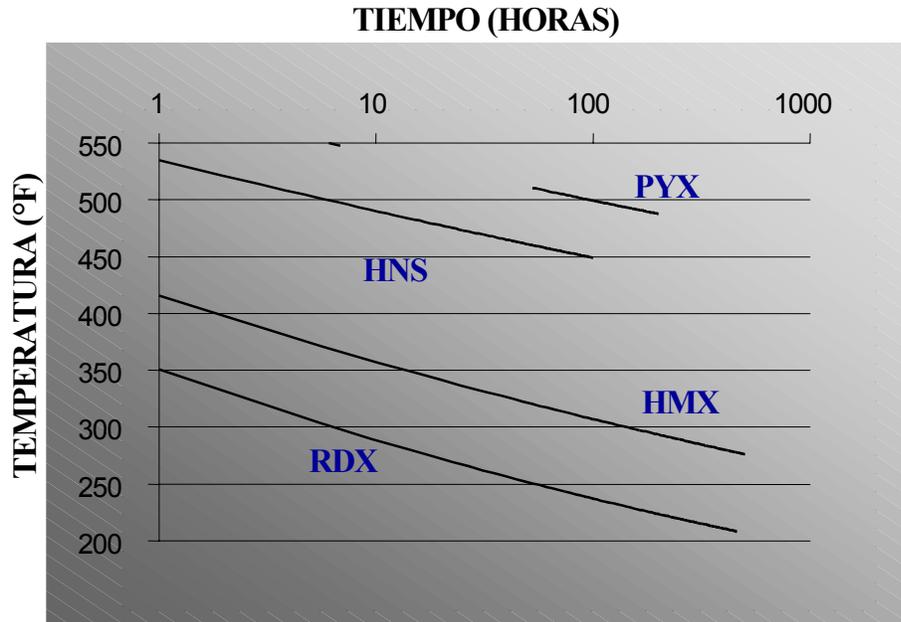


Figura 2.7

Tabla de Capacidad de Tiempo - Temperatura (°F) de los explosivos utilizados en el cañoneo

Un trabajo normal de TCP no necesita siquiera 24 horas antes de la detonación de las cargas; de cualquier manera, este es usado para incluir un factor de seguridad. Los trabajos especiales de TCP pueden necesitar un tiempo adicional y necesitan ser manejados apropiadamente para que se incluya en ellos el factor de seguridad. [10]

Las máximas temperaturas utilizadas para cada tipo de explosivo en un tiempo de 100 horas de exposición son las siguientes:

- ❖ RDX 240 ° F
- ❖ HMX 310 ° F
- ❖ PYX 500 ° F

2.6.- TIPOS DE CAÑONEO

Los tipos de cañoneo pueden clasificarse en tres grupos:

- ❖ Cañoneo mediante el uso de cañones de revestidor (casing gun)
- ❖ Cañoneo mediante el uso de cañones de tubería (tubing gun)
- ❖ Cañoneo mediante el uso de cañones transportados por la tubería eductora (T.C.P.)

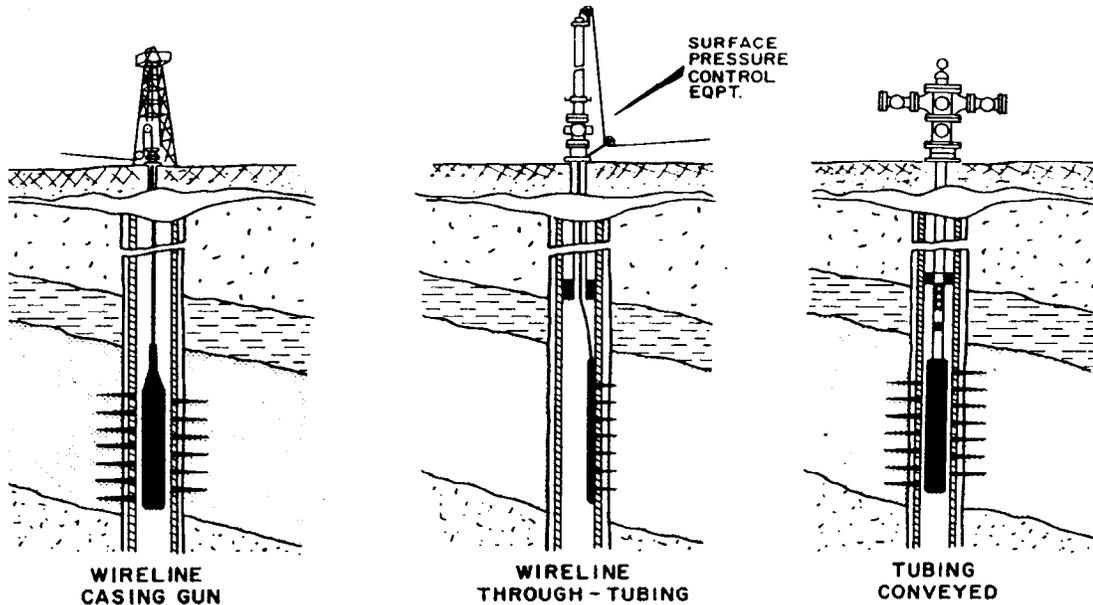


Figura 2.8
Tipos de cañoneo

2.6.1.- CAÑONEO MEDIANTE EL USO DE CAÑONES DE REVESTIDOR (CASING GUN)

Estos cañones se bajan por el revestidor, utilizando una cabria o equipo de guaya. Generalmente, las cargas se colocan en soportes recuperables. Usualmente, el tamaño y rigidez de estos cañones no permite bajarlos por el eductor. [15]

Este tipo de cañones se realiza con diferencial de presión positivo, lo cual permite mantener el control del pozo. Los cañones de revestidor son más eficientes que los de tubería, cuando se usan en operaciones de fracturamiento o de inyección, ya que en estas operaciones se requiere de un buen control del tamaño de la perforación y lo cual usualmente se logra usando cañones de revestidor. Este tipo de cañones también ofrece un rendimiento máximo cuando se usan las cargas tipo chorro, ya que no daña el revestidor. [15]

Este tipo de cañón se usa igualmente en perforaciones hueco abierto, con el fin de penetrar en zonas dañadas por fluido de perforación. Para lograr este objetivo se utilizan cargas de alta capacidad de penetración, con lo cual se logran rangos de perforación más allá de la zona dañada. [15]

2.6.2.- CAÑONEO MEDIANTE EL USO DE CAÑONES DE TUBERÍA

En este método primero se baja la tubería con empacadura de prueba o se baja la completación final. Luego se crea un diferencial negativo y posteriormente se baja el cañón con equipo de guaya. Generalmente, se usan cañones no recuperables o parcialmente recuperables. [15]

Una vez creadas las condiciones para obtener un diferencial de presión negativo, se procede a bajar el cañón con equipo de guaya. Los restos recuperables del cañón y la herramienta de profundidad y la guaya se recuperan usando un lubricador. Este método de cañoneo permite obtener una buena limpieza de las perforaciones. Sin embargo, ellos no son selectivos. Por esta razón, cuando se requiere probar otro intervalo, es necesario controlar el pozo con el cual se exponen las perforaciones existentes a los fluidos de control. Esto puede causar cierto grado de daño. [15]

2.6.3.- CAÑONEO MEDIANTE EL USO DE CAÑONES TRANSPORTADOS POR LA TUBERÍA EDUCTORA

En este método, el cañón se transporta en el extremo inferior de la tubería eductora. Conjuntamente con la tubería se mete una empacadura, la cual debe ser sentada antes de iniciar la operación de cañoneo. [15]

Este método de cañoneo posee la ventaja de poder utilizar un diferencial de presión negativo y al mismo tiempo usar un cañón grande con características semejantes a las de los cañones recuperables, pero que eventualmente pueden ser desechables. [15] Además de este método se obtiene:

- ❖ Alta densidad de disparo
- ❖ Perforaciones óptimas
- ❖ Fases óptimas

La aplicación de este método de cañoneo es amplia; por ejemplo, se pueden utilizar en los siguientes casos:

- ❖ Control de arena
- ❖ Mejorar la penetración
- ❖ Se reduce el tiempo de operación
- ❖ Mayor seguridad

El control de arena se hace más efectivo usando perforaciones compatibles con los agentes divergentes usados.

Cuando mayor sea el cañón, mayor será el diámetro máximo de las perforaciones y la penetración

El tiempo de operación necesario para cañonear un intervalo de gran espesor se puede reducir apreciablemente en relación con el tiempo empleado en operaciones de cañoneo convencionales, que en este caso requiere de múltiples bajadas, cuando se cañonea con diferencial de presión negativo

La mayor seguridad en el pozo, cuando se emplea este método de cañoneo, se debe a que cuando se baja el cañón adaptado a la tubería también se usa el equipo de control de presiones en el cabezal del pozo. Este equipo está instalado todo el tiempo para lograr máxima seguridad. [15]

Cuando se usan cañones transportados por tubería no es necesario bajar conectores con guaya, ya que se puede implementar un sistema de detonación hidráulico.

Las pruebas de pozos y las estimulaciones se realizan de una manera más efectiva empleando cañones transportados con tubería, además con este método de cañoneo, se puede incorporar una variedad de accesorios de producción, con lo que se logra facilitar las pruebas y tratamientos de producción. [15]

2.7.- MÉTODOS DE CAÑONEO SEGÚN EL DIFERENCIAL DE PRESIÓN UTILIZADO

El diferencial de presión se define como la diferencia de la presión que ejerce la columna hidrostática a la profundidad de la arena cañoneada, menos la presión de

formación de esa arena. En operaciones de cañoneo la columna debe ser: salmuera, petróleo o diesel.

2.7.1.- TÉCNICA DE DISPARO SOBRE BALANCE O DIFERENCIAL DE PRESIÓN POSITIVA

Cuando la presión de la columna hidrostática ejercida por el fluido de completación es mayor que la presión de la formación se obtiene un diferencial de presión positivo. Esta técnica de disparo permite que las operaciones de cañoneo del pozo se mantengan estáticas, de esta forma se controla de manera segura, la arremetida de fluidos por parte del yacimiento. [15]

Esta técnica es usada en un 80% a 90% de los pozos nuevos y reparados. Este método se puede emplear con cualquier tipo de técnica de cañoneo, es decir con cañones de tubería, de revestidor o tipo TCP. [15]

Cuando se cañonea con un diferencial de presión positivo y con una columna de lodo, usualmente se producen taponamientos de algunas de las perforaciones. Esto se debe a que el lodo es fundamentalmente un fluido de control de perforación y por lo tanto causa obstrucción del flujo. Generalmente, el daño causado por el lodo es parcialmente irreversible. Es decir, aunque se realicen operaciones para reducir la columna hidrostática (suabeo), es prácticamente imposible obtener una limpieza completa de las perforaciones. [15]

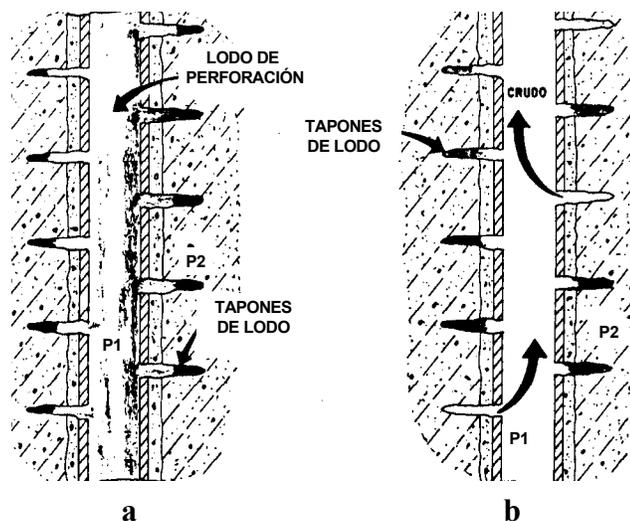


Figura 2.9

Cañoneo en presencia de lodos de perforación

En la figura 2.9 se observa un proceso de cañoneo con lodo como fluido de completación. En la parte “a” la presión hidrostática es mayor a la presión de la formación, debido a esto, el lodo entra en las perforaciones, ocasionando una obstrucción al flujo. En la parte “b” puede observarse cuando la presión hidrostática es menor a la presión de la formación, algunas perforaciones son limpiadas debido al diferencial de presión utilizado pero los sólidos en suspensión del lodo produce tapones que no podrán ser removidos.

Afortunadamente, el agua salada (cloruros o bromuros) y el petróleo son menos dañinos que el lodo de perforación. Sin embargo, se debe tener cuidado muy especial de utilizar salmueras relativamente limpias para evitar taponamientos, semejantes a los causados por la presencia de sólidos en el lodo.

2.7.2.- TÉCNICA DE DISPARO BAJO BALANCE O DIFERENCIAL DE PRESIÓN NEGATIVO

Cuando la presión de la columna hidrostática a la profundidad de la arena cañoneada es menor que la presión de la formación se obtiene un diferencial de presión negativo.

El cañoneo óptimo se obtiene con un diferencial de presión negativo y utilizando fluidos limpios libres de sólidos. [15]

Es muy importante tomar todas las precauciones de seguridad necesarias, cuando se cañonea con un diferencial de presión negativo. Así por ejemplo, es fundamental reconocer que las altas presiones de la formación se manifiestan muy rápidamente en la superficie. Por lo tanto, es necesario controlar el pozo de una manera segura. [15]

2.7.3.- TÉCNICA DE DISPARO EN BALANCE

Consiste en cañonear con la presión de tubería igual a la presión de poros; se utiliza este método sólo en pozos cañoneados a través de tubería o cañones tipo TCP, debido a que se requieren ciertas condiciones de seguridad en superficie; la técnica no provee una adecuada limpieza de las perforaciones, pero si evita que el fluido de completación no produzca daño a la formación. [15]

En pozos cañoneados a través de revestidor el cañoneo en balance, no es una operación segura, debido a la ausencia dentro del pozo, lo cual impediría controlar una eventual arremetida de la formación, posibilidad siempre latente en operaciones de completación. [15]

2.8.- PARÁMETROS QUE AFECTAN EL RENDIMIENTO DE UN PROCESO DE CAÑONEO

2.8.1.- RENDIMIENTO DE LA PERFORACIÓN

Es el rendimiento de una perforación real en relación con el de una perforación ideal realizada en un núcleo experimental. [16]

2.8.2.- DENSIDAD DE DISPARO

Se define como el número de cargas por unidad de longitud. La densidad de disparo de un cañón de perforación es el número de hoyos que se hace por cada pie. Esto se llama normalmente tiros por pie (TPP). El diseño de la densidad de disparo está basado en el grado de producción anticipada al pozo. [16]

Es un factor de gran importancia a la hora de lograr la productividad en formaciones muy anisotrópicas o laminadas, donde la transmisibilidad en dirección vertical es bastante pobre. Los cañones de alta densidad de disparo se están utilizando recientemente en formaciones de poca productividad con el objeto de simular el hoyo desnudo y fomentar un flujo regulado al pozo así como para mejores resultados en pozos que tengan que ser sometidos a constantes cambios en la dirección del flujo, tal es el caso de lavados, inyección de vapor y respuesta en producción, al usar grandes densidades de disparo un factor que debe considerarse es la resistencia al colapso de un revestidor perforado excesivamente. [16]

2.8.3.- DIRECCIÓN DE DISPARO (FASE)

La fase de un cañón de perforación es la dirección en la cual las cargas son disparadas con relación a los otros disparos en el mismo cañón de perforación. Algunas fases típicas son 0°, 45°, 60°, 90° y 120°. [16]

Un cañón de fase especial está diseñado para perforar sólo el lado bajo de un pozo horizontal para prevenir el derrumbamiento de la formación a través de las perforaciones y dentro del revestimiento. Otros cañones especialmente fasados están diseñados para evitar la perforación de una larga producción de la sarta de una doble sarta de completación. Estos cañones con fase especial deben ser orientados o alineados de la manera apropiada para que puedan perforar el revestimiento de manera adecuada. [16]

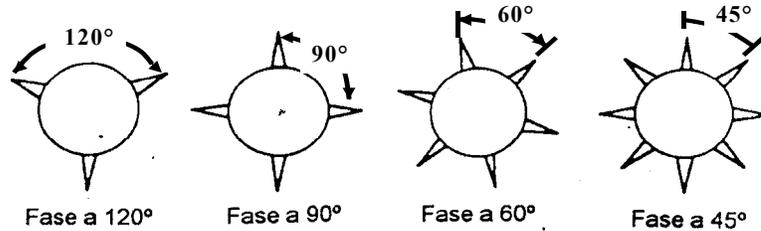


Figura 2.10
Dirección de disparo

2.8.4.- SEPARACIÓN ENTRE EL LINER Y LA CARGA HUECA

Para que el jet logre una máxima penetración, la carga hueca debe tener la separación apropiada del liner. La separación es la distancia desde el extremo abierto del liner de una carga hueca hasta la primera superficie con la que el jet hace contacto, la cual es normalmente el interior del cañón vacío. Esta distancia es extremadamente importante en el diseño del cañón de perforación. [16]

La carga hueca debe tener suficiente separación para que el jet pueda alcanzar una formación total antes de hacer contacto con el cañón vacío y lograr con ello una máxima penetración. Si la separación es muy corta, el jet destruye el cañón vacío antes de que aquél se haya formado totalmente, y la perforación tendrá un diámetro grande y poca profundidad. Si la separación es muy larga, el jet se desgasta antes de hacer contacto con el cañón vacío, y la perforación será pequeña en diámetro y poca profunda. [16]

La separación apropiada está incorporada dentro del diseño de cada cañón de perforación, y no puede ser ajustado en el campo. [16]

La carga de penetración profunda incluye la separación óptima en relación con otros factores de diseño tales como la cantidad del material explosivo, la geometría del liner, y la geometría del interior del revestimiento de la carga. La carga hueca del empaçado con grava no es simplemente una carga con una inadecuada separación. Es una carga diseñada para producir un hoyo consistente, de un diámetro grande con una penetración poca profunda. [16]

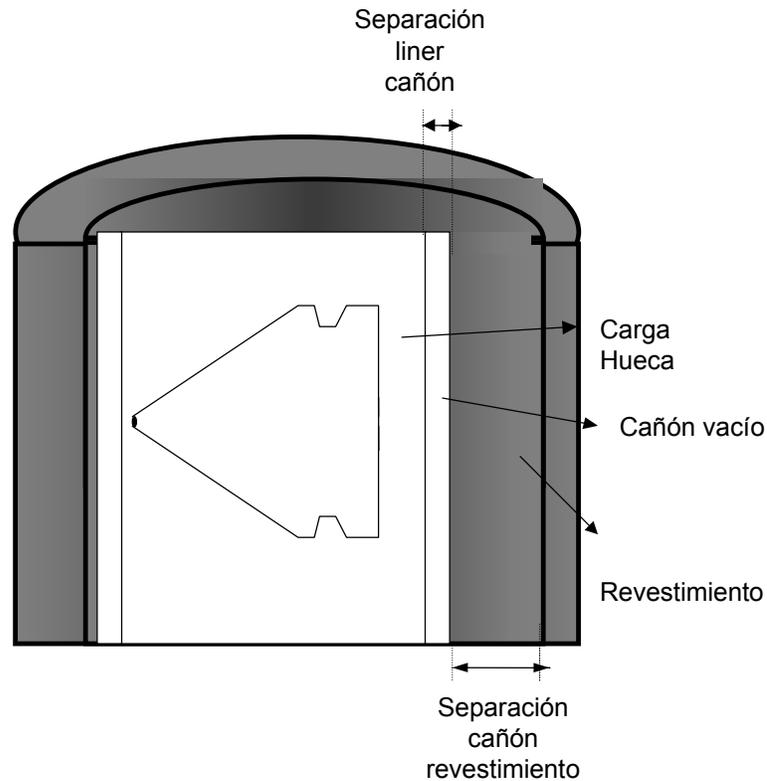


Figura 2.11
Separación

2.8.5.- SEPARACIÓN ENTRE EL CAÑÓN Y EL REVESTIMIENTO (CLEARANCE)

Otra importante consideración para optimizar la ejecución de la carga es la distancia desde el diámetro exterior del cañón vacío hacia el diámetro interior del revestimiento que será perforado. Una separación que es muy corta o muy larga reducirá su profundidad de penetración. [16]

La separación, de cualquier forma, es un factor que puede ser controlado en el campo de dos maneras. Primero, en cada aplicación, debe ser seleccionado el tamaño

apropiado del cañón para perforar el tamaño del revestimiento en el pozo. Y segundo, los cañones de perforación deben estar colocados centralmente dentro del revestimiento para asegurar la adecuada y consistente abertura y desempeño de los mismos. [16]

2.8.6.- PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN Y DIÁMETRO A LA ENTRADA DE LA PERFORACIÓN

La profundidad de penetración es la longitud que el jet recorre dentro de la formación (figura 2.12). Es deseable obtener la mayor profundidad de penetración posible. De allí que las cargas de penetración profunda sean utilizadas para que los pozos en los que no será usado el empaçado con grava. De todas formas, las cargas de empaçado con grava deben ser usadas para perforar pozos en los que se usará empaçado con grava. [16]

El diámetro de la perforación se refiere al orificio que el jet forma en la pared del revestimiento (figura 2.12). El diámetro de entrada de la perforación es más grande en el hoyo creado por una carga de empaçado con grava, lo cual permite una mayor oportunidad a la grava para entrar en la perforación cuando circula el empaçado con grava, ya que las perforaciones han sido limpiadas eficientemente. [16]

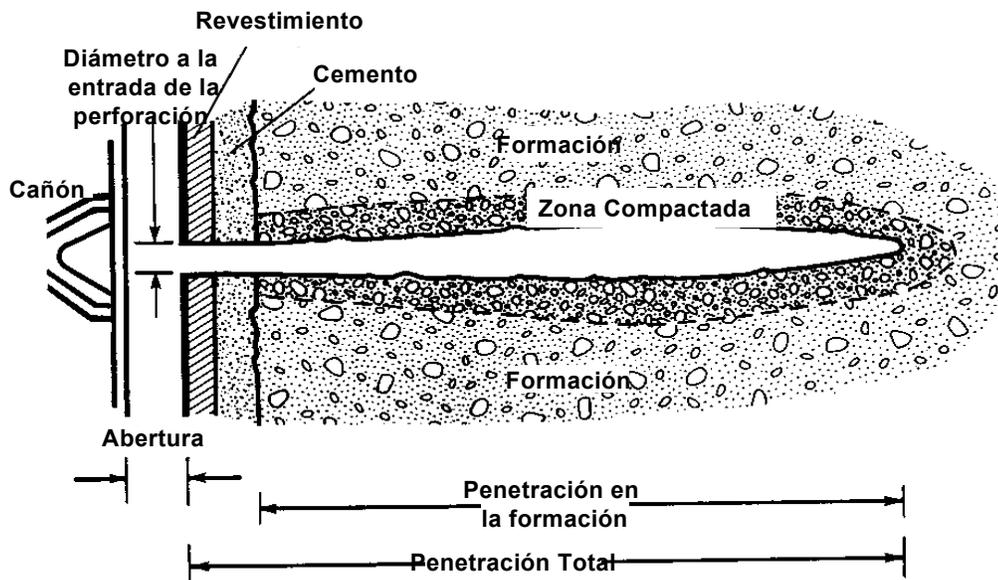


Figura 1.12. Diámetro a la entrada de la perforación y penetración resultante en un proceso de cañoneo

La configuración de la carga hueca es de importancia fundamental, incluyendo su ubicación relativa dentro del pozo. Así, por ejemplo, la distribución del explosivo y su

densidad determinan la velocidad de detonación y pueden tener una influencia aún mayor que la cantidad total de explosivo usada. [16]

Sin embargo, la penetración es proporcional a la cantidad de carga usada. Es necesario obtener un equilibrio entre las características de la carga hueca utilizada y la cantidad de explosivo para optimizar el proceso de cañoneo. Para obtener una mayor penetración no se requiere necesariamente de un aumento de la carga explosiva. Puede concluirse que el tamaño de la carga es el factor determinante de la penetración y no la cantidad de carga. [16]

La distancia comprendida entre la pared interior del revestidor y la carga afecta el grado de penetración de la perforación. [16]

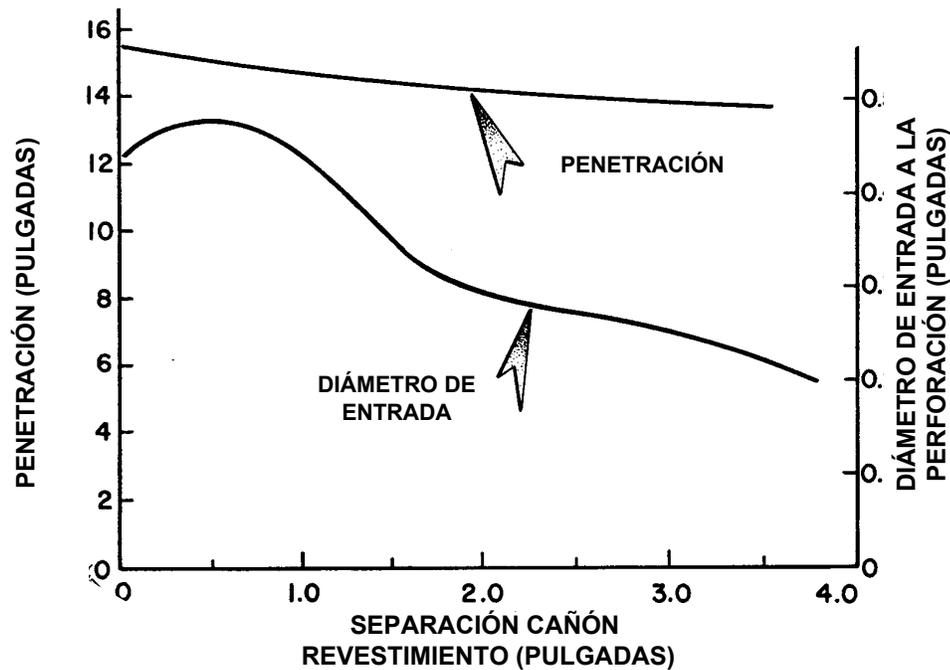


Figura 2.13
Efecto de la abertura sobre la penetración y el diámetro de entrada a la perforación

De la figura 2.13 puede observarse que la reducción de la abertura brinda un aumento en el tamaño de entrada al hoyo, pero llega un momento en que esta reducción puede producir problemas en la eficiencia del proceso de cañoneo. Esto se debe al desarrollo del jet creado por el liner, el cual requiere la distancia necesaria para alcanzar su

máxima capacidad de pulverización y desplazamiento de las partículas que integran el blanco.

Del mismo modo puede observarse en el gráfico que a medida que la abertura aumenta, disminuye la penetración.

2.8.7.- RELACIÓN DE PRODUCTIVIDAD

Indica la razón entre la producción efectiva de un intervalo cañoneado y la producción teórica que se estimaría de producir ese intervalo a hueco abierto.

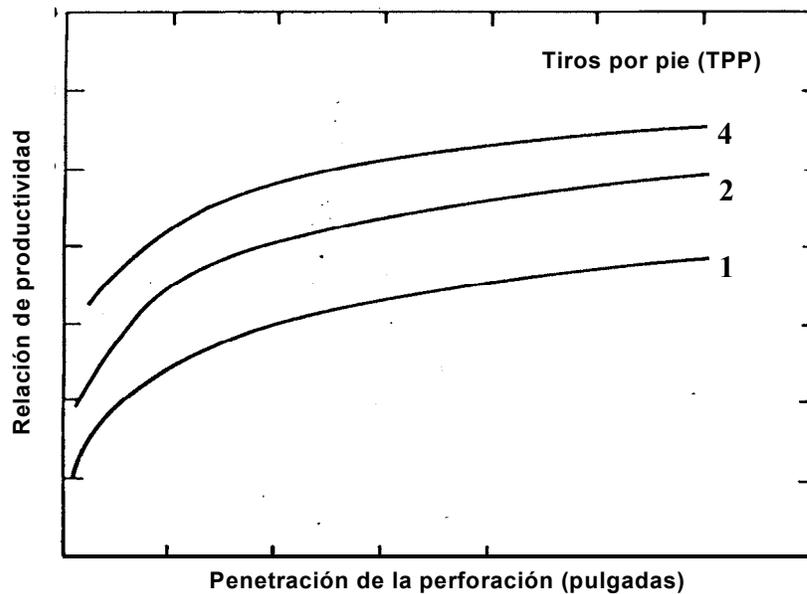


Figura 2.14

Relación de productividad en función de la penetración de la perforación y de la densidad de disparo

Puede observarse en la figura 2.14 que a medida que aumenta la densidad de disparo aumenta la relación de productividad. El revestimiento puede observarse como una restricción al flujo ya que inicialmente evita la entrada de fluidos al hoyo. Cuando la densidad de disparo aumenta, el área lateral de las paredes del revestimiento en el intervalo cañoneado se reduce, lo cual permite una mayor área de flujo. [16]

En un caso ideal, es de esperarse que cuando la densidad de disparo sea demasiado grande el pozo se comporte como un pozo produciendo a hoyo abierto. De igual forma puede observarse que a medida que aumente la penetración de la perforación aumente la relación de productividad, esto es consecuencia de una mayor área de flujo en el túnel de perforación, y una mayor facilidad de flujo hacia las perforaciones. [15]

2.8.8.- CENTRALIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Las herramientas de cañoneo con guaya nunca alcanza una centralización perfecta, ya que estas se apoyan por fuerzas gravitacionales contra la zona baja del revestidor, además de que la detonación de las cargas no es perfectamente homogénea, este fenómeno hace que la herramienta se asiente donde alcance un equilibrio contra la pared del revestidor, y los huecos serán buenos cuando logren superar la zona dañada. La herramienta TCP proporciona cargas mucho más centralizadas y en equilibrio, ya que la misma es rígida y dependiendo de la distancia existente a la empacadura que se fije antes de cañonear.[18]

2.8.9.- SELECCIÓN DEL TAMAÑO DEL CAÑÓN

El tamaño apropiado del cañón debe ser seleccionado para optimizar el diámetro de la perforación en el revestimiento y la profundidad de penetración en la formación. El tamaño del cañón, como el de un cañón de 4 1/2", se refiere al diámetro exterior del cañón vacío. Los tamaños de los cañones han sido diseñados para obtener resultados óptimos con varios tamaños de revestimientos. [18]

2.8.10.- CFE (EFICIENCIA DE FLUJO)

La efectividad de las operaciones de perforación pueden ser cuantificadas mediante el CFE (Core Flow Efficiency), el cual es definido como la relación del flujo observado entre el flujo calculado (ideal). [16]

El término CFE es esencialmente, una medida de laboratorio que indica la capacidad de la perforación para fluir, comparada al flujo de un hoyo ideal del mismo diámetro y profundidad del hoyo cañoneado.

2.8.10.1.- DETERMINACIÓN DE CFE

a) Determinación de la permeabilidad original del núcleo K_o

$$K_o = \frac{Q_o \cdot \mu_o \cdot L_o}{A_o \cdot \Delta P_o}$$

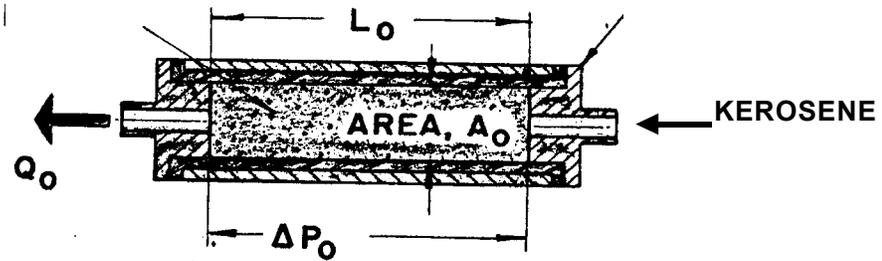


Figura 2.15

Determinación de permeabilidad original del núcleo

b) Determinación de la permeabilidad de la perforación K_p a partir de los datos de la prueba

$$K_p = \frac{Q_p \cdot \mu_p \cdot L_o}{A_o \cdot \Delta P_p}$$

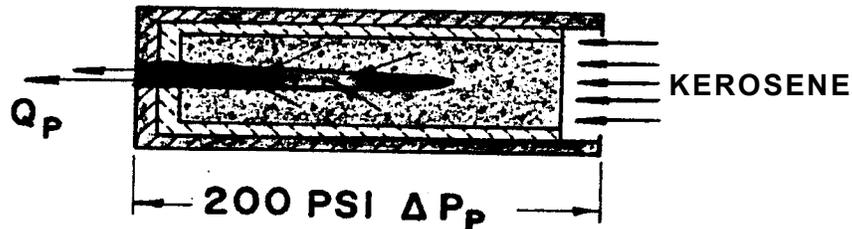


Figura 2.16

Determinación de permeabilidad de la perforación

c) Cálculo de CFE

$$CFE = \frac{K_p / K_o}{K_i / K_o} = \frac{K_p}{K_i}$$

donde K_i/K_o representa la relación de la permeabilidad efectiva de un núcleo que contiene una perforación ideal (del mismo diámetro al perforado y obtenido a la misma profundidad) y la permeabilidad original K_o .

2.9.- PARÁMETROS QUE DETERMINAN LA EFICIENCIA DE LAS PERFORACIONES

La relación de productividad es una función directa de la eficiencia de cañoneo y de las características del yacimiento. En yacimientos con porosidades y permeabilidades bajas, la relación de productividad se hace más crítica debido a la invasión creada por los fluidos utilizados en la etapa de perforación del pozo. [18]

Los parámetros fundamentales que determinan la eficiencia de las perforaciones de un proceso de cañoneo son:

- ❖ La penetración de las perforaciones
- ❖ El lavado de las perforaciones
- ❖ La densidad y distribución radial de las perforaciones
- ❖ El diámetro de las perforaciones

2.9.1.- PENETRACIÓN DE LAS PERFORACIONES

Las perforaciones deben extenderse algunas pulgadas dentro de la formación, preferiblemente más allá de la zona que se daña a consecuencia de la invasión de los fluidos de perforación. [16]

Evidentemente, las primeras pulgadas de penetración son las que posean un mayor efecto en la productividad. Cabe destacar que la penetración tiene aún más peso en formaciones dañadas, ya que brinda un mayor área de flujo que contribuye al movimiento de fluidos a través del medio poroso con daño. [16]

2.9.2.- LAVADO DE LAS PERFORACIONES

Detritos de cargas o de formación acumulados en los huecos perforados deben ser removidos. Por esta razón, es necesario después del cañoneo permitir al pozo un período de limpieza de sus perforaciones. [16]

El fluido de completación debe ser limpio, con el fin de no dañar la formación y lo cual simplifica la operación la lavado.

2.9.3.- DENSIDAD Y DISTRIBUCIÓN RADIAL DE LAS PERFORACIONES

Después de la penetración y del lavado de las perforaciones, la densidad de los tiros y su distribución radial (fases) son los factores que más influyen en la eficiencia de las perforaciones. Esto es debido al efecto que tanto la densidad como la distribución radial ejercen en la productividad del pozo. [16]

La distribución radial de los tiros es importante, ya que se pueden lograr incrementos de productividad hasta de un 15% cuando se compara el mejor y el peor de los casos. Sin embargo, en algunas situaciones se hace necesario el uso de cañones sin distribución radial, con el fin de asegurar una penetración adecuada (fase 0°). [16]

2.9.4.- DIÁMETRO DE LAS PERFORACIONES

En los trabajos de empaque con grava el diámetro de las perforaciones debe ser de 0.6 a 0.8 pulgadas, con el fin de minimizar la caída de presión, a través de ellas. Una caída excesiva de presión, a través de las perforaciones, puede ser indicación de que la densidad de tiro debe ser incrementada. De una manera similar, los trabajos de fracturamiento y acidificación requieren de un aumento en la densidad de tiro. [16]

En los casos restantes, se considera adecuado un diámetro de perforaciones de 3/8 de pulgada o más. De esta manera se permite el lavado de las perforaciones y se evita su taponamiento con asfalto o escamas. [16]

CAPÍTULO III EFECTOS DE DAÑO PRODUCIDO POR EL PROCESO DE CAÑONEO

3.1.- DAÑO

La reducción de la permeabilidad que se produce alrededor de un pozo se denomina daño, la cual es una representación adimensional de la caída de presión que ocurre a través de la zona cercana a la cara de la formación y que obedece al paso de fluidos a través de una zona dañada cercana al pozo. El daño lo constituye cualquier restricción del flujo en la vecindad del pozo. Este valor puede ser determinado a través de una prueba de restauración de presión y el mismo es consecuencia de la invasión de fluidos que ocurre durante las operaciones de perforación y completación del pozo. [18]

3.2.- EL DAÑO A LA FORMACIÓN

Es el daño causado durante las operaciones de: perforación, completación, reacondicionamiento, producción o inyección. Los movimientos hacia afuera o hacia adentro de la formación pueden crear daños que afectan los canales de flujo, específicamente los tipos de daño por: sólidos de cemento prelavado, residuos de carga durante el cañoneo, sólidos de fluidos de completación, bloques de emulsión, precipitados de acidificaciones, residuos de material de fractura, parafinas, asfalto, costras y otros sólidos. [18]

3.3.- DAÑO PRODUCIDO POR EL PROCESO DE CAÑONEO

El patrón de cañoneo y la penetración afectan la productividad de un pozo. De penetrar el chorro a la formación se produce desplazamiento y compactación de la formación, en la cercanía de la zona cañoneada, lo cual altera la permeabilidad original de esa zona. Además, la cavidad creada por el cañoneo, se llena de material de la formación y de restos de explosivo pulverizado. Este material es usualmente removido, mediante el lavado de las perforaciones, hasta lograr recuperar la capacidad de flujo original. [16]

Es recomendable que las perforaciones se dejen fluir hasta obtener una capacidad de flujo máximo. Por lo tanto, si se intenta lavar las perforaciones antes de que esto ocurra, se puede reducir la capacidad de flujo posterior, ya que las partículas finas pueden taponar los

poros. Idealmente, después del cañoneo, la formación debe ponerse a producir y luego proceder al período de limpieza de las perforaciones con fluidos limpios. [16]

El impacto que sobre la roca produce el cañón al ser disparado hacia la formación resulta en un choque de presiones (1.500.000 lpc en la entrada del túnel hasta 150.000 lpc hasta el límite de la perforación) la cual desintegra la roca adyacente, fractura los granos de arena y quiebra la cementación intergranular. El daño de la perforación produce la fragmentación del grano creando pequeñas partículas que reducen los canales porosos, y como consecuencia, su permeabilidad. [16]

El colapso del túnel de perforación puede ocurrir en rocas consolidadas débiles. El colapso del túnel es una función de la solidez de la roca, la tensión a la que está sometida y el bajo balance. Un incremento en la tensión ocurre durante un proceso de cementación bajo balance. Si esta tensión llega a producir la quiebra de la roca, entonces se producirá un colapso progresivo a través de todo el túnel de perforación. Esto puede inducir la quiebra de la roca entre las perforaciones. La quiebra de la roca remueve la permeabilidad de la zona dañada (esto es bueno), pero puede dejar restos de arena en el túnel de perforación (esto puede ser malo). [16]

3.4.- MECANISMOS DE CREACIÓN DE LA ZONA DAÑADA

Las perforaciones son creadas por cargas explosivas. Estas crean un jet de alta velocidad de partículas metálicas, las cuales atraviesan el revestimiento, el cemento y la roca. Una onda de choque es creada en el extremo de la perforación, la cual se extiende radialmente, como se observa en la figura 3.1.

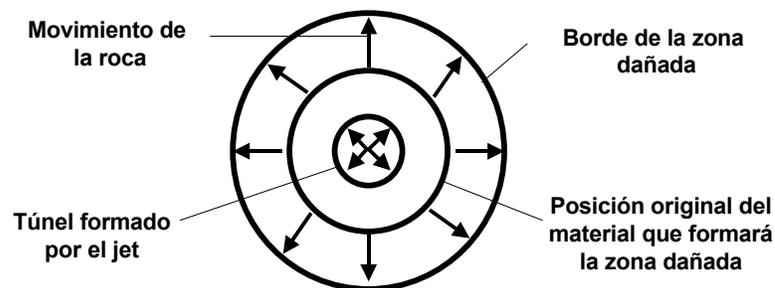


Figura 3.1

Movimiento de la roca durante la perforación del túnel

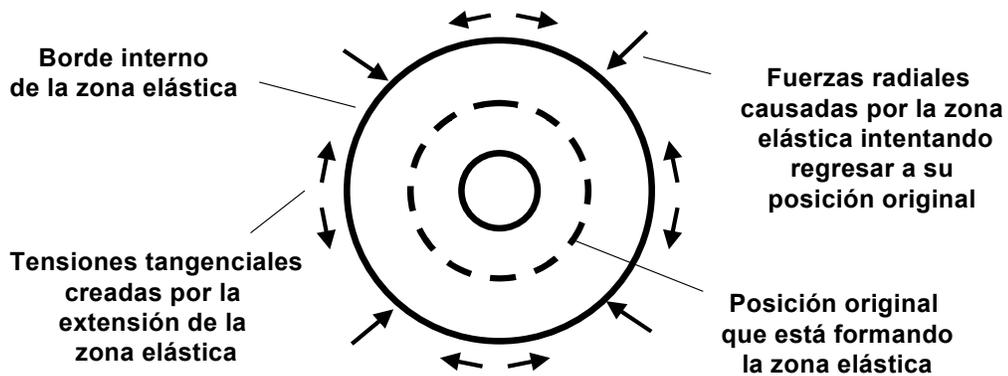


Figura 3.2

Fuerzas que afectan la roca una vez realizada la perforación

La presión causada por esta onda crea el ambiente rocoso típico asociado con la zona dañada de perforación (granos compactados). Las ondas se propagan radialmente y crean una declinación de la presión porque la onda se va desplazando a un área cada vez mayor y debido a la pérdida de energía causada por el compactamiento de la roca. [17]

Debido al compactamiento de la roca se forma el "túnel de perforación", el cual es rodeado por una zona elástica en la cual fuerzas radiales intentan calapsar la perforación. En la zona elástica actúan la tensión de sobrecarga y fuerzas tensiles actuando tangencialmente en el borde de la zona compactada, como se observa en la figura 3.2.

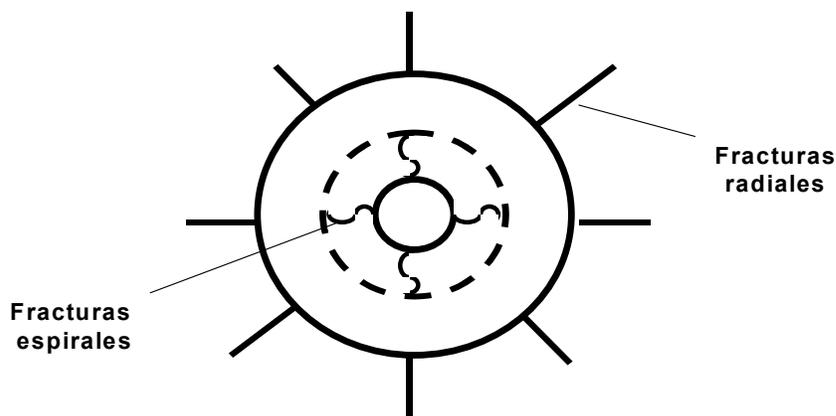


Figura 3.3

Fracturas producidas en la roca originadas por el cañoneo de la formación

Si la roca es muy débil, la tensión de sobrecarga colapsará la perforación desencadenando problemas de producción de arena. Si la roca es muy fuerte, puede quedar intacta, pero partes de la zona compactada pueden colapsar, llegando a ser un poco débil. Debido a la compactación de la roca pueden producirse fracturas en las zonas adyacentes al túnel de perforación, como se observa en la figura 3.3, que servirán de canales de flujo.

Si los restos creados por la ruptura de la zona compactada es limpiada, se creará una entrada alargada al túnel de perforación. En algunos casos es difícil remover los restos creados por el colapso de la zona compactada, lo cual induce a una pérdida de productividad a partir de la perforación.

3.5.- TIPOS DE DAÑO

Desde el punto de vista de limpieza, el daño total después de la perforación puede ser subdividido en dos categorías:

a.- El daño que está inicialmente presente. Las partículas cuyo diámetro es mucho más pequeño que el diámetro de los canales del medio poroso y la invasión del filtrado entra en esta categoría.

b.- El daño que está tan firmemente alojado que requiere gradientes de presión y velocidades de flujo extremadamente grandes para su remoción. Las partículas cuyo diámetro es comparable al diámetro de los canales del medio poroso, residuos metálicos alojados firmemente en el túnel de la perforación y partículas adheridas por fuerzas capilares y electrostáticas son las causas de este tipo de daño.

3.6.- MECANISMOS DE LA REDUCCIÓN DE PERMEABILIDAD

Los poros más grandes son destruidos y reemplazados por poros más pequeños. Es razonable pensar que las reducciones de permeabilidad son causadas por los cambios en el tamaño del poro. [17] Se ha observado que la reducción de la permeabilidad puede producirse por:

- 1) Los residuos de la carga. No aparece como un mecanismo común.
- 2) El efecto de pequeñas reducciones en el tamaño del poro
- 3) Los finos que se encuentran en libertad de movimiento debido al proceso de perforación, pueden migrar bloqueando los canales porosos.

En resumen, la reducción de la permeabilidad se da en una región cercana al túnel de perforación, en la cual la estructura del poro ha sido dañada por la perforación. En esta zona no hay pérdida de porosidad o incremento en la densidad. Los poros más grandes son reemplazados por poros más pequeños creando microfracturas. Esto trae como consecuencia el daño de la permeabilidad. [17]

3.7.- FLUJO EN EL ÁREA DE COMPLETACIÓN

Cuando se completa el pozo y éste fluye, ocurren varios patrones de flujo en el área vecina al pozo cerca de las perforaciones hasta que el fluido entre a la tubería de producción donde se inicia el flujo vertical. [18]

3.7.1.- FLUJO HACIA EL POZO

Este flujo proviene de la combinación de factores del yacimiento, éste se mueve de manera radial y laminar hacia el fondo del hoyo hasta que se estrechen los canales de flujo a cierta distancia de las perforaciones, allí ocurre una convergencia la cual se adapta a la geometría y características del pozo. El daño producido por estos efectos se llama daño por convergencia de flujo en el yacimiento o el común efecto embudo. [18]

3.7.2.- FLUJO DE ENTRADA AL POZO

Cuando entra el fluido a las perforaciones del pozo o área con residuos de lodo de perforación o fluido de completación, éste siente el efecto de dicha zona perturbada o de daño causando una pérdida adicional de presión, denominada daño por entrada al pozo. [18]

3.7.3.- FLUJO POR ORIFICIO Y DIVERGENCIA DENTRO DEL HOYO

Al atravesar las perforaciones el flujo se acelera de tal manera, que aumenta hasta el orden de 50 veces su velocidad; el flujo atraviesa la perforación libre, la zona de cemento y el agujero del revestidor, en un constante cambio de fase y proceso de liberación de gas o separación de fases debida a la caída de presión, para finalmente diverger dentro del revestidor. [18]

Los patrones de flujo nombrados anteriormente, van ocurriendo de manera subsiguiente, produciendo cada uno pérdidas de presión, sin embargo, se ha determinado que la mayor de estas ocurre, en el flujo a través del orificio cañoneado. [18]

3.8.- FUERZAS DINÁMICAS INVOLUCRADAS EN LA LIMPIEZA DE LAS PERFORACIONES

3.8.1.- PRESIÓN DIFERENCIAL

Asumiendo que después de la creación del túnel de perforación solamente hay arena fracturada suelta en el túnel, entonces existe una condición de borde en las paredes del túnel, una presión igual a la presión del yacimiento. [6]

Puede observarse en la figura 3.4 la onda de descompresión que se mueve radialmente desde las paredes del túnel, donde $P1 < P2 < P3 < P4$, reduciéndose de esta manera, la presión del yacimiento. Esta reducción es una función de las propiedades de roca y fluidos. Si la diferencia de presión para cualquier radio dado es demasiado grande, entonces, puede ser desarrollado un sustancial diferencial de presión que atraviese los granos de arena fracturada. Desafortunadamente, los simuladores que trabajen con este tipo de descompresión a través del medio poroso no está disponible. [6]

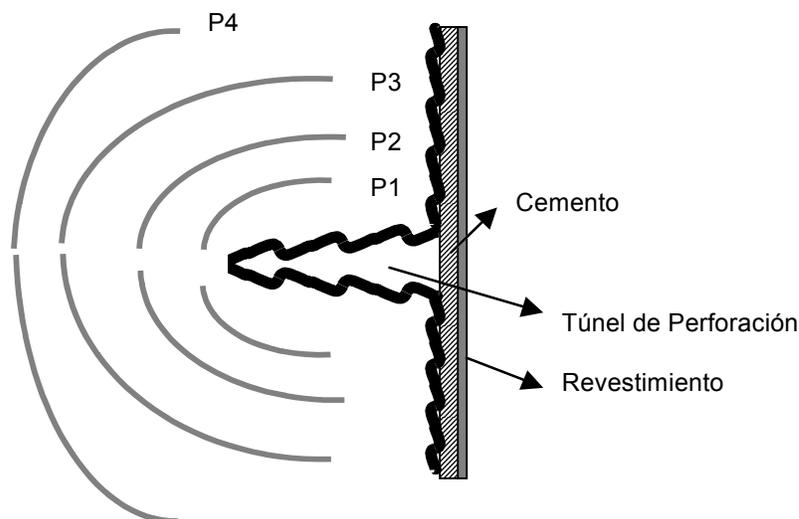


Figura 3.4

Ilustración de la onda de descompresión

3.8.2.- FUERZA DE ARRASTRE

La relación de movimiento existente entre una partícula y un fluido con el que se encuentra en contacto, radica en la fuerza que el fluido ejercerá sobre esta partícula. Esta fuerza es causada por dos factores. El primero es la acción de corte debido a la viscosidad y a los gradientes de velocidad, lo cual aumenta las fuerzas tangenciales a la superficies. La segunda son las variaciones de presión a lo largo de la superficie de la partícula sólida. La partícula es sometida a ambas fuerzas como se muestra en la figura 3.5. El vector suma de estas fuerzas aplicadas sobre la superficie de la partícula da como resultado una fuerza resultante. El componente de esta fuerza en la dirección de la velocidad es llamada fuerza de arrastre. [6]

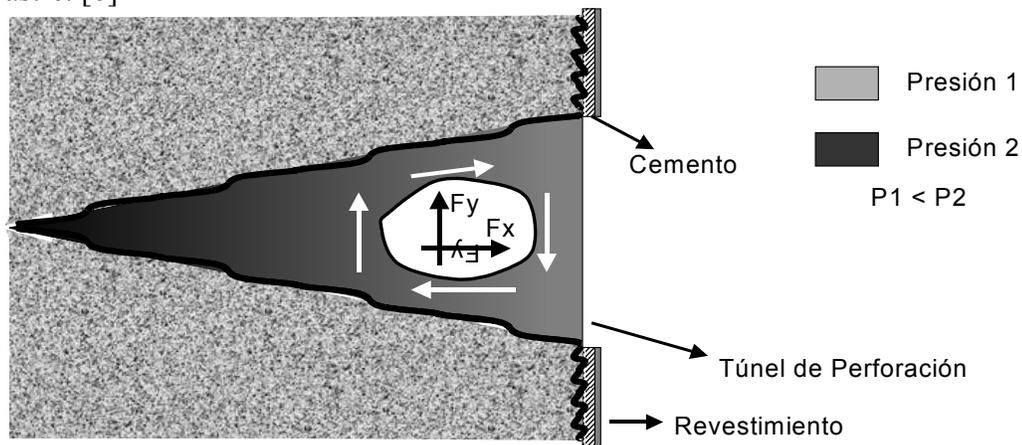


Figura 3.5
Fuerza de arrastre

Aunque el flujo turbulento puede existir cerca del radio de perforación inicial, la mínima fuerza de arrastre para limpiar el daño de la perforación ocurrirá a alguna distancia del radio inicial del túnel y será, en general, laminar. [6]

Las fuerzas de arrastre experimentadas por las partículas durante el flujo en un medio poroso son diferentes debido a la interferencia entre partículas adyacentes y la tortuosidad de las líneas de flujos. De esta manera una relación cercana existe entre el arrastre experimentado por las partículas y las características en un medio poroso. La teoría de arrastre ha sido utilizada para explicar la permeabilidad, en donde las paredes del poro son tratadas como obstáculos. [6]

3.9.- PERFORACIÓN BAJO BALANCE COMO MECANISMO DE LIMPIEZA

La limpieza del daño de la perforación durante el proceso bajo balance es el resultado de la descompresión del fluido del yacimiento que se encuentra en los alrededores de la perforación una vez que la presión diferencial yacimiento-hoyo es estabilizada durante el proceso de perforación. [20] Se asume que la limpieza del daño de la perforación es por parte de las fuerzas dinámicas (presión diferencial y arrastre) sobre las partículas de los granos de arena fracturados. Estas fuerzas mueven progresivamente las partículas desde las paredes del túnel de perforación, removiendo la permeabilidad de la zona dañada. Las fuerzas involucradas son mayores durante la descompresión del fluido, en la etapa post-cañoneo de flujo pseudo-estable no se produce limpieza adicional del daño primario. [5]

La limpieza de la perforación es levemente dependiente de la viscosidad del fluido y exceptuando el caso de crudos muy viscosos (quizás mayores a 100 cp) puede ser obviada.

3.10.- PARÁMETROS A CONSIDERAR EN LA PERFORACIÓN BAJO BALANCE

La perforación bajo balance o perforación con un diferencial de presión hacia el pozo, ha sido utilizado para mejorar la productividad de pozos.

El parámetro clave en la perforación bajo balance es el nivel de presión diferencial que es necesario para perforaciones limpias, y para remover el daño de la zona compactada próxima al túnel de perforación. Este es el mínimo bajo balance requerido para maximizar la productividad de un pozo [11]. Por otro lado, es el máximo bajo balance por encima del cual, problemas mecánicos de la formación, colapso del revestimiento, desasentamiento de empacaduras u otros problemas en el equipo del pozo pudieran ocurrir. Por razones de seguridad se establece que el desbalance máximo aplicable durante una operación de cañoneo debe ser el 80% de la menor presión de colapso que exista en las herramientas y tubulares del hoyo.

La elección en el valor de bajo balance para una completación debiera estar entre estos límites, el valor exacto es una función del grado de consolidación de la formación y/o la razón de esfuerzos de los tubulares usados en el pozo.

Capítulo III: Efectos del daño producido por el proceso de cañoneo

Para arenas no consolidadas, el bajo balance pudiera ocasionar problemas en la producción. Cuando un intervalo cañoneado se somete a un diferencial de presión hacia el pozo, los fluidos en las zonas adyacentes a la zona dañada experimentarán desplazamiento cuya velocidad será una función del diferencial de presión. Cuando el flujo entra en contacto con los límites de la zona dañada, ejerce una serie de tensiones tangenciales y fuerzas radiales, las cuales pueden producir el colapso de rocas no consolidadas. Si este colapso se produce, una gran cantidad de granos de arena pudiera ser sometido al arrastre del flujo, lo que produciría acumulación de arena en los orificios del cañoneo.

Para arenas consolidadas, el límite superior del bajo balance es usualmente determinado por la razón de esfuerzos de los tubulares, ya que su grado de compactación ofrece mayor garantía para la utilización de este método.

La limpieza de las perforaciones es un fenómeno complejo. Es afectado por las características de la roca, las propiedades del fluido que satura el espacio poroso y la manera en la cual el flujo es iniciado después de la perforación.

Una variable importante para el cálculo del mínimo bajo balance requerido para zonas de gas es la presión de la formación. Datos experimentales de trabajos anteriores arrojaron como resultado que el mínimo bajo balance requerido decrece con un incremento en la presión de la formación. Esto parece explicar el hecho que el bajo balance no es necesario para las zonas de gas a alta presión.

3.11.-

RAZONES DE LA MÍNIMA VARIACIÓN DE DENSIDAD

En la zona dañada, la estructura del poro de la roca es desordenada. Los poros pueden ser destruidos o ser llenados por fragmentos de granos, especialmente en la zona cercana al túnel de perforación.

Debido a la velocidad en la cual la zona compactada es formada no es sorpresa el hecho de que no ocurran cambios en la porosidad. La zona compactada es formada a una velocidad mayor que la velocidad del sonido en líquidos, en consecuencia no hay suficiente tiempo para que el líquido en el espacio poroso sea movido lejos del túnel de perforación. El líquido es relativamente incompresible. En consecuencia el líquido en el espacio poroso no podrá ni ser movido de los poros ni reducir su volumen. El resultado es que el volumen de poro debiera mantenerse. Un resultado diferente se obtendría en el caso de fluidos muy compresible.

CAPÍTULO IV GEOMECAÍNICA

4.1.- INTRODUCCIÓN

La Geomecánica o Mecánica de Rocas es el estudio de los efectos que producen las fuerzas sobre las rocas, al ingeniero le conciernen primordialmente aquellos fenómenos que influyen sobre la rotura y la fluencia, además de los cambios de volumen y forma de las rocas.

Así pues, para el ingeniero el estudio de la mecánica de rocas implica, el análisis del sistema de cargas que se aplican a las rocas, el análisis de los efectos internos desde el punto de vista de tensión, de la deformación unitaria o de la energía almacenada, y finalmente el estudio de las consecuencias de estos efectos internos, es decir, fractura, fluencia o simplemente la deformación de la roca. A su vez la mecánica de rocas tiene gran importancia en el estudio de los fenómenos que llevan a la rotura de los materiales. En las rocas es posible observar los esfuerzos y deformaciones obtenidas a partir de las diferentes pruebas efectuadas sobre el material.

Aunque las bases de la geomecánica fueron hechas a principio del siglo, las aplicaciones petroleras empiezan a tener mayor divulgación a principio de la década de los 70, y por lo tanto esta es una disciplina novedosa para la ingeniería de petróleo.

4.2.- GRÁFICOS ESFUERZO - DEFORMACIÓN

En términos generales no existe ningún material 100% elástico ni 100% viscoso sino una combinación de ambos comportamientos.

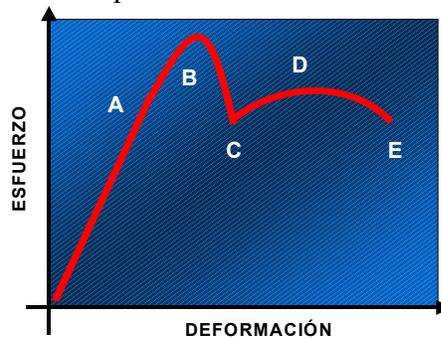


Figura 4.1

Gráfica esfuerzo - deformación

En la figura 4.1 podemos observar los siguientes puntos característicos:

A.- Límite de proporcionalidad: es el valor de esfuerzo a partir del cual la deformación deja de ser reversible y deja de ser proporcional al esfuerzo aplicado. A partir de este punto se puede hablar de una deformación viscosa (también llamada deformación plástica).

B. y C.- Límite superior e inferior de fluencia: cuando se somete a un sólido a un estado de esfuerzo de la suficiente magnitud y durante un tiempo largo, se presenta un flujo en estado sólido de las moléculas que lo conforman. Este flujo en estado sólido se denomina fluencia. Es decir, durante el proceso de deformación, las moléculas del sólido se comportan como un fluido de muy alta viscosidad. Es interesante notar que el límite superior de fluencia ocurre bajo una magnitud de esfuerzo mayor que el límite inferior de fluencia y sin embargo ocurre primero el superior que el inferior. Por lo tanto, una vez iniciada la fluencia se puede descargar en cierta medida el sólido y continúa este fenómeno.

También es importante notar que si después de alcanzar el límite inferior de fluencia se incrementa otra vez la magnitud de esfuerzo aplicado, ya no se repite el fenómeno de fluencia. Esto obedece a que en el proceso de fluencia existe un recomido cristalino de las moléculas del sólido y este recomido puede darse solo una vez.

D.- Esfuerzo máximo: es el máximo esfuerzo al que se puede someter a un sólido. Una vez alcanzado este nivel de esfuerzo, el sólido sufrirá fractura aunque se le retire una cierta cantidad de esfuerzo.

E.- Fractura o falla: se produce una vez alcanzado el estado de esfuerzo máximo. Se denomina de esta manera debido a que es el punto en el cual el material presenta fallas o fracturas en su estructura. Como se puede observar, existe una relación entre el esfuerzo aplicado a un elemento, y la deformación que este sufre.

4.4.- DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS SOBRE LA FORMACIÓN

La formación está sujeta a los esfuerzos provenientes de la presión de sobrecarga y de los efectos tectónicos existentes en la misma. La roca en su estado natural se encuentra sometida a esfuerzos en tres direcciones principales, verticalmente por la sobrecarga de sedimentos (S_v) y horizontalmente en dos direcciones ortogonales, el mínimo horizontal y

el máximo horizontal. El máximo y el mínimo esfuerzo se denota como S_H y S_h respectivamente. En la figura 4.2 se observan los tres esfuerzos principales sobre un elemento de roca del subsuelo.

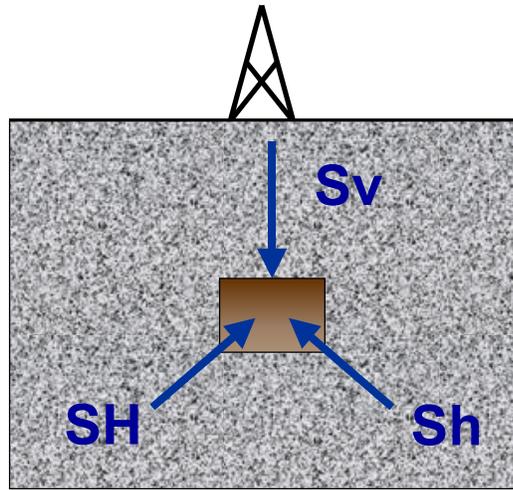


Figura 4.2
Distribución de esfuerzos

4.4.- CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES GEOLÓGICOS

Los materiales geológicos presentan características muy particulares y por lo tanto los problemas son bastante diferentes. Algunas de las características particulares de los problemas que involucran materiales geológicos son los siguientes:

- Los materiales geológicos son esencialmente diferentes en cada localidad y por lo tanto cada caso tiene que ser tratado de manera particular. No existe un material geológico de propiedades constantes para una zona.
- El comportamiento de los materiales geológicos depende de la presión, y condiciones de sedimentación, erosión, meteorización, edad de los mismos, etc; por lo tanto, estos factores deben ser determinados para evaluar el comportamiento.
- Los materiales geológicos son sensibles a la perturbación por las operaciones de muestreo y por lo tanto las propiedades mecánicas medidas en el laboratorio pueden ser representativas del comportamiento en el sitio.

- Los materiales geológicos no poseen una relación esfuerzo deformación única y lineal. Un mismo material presentará diferencias a diferentes presiones de confinamiento.

4.5.- CRITERIOS DE ROTURA DE ROCA

La teoría de fallas se remonta a 1760. cuando el físico francés Charles Agustín de Coulomb descubrió que el esfuerzo de corte ocurre en planos de 45° con respecto a la carga compresional. Sin embargo, observó que las fracturas tendían a orientarse en ángulos menores. Concluyó entonces que esto se debía a la fricción interna impuesta por los esfuerzos perpendiculares al plano de fractura, lo que a la vez aumentaba la resistencia cohesiva de los materiales.

Alrededor del año 1900, el ingeniero alemán Otto Mohr generalizó el criterio de Coulomb y estableció las bases para los análisis actuales de las roturas de las rocas.

Mohr observó que la función de las fallas podía describirse como la envolvente a todos los círculos que podían trazarse utilizando como diámetro a los esfuerzos máximos y mínimos en el punto de falla, conocidos como círculo de Mohr.

Esta teoría aplicada al fallamiento de las rocas asume un campo de esfuerzos bidimensional, donde los esfuerzos principales actúan en un plano horizontal, uno actuando en la dirección radial y otro en la tangencial. La técnica asume que los efectos de los esfuerzos verticales son despreciables y que la roca se comporta como un cuerpo elástico al ser sometida a esfuerzos.

Para el año de 1920, Terzaghi identificó la labor de la presión del fluido en el medio poroso. Condujo experimentos con pares de muestras similares, utilizando alta presión de poro en una de ellas y cero presión en la otra. Descubrió que la criterio de Mohr - Coulomb funcionaba correctamente siempre que se restara la presión de poro del esfuerzo. Este parámetro se conoció con el nombre de esfuerzo efectivo.

El criterio de Mohr - Coulomb hasta el momento actual es el más adecuado para el estudio de resistencia de las rocas sometidas a tensiones de compresión. Es la teoría que tiene mayor base experimental.

4.6.- PRESIÓN DE PORO Y ESFUERZO EFECTIVO

Una porción del esfuerzo total aplicado, es soportado por el fluido contenido en los poros que conforman la roca. Debido a que esto ocurre, la matriz solo es afectada por el componente del esfuerzo efectivo.

Adicionalmente, la presencia de un fluido que se mueve libremente en el medio poroso, causa un efecto en la respuesta mecánica.

Los materiales geológicos están compuestos de partículas sólidas y poros llenos de fluidos que pueden desplazarse. Debido a esto cuando un elemento del material geológico está sometido a un esfuerzo externo, el mismo se reparte en un esfuerzo intergranular y una presión de poros, de manera que:

$$\sigma = \sigma_e + \alpha U$$

donde α es llamada coeficiente de Biot, el cual mide la cantidad de esfuerzo que toma el fluido. El esfuerzo intergranular σ_e es conocido como el esfuerzo efectivo y es el esfuerzo que controla el comportamiento mecánico de los materiales geológicos: Todos los efectos mensurables de un cambio de esfuerzo (compresión, resistencia) son debidos solamente a esfuerzos efectivos.

En materiales muy porosos (arenas no consolidadas)) el valor del coeficiente de Biot tiene su máximo, que es igual a uno, lo que significa que toda la presión de poros está contribuyendo a soportar el esfuerzo total. En rocas de baja porosidad es posible que este número sea cercano a 0,8. En materiales sin poros, como los metales, no existe la presión de poros y por tanto, el esfuerzo efectivo es igual al esfuerzo total, que es el esfuerzo comúnmente referido en resistencia de materiales.

En Ingeniería de petróleo, los esfuerzos totales se deben a la profundidad (sobrecarga) y a los esfuerzos tectónicos, mientras que la presión de poros es producto de la presión del fluido del yacimiento.

4.7.- MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ROCA

Los estudios geomecánicos casi siempre necesitan muestras de la roca y por lo tanto resulta necesario la obtención de núcleos geológicos. Estos núcleos serán utilizados para

tomar muestras para ensayos especializados de laboratorio. Si resulta necesario obtener de los ensayos de laboratorio información sobre direcciones, los núcleos deben ser orientados por métodos tradicionales durante la toma de los mismos. Para núcleos ya tomados, solamente existe el método de orientación basado en paleomagnetismo que se hace en superficie. En núcleos frescos se pueden utilizar el paleomagnetismo o el método tradicional, aunque este último resulta más costoso.

4.7.1.- PRUEBAS DE LABORATORIO

Existe gran variedad de ensayos de laboratorio para medir diferentes propiedades mecánicas de la roca. Las propiedades mecánicas de interés se dividen en aquellas que miden resistencia, las que miden direcciones de esfuerzos o deformaciones y las que miden comportamiento esfuerzo - deformación. Generalmente existe un tipo de ensayo para medir una propiedad particular. El tipo de ensayo más común en la geomecánica es el de compresión triaxial, que sirve para medir la resistencia al corte y el comportamiento esfuerzo - deformación de una muestra de suelo a una presión confinante. Otro tipo de ensayo muy utilizado en la geomecánica es el de compresión uniaxial que sirve para medir el comportamiento esfuerzo - deformación de una muestra sin deformación lateral. Se pueden realizar ensayos donde se miden las propiedades dinámicas de la roca en el laboratorio y los cuales pueden ser usados para correlacionar con registros petrofísicos de campo.

4.7.2.- PRUEBAS DE CAMPO

Existen varios tipos de trabajo de campo que también son necesarios para un análisis geomecánico. El uso de herramientas petrofísicas acústicas que midan la velocidad de ondas S y P resulta fundamental, ya que se puede determinar las propiedades dinámicas de la formación. Estas propiedades dinámicas de campo pueden ser comparadas con las propiedades dinámicas y estáticas (resistencia) de laboratorio para elaborar correlaciones predictivas. También resulta muy importante conocer la magnitud del esfuerzo principal menor para determinar el estado de esfuerzos, por lo que se debe efectuar una prueba minifrac y microfrac que mida la presión de apertura y cierre a distintas profundidades. Otra herramienta petrofísica de importancia la constituye el probador múltiple de formación (RFT, MDT) que mide la presión de poros a diferentes profundidades. El conocimiento de

las presiones de poros es fundamental para poder calcular el esfuerzo efectivo que controla el comportamiento mecánico de la roca.

4.8.- CÍRCULO DE MOHR

Las pruebas uniaxiales y triaxiales son probablemente las pruebas más útiles en el estudio de las propiedades mecánicas de las rocas. La diferencia entre ellas reside en la presencia o ausencia de una presión de confinamiento aplicada a la muestra.

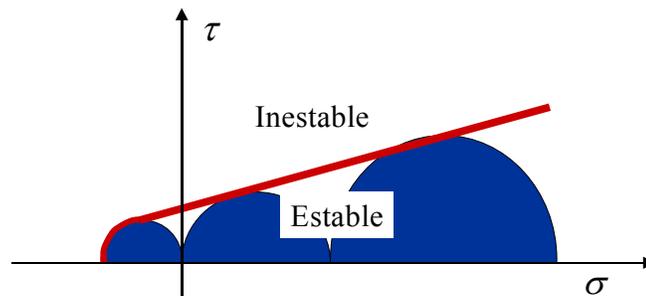


Figura 4.3
Envolvente de falla

Para obtener la envolvente de falla característica de un tipo particular de roca, como lo observada en la figura 4.3, una serie de pruebas triaxiales deben realizarse: la prueba de tensión uniaxial, prueba compresiva uniaxial y prueba triaxial. La envolvente de estos círculos es un límite que separa las condiciones de estabilidad de las condiciones de inestabilidad.

A condiciones del pozo, el círculo de Mohr crece a medida que aumenta el diferencial de presión, esto hasta alcanzar el punto crítico de falla. En rocas pobremente consolidadas donde el colapso de los poros es un mecanismo potencial de falla, la envolvente de falla puede delinear un espacio cerrado.

4.9.- INTERPRETACIÓN DE LA ENVOLVENTE DE MOHR

Si el círculo de Mohr para un determinado estado de esfuerzos queda totalmente por debajo de la envolvente, la roca será estable para ese estado de esfuerzos.

Si el círculo de Mohr es tangente a la envolvente, se habrá alcanzado la resistencia máxima de la roca en un determinado plano a través del mismo. No es posible mantener en el interior de una roca un estado de esfuerzo cuyo círculo de Mohr corte a la envolvente correspondiente a esa roca. Cualquier intento de imponer un estado de esfuerzos dará lugar a deformaciones ilimitadas, es decir, a la falla o fractura del material.

4.10.- MECANISMOS DE FALLA

Analizando la teoría de Mohr y su envolvente de falla se consideran como mecanismos de falla los esfuerzos de cohesión, los esfuerzos de tensión, los esfuerzos de corte y el colapso de poros, como se observa en la figura 4.4.

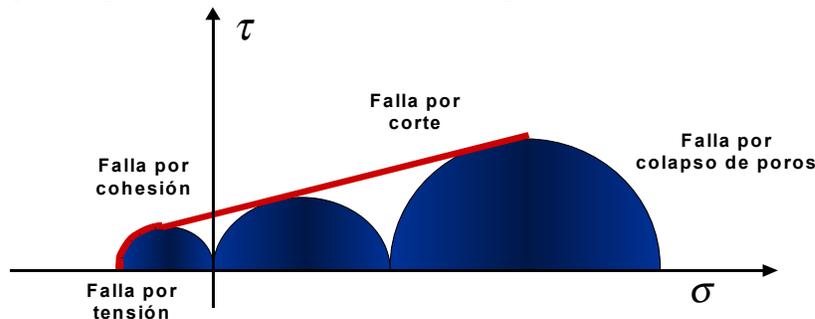


Figura 4.4
Mecanismos de falla

4.10.1.- FALLA POR COHESIÓN

Se refiere a la fuerza que mantiene unidos los granos de la formación productora e impiden el flujo libre. Las rocas que han sufrido poco grado de compactación y que no poseen mucho material cementante son fácilmente disgregadas. Otro factor que contribuye a la roca es la fuerza capilar que se produce entre los granos de la roca y el fluido humectante.

4.10.2.- FALLA POR TENSIÓN

Fallas por tensión ocurren cuando la tasa de producción es tan alta que crea un diferencial de presión alrededor del pozo que produce rotura de la formación. En este caso,

la roca falla por tensión, debido a que es sometida por esfuerzos superiores a su resistencia por tensión.

4.10.3.- FALLA POR COLAPSO DE POROS

La presión de sobrecarga a la cual está sometida la formación está soportada por los granos que constituyen el esqueleto mineral del sistema así como también por los fluidos contenidos dentro del espacio poroso, de tal manera que el esfuerzo al cual está sometido el esqueleto mineral es una fracción del esfuerzo total aplicado, el cual se denomina esfuerzo efectivo.

El esfuerzo efectivo al que está sometido el material aumentará a medida que se reduce la presión de poros y puede llegar a producir roturas en el esqueleto mineral, colapsando los poros.

4.10.4.- FALLA POR CORTE O CIZALLAMIENTO

Las fallas de corte ocurren cuando la combinación de esfuerzos intercepta la envolvente de ruptura, debido a que la roca es sometida a un campo de esfuerzos de tal forma que su resistencia al corte es alcanzada. La resistencia al corte de los materiales porosos es variable y aumenta linealmente con los esfuerzos compresionales.

4.11.- APLICACIONES DE LA GEOMECÁNICA EN LA INGENIERÍA DE PETRÓLEO

La geomecánica siempre trata problemas donde se relacionan esfuerzos con la resistencia de la formación. Es entonces de esperar, que aquellas operaciones de pozos que afecten y causen daño a la resistencia de la formación, también van a tener gran influencia en el análisis de cualquier problema.

4.11.1.- POZOS HORIZONTALES Y DE GRAN DESVIACIÓN

La magnitud y dirección de los esfuerzos en sitio, van a definir la trayectoria de mayor estabilidad para pozos horizontales y de gran desviación. Los pozos tendrán una mayor estabilidad si son perforados en la dirección perpendicular al esfuerzo principal

menor. Este problema de estabilidad también se complica porque el eje del pozo no coincide con la dirección del esfuerzo principal mayor. Si se puede determinar experimentalmente la envolvente de falla de la roca de la formación, entonces se puede calcular el rango de pesos de lodo que mantenga la integridad del hoyo. Los problemas de estabilidad pueden existir aún después de la perforación debido a que la mayoría de los pozos horizontales son completados a hueco abierto y la reducción de presiones de poros del yacimiento causa un aumento en los esfuerzos efectivos.

4.11.2.- OPERACIONES DE CAÑONEO

Debe destacarse las dificultades producidas durante las operaciones de cañoneo de un pozo, tal es el caso de la migración de finos hacia el pozo, ocasionando problemas de arenamiento. Los túneles de perforación pueden ser negativos desde el punto de vista de la formación, el análisis de esfuerzos y la selección de la dirección de disparo nos brindará la información necesaria para predecir la estabilidad de la roca durante la producción del pozo, para optimizar el proceso en función de las características de la roca.

El proceso de perforación de la roca producido por el cañón a chorro, pulverizará la roca a su paso y producirá desprendimiento de finos que se desplazarán en la dirección del pozo; a medida que los esfuerzos in situ incidan sobre la formación en una dirección cada vez más cercana a la perpendicular se observará un impacto negativo adicional en las zonas adyacentes al túnel de perforación. Es necesario tomar en cuenta las direcciones de los esfuerzos principales para el diseño del proceso de cañoneo, este paso permitirá optimizar la eficiencia y rendimiento de las perforaciones con datos suministrados por la geomecánica. Una mayor migración de los finos de arena hacia el pozo puede derivarse de una selección equivocada de la dirección de disparo.

Otros responsables para el problema de producción excesiva de arenas son los esfuerzos desestabilizadores actuando sobre la formación (tasa de flujo y gradiente de presión). Su magnitud no puede ser mayor que la resistencia mecánica de la formación. Cuando esta resistencia es excedida, entonces ocurre desprendimiento de granos de material de la formación causando arenamiento. Resulta necesario conocer el estado de esfuerzos y la envolvente de falla de la formación para poder determinar el gradiente de producción (drawdown) crítico que no cause producción de arena. Adicionalmente se debe evaluar el efecto que tienen las operaciones de pozo (perforación, completación y

producción) nocivas sobre el arenamiento de pozos, ya que pueden afectar los esfuerzos desestabilizadores y las resistencias mecánicas.

La roca se encuentra sometida al esfuerzo de sobrecarga y al esfuerzo máximo y mínimo del plano horizontal.

Definiendo la dirección de disparo en función de los esfuerzos máximo y mínimo, analizaremos los dos casos extremos:

- Dirección de disparo paralelo a la dirección del esfuerzo máximo (perforación A y C de la figura 4.5).
- Dirección de disparo paralelo a la dirección del esfuerzo mínimo (perforación B y D de la figura 4.5).

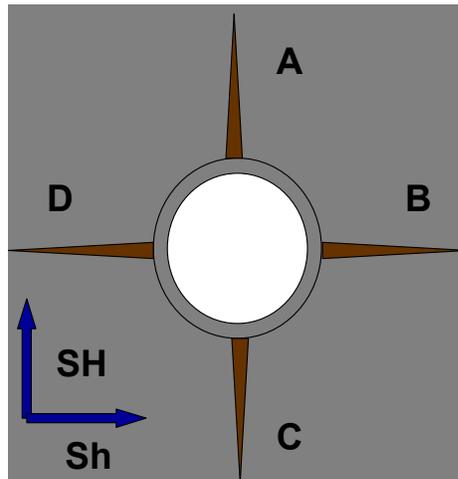


Figura 4.5

Dirección de disparo en función del esfuerzo máximo y mínimo

4.11.2.1.- CAÑONEO EN LA DIRECCIÓN DEL ESFUERZO MÍNIMO

En su estado original la roca se encuentra confinada por tres esfuerzos, los cuales crearán en el material rocoso una tendencia a desplazarse. Este movimiento favorecerá el desprendimiento de granos que serán transportados por los fluidos del yacimiento.

El desplazamiento del material rocoso y su tendencia a liberar granos de arena será determinado por las magnitudes relativas de los esfuerzos en el plano horizontal y a la estabilidad del túnel, cuya disposición se observa en la figura 4.6. Cuando se cañonea en la

dirección del mínimo esfuerzo, el túnel creado por la penetración del jet estará sujeto a la influencia del esfuerzo máximo, el cual creará una tendencia a cerrar el túnel y a desplazar los fluidos, lo cual desencadenará un mayor acarreo de los granos de arena hacia las perforaciones. Este proceso de migración de finos hacia el hoyo producirá serios problemas de producción de arena lo cual, producirá un daño irreversible al yacimiento.

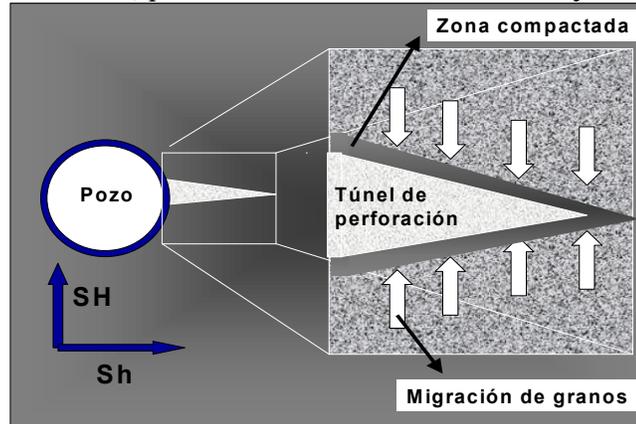


Figura 4.6

Cañoneo en dirección del mínimo esfuerzo

4.11.2.2.- CAÑONEO EN LA DIRECCIÓN DEL ESFUERZO MÁXIMO

La dirección del máximo esfuerzo principal horizontal incidirá sobre un área menor del túnel de perforación que en el caso presentado anteriormente. Al tener un menor área de incidencia su efecto dañino sobre el hoyo será mucho menor, como se observa en la figura 4.7, por esta razón se considera que una dirección óptima de disparo será definida por la dirección del máximo esfuerzo horizontal.

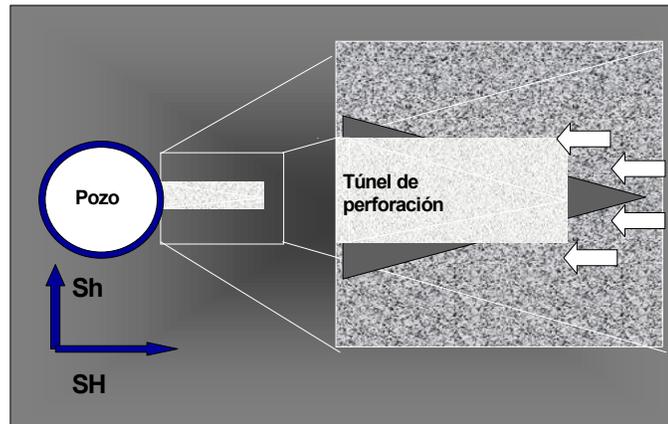


Figura 4.7

Cañoneo en dirección del máximo esfuerzo

4.11.3.- DAÑO AL REVESTIMIENTO

La expulsión de arena puede producir crecimiento de la cavidad y su eventual inestabilidad (figura 4.8).

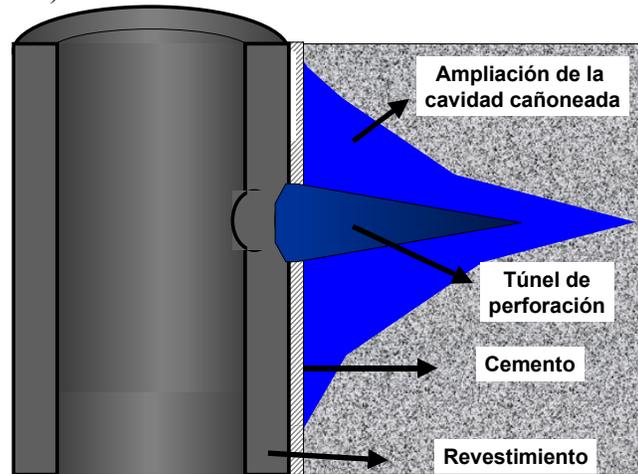


Figura 4.8

Riesgo de colapso del revestidor provocado por el crecimiento de la cavidad formada por el cañoneo

Este proceso de crecimiento de la cavidad puede seguir hasta que se llega a un valor crítico de flujo y presión, donde ya no es posible mantener la estabilidad en la cavidad, y por lo tanto se produce su colapso.

En este momento, se dice que la tasa crítica de arenamiento ha sido excedida y se inicia una producción de arena continua que no se puede detener. Es importante tener en cuenta que en formaciones consolidadas, la arena producida proviene de las cavidades creadas producto de los orificios cañoneados, los cuales van creciendo a medida que continúa la producción de arena. Esto quiere decir que la producción de arena va dejando una cavidad en la formación detrás del revestidor dejando a éste sin soporte, lo que puede causar que el mismo colapse

4.11.4.- FRACTURAMIENTO HIDRAÚLICO

Las características mecánicas de la formación controlan el diseño de las fracturas hidráulicas. La altura de la fractura está relacionada al contraste de las magnitudes de los

esfuerzos principales menores en los diferentes estratos geológicos. La presión de rompimiento y el gradiente de fractura están relacionados al esfuerzo principal menor y a la resistencia a la tracción de la roca. La dirección de los esfuerzos indica la dirección de la fractura hidráulica, ya que la misma es perpendicular a la dirección del esfuerzo principal menor. La longitud de la fractura y su propagación están relacionadas a la resistencia al corte y dureza de la roca.

4.11.5.- COMPLETACIÓN DE POZOS

El conocimiento de la resistencia mecánica de la roca es muy importante en la selección de perforadores de cañoneo ya que la penetración del mismo es dependiente de la resistencia de la roca. La geomecánica también puede ser muy útil para definir el tipo de completación en pozos horizontales. Las completaciones a hueco abierto pueden tener mayor productividad que un hueco entubado, pero pueden ser menos estables en un futuro. Se debe evaluar la estabilidad de la completación a hueco abierto en diferentes etapas de su vida productiva a medida que aumenten los esfuerzos efectivos por la disminución de las presiones de yacimiento.

La estabilidad de las cavidades producto de cañoneo está controlada por el estado de esfuerzos de ellas y la resistencia de la roca. La inestabilidad del túnel puede producir problemas de arenamiento lo cual podría influir negativamente en la resistencia del revestimiento y en la productividad del pozo.

4.11.6.- YACIMIENTOS NATURALMENTE FRACTURADOS

En yacimientos naturalmente fracturados resulta necesario determinar la dirección de las fracturas naturales. Las fracturas se abren perpendicular al esfuerzo principal menor que existía cuando se origina dicha fractura. Esto va a ser de suma importancia para yacimientos fracturados de rocas con baja permeabilidad, ya que la producción ocurre principalmente por los sistemas de fracturas naturales y no por la matriz.

Núcleos orientados usados en conjunto con análisis geomecánicos de laboratorio también pueden ser utilizados para la determinación de las direcciones de esfuerzos en sitio que son los causantes de la fractura. Esto ayudará a determinar la dirección óptima de

pozos desviados y horizontales que intercepten el mayor número de fracturas naturales y poder así tener mayor producción de hidrocarburos.

4.11.7.- COMPACTACIÓN Y SUBSIDENCIA

En yacimientos someros de arenas no consolidadas ocurre compactación de las arenas productoras a medida que disminuye la presión del yacimiento. Si las condiciones geométricas y rigideces de las capas suprayacentes cumplen ciertos requisitos, la compactación de las arenas del yacimiento puede causar el fenómeno de subsidencia. El grado de compactación de la arena es calculado mediante ensayos de laboratorio especiales y conociendo el estado de esfuerzos del yacimiento. El grado de compactación de la arena sirve para calcular el volumen de crudo que puede ser producido por el mecanismo de compactación, lo cual tiene un gran impacto sobre las reservas recuperables.

4.12.- ORIENTACIÓN DE NÚCLEOS

La orientación de muestras de roca, obtenidas en perforaciones petroleras, tiene valiosas aplicaciones en geología estructural e ingeniería de pozos. Datos direccionales, tales como dirección de transporte de sedimentos, orientación de ejes de máxima porosidad y disposición de fracturas y diaclasas, pueden ser determinantes al diseñar la configuración productiva de un campo. Usualmente, esta información es obtenida por medio de exploración sísmica y estudios geológicos. Sin embargo, en muchas ocasiones estos métodos carecen de la resolución deseada y es necesario recurrir a otras herramientas, muy costosas, como perforar núcleos orientados a hacer sondeos eléctricos en los pozos.

Cada día se obtiene un mayor desarrollo de las técnicas de orientación de núcleos, ya que ha permitido realizar el análisis de estabilidad de las perforaciones y obtener pozos y cavidades de cañoneo con una mayor vida productiva, mediante el análisis de esfuerzos a los cuales está sometida la formación.

Los métodos tradicionales de orientación de núcleos, por ejemplo, “Multishot Orientation”, tienden a ser pocos económicos. Factores como el costo del equipo de campo, la cantidad de personas involucradas en las labores de extracción y rotulación y, probablemente lo más importante, el gran tiempo empleado durante la perforación, inciden negativamente en el uso de esta herramienta. Un método alternativo, económico y rápido,

reside en el uso de las propiedades magnéticas de las rocas o método paleomagnético. Hasta el presente, esta posibilidad no ha sido explotada en gran medida por la industria petrolera venezolana, aunque es utilizada exitosamente en Estados Unidos. Este método, no sólo ofrece buenas posibilidades de obtener la información deseada, también tiene ventajas inherentes a sí mismo. Dos de éstas podrían ser la correlación magnetoestratigráfica entre pozos y la determinación de paleocorrientes por medio de anisotropía magnética. Una ventaja práctica adicional es que los estudios paleomagnéticos pueden hacerse en cualquier tipo de roca, excepto algunos conglomerados, por lo cual es posible utilizar intervalos estratigráficos con poco interés para otras disciplinas.

4.13.- PALEOMAGNETISMO

4.13.1.- INTRODUCCIÓN

Las rocas durante su formación y a través de su historia geológica adquieren un “Magnetismo Remanente Natural”. En una roca obtenida de un pozo es de esperar las siguientes componentes formadoras de MRN

- magnetismos detrítico y químico adheridos durante la deposición y diagénesis temprana.
- viscosos y térmicos obtenidos debido a la permanencia de la roca en el subsuelo y su posterior extracción y,
- magnetismos rotacionales que son impresos durante la perforación en dirección paralela a ésta y con sentido hacia el suelo.

La elección de cada una de estas componentes conlleva al adoptar direcciones diferentes del campo geomagnético de referencia. Para el primer caso, debe adoptarse una de que Suramérica ha rotado muy poco desde el Cretáceo Inferior (edad más antigua de las rocas de interés). Sin embargo la presencia de rotaciones tectónicas, obliga a investigar la presencia de estos movimientos para tomarlos en cuenta pertinentemente. A pesar de ser la señal magnética más fuerte adquirida durante la deposición de los sedimentos, crea muchos problemas para la orientación de núcleos ya que sería necesario conocer la edad del sedimento, el rumbo y buzamiento de la estratificación y la trayectoria histórica del polo magnético.

Los magnetismos remanentes viscosos y térmicos adquiridos en el campo geomagnético actual (segundo caso) son particularmente útiles dado que no hay ambigüedades de dirección y polaridad. Estas componentes deben prevalecer progresivamente al aumentar la profundidad, y por ende la temperatura. La magnetización remanente viscosa” (MRV). Aunque tenga una señal más débil, deja impresa el norte geográfico actual en partículas de magnetita (Fe_3O_4), con tamaño de grano mayores a 10 micrones. Estas partículas adquieren una orientación magnética formando polos en cada extremo de ellas (dipolos). La magnetita con este tamaño de granos se encuentra presente en casi todas las rocas incluyendo carbonatos. Las partículas de magnetita con señal MRV representan el promedio de nortes geográficos actuales durante los últimos 10.000 a 100.000 años (dipolo de campo presente). La MRV de campo presente es muy sensible a la temperatura y por lo tanto adquiere una señal más fuerte con altas temperaturas. La orientación de núcleos geológicos produce mejores resultados mientras el pozo sea más profundo por que este posee mayor temperatura. Esto también implica que una vez en la superficie a temperatura ambiente, teóricamente el núcleo puede retener la señal MRV de campo presente por miles de años.

Finalmente el tercer tipo de magnetismo, adquirido a lo largo de la línea de perforación, es indeseable por artificial y debe evitarse, especialmente, en perforaciones verticales donde no aporta ninguna información y obscurece la identificación de las componentes útiles.

4.13.2.- PROCEDIMIENTOS DE CAMPO

El primer paso en la orientación de núcleos geológicos es marcar una “línea de orientación maestra” (LOM) a lo largo del núcleo, en el sitio donde se está tomando el mismo (preferiblemente) o una vez que llegue al sitio de almacenaje (figura 4.9). La LOM tiene que ser derecha y debe ser marcada en cada uno de los segmentos enteros del núcleo. Esta tarea es difícil ya que en muchos casos hay que reconstruir y armar pedazos del núcleo antes de dibujar la LOM.

En las instalaciones de la compañía de análisis de núcleo o nucleoteca de la compañía petrolera se procede a tomar varias pequeñas muestras llamadas tapones, que serán aquellas a ser analizadas por técnicas paleomagnéticas en el laboratorio. Para la toma de tapones se necesitan técnicas y equipos especializados para no introducir campos

magnéticos adicionales que dañen la señal magnética de interés. En el campo, la orientación de los tapones paleomagnéticos y otras características geológicas son tomadas en relación a la LOM.

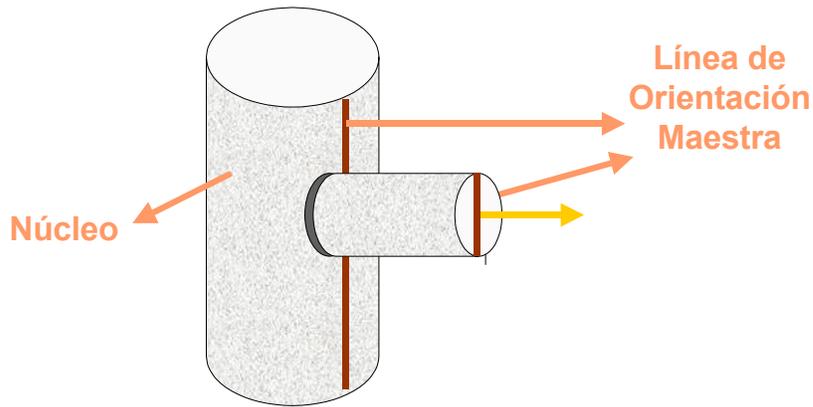


Figura 4.9
Línea de orientación maestra

4.13.3.- PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

Una vez que los tapones se encuentran en el laboratorio paleomagnético, se obtienen muestras y se utiliza una técnica llamada desmagnetización termal progresiva para identificar y separar los componentes múltiples de magnetización que puedan estar residentes en cada muestra. Inicialmente se tomarán una cierta cantidad de muestras y se utilizarán como patrón. Se procederá a realizar las desmagnetizaciones variando muy lentamente la temperatura y obtener un comportamiento coherente para el tipo de roca en estudio. Posteriormente se elegirá un mínimo número de desmagnetizaciones que garantice un resultado confiable.

La técnica consiste en medir inicialmente la magnetización remanente natural (MRN) de la muestra y luego someterla al número de desmagnetizaciones obtenida en las muestras patrón. Este proceso puede variar a temperaturas entre 100 y 300 grados centígrados. La magnetización remanente es medida al final de cada etapa por un sensible magnetómetro computarizado que se encuentra en un cuarto aislado magnéticamente. Los datos producidos por las desmagnetizaciones térmicas son analizados usando técnicas

especializadas para aislar la señal MRV del campo presente que indica el norte geográfico actual.

Para cada tipo de roca, de acuerdo a su composición, es conocido el rango de oscilación de sus valores de intensidad de campo magnético, lo cual permite conocer si la muestra pudo haber sido alterada por un campo magnético que pueda afectar las mediciones

4.13.4.- TIPOS DE NÚCLEOS

La orientación de núcleos por paleomagnetismo puede ser utilizada en núcleos nuevos así como también en núcleos existentes, siempre y cuando no hayan sido dañados magnéticamente. La utilidad de esta técnica puede ser fácilmente determinada ya que el daño causado por campos magnéticos es detectable en el laboratorio.

Esta técnica también puede ser utilizada en núcleos enteros o aquellos que hayan sido cortados para análisis sedimentológicos. El hecho que núcleos existentes tomados en el pasado puedan ser analizados, representa una gran cantidad de información adicional que pudiera estar a la disposición de geólogos e ingenieros de petróleo. Esta información adicional se obtiene a muy bajo costo y en poco tiempo ya que no se necesita esperar para perforar un pozo y se ahorra el gasto de la toma del núcleo orientado. Existen varias zonas de interés para la industria petrolera donde se encuentran numerosos núcleos tomados en el pasado y los cuales pudieran ser utilizados a muy bajo costo.

4.13.5.- APLICACIONES EN EXPLORACIÓN

Los núcleos orientados son muy valiosos para la exploración petrolera ya que permiten determinar direcciones en estructuras geológicas de interés (por ejemplo fracturas naturales e inducidas). Esta información puede también ser obtenida por registros eléctricos de formación pero solamente en pozos nuevos.

La técnica de paleomagnetismo permitiría hacerlo en núcleos existentes tomados en el pasado.

El paleomagnetismo también sirve para conocer la dirección de transporte de sedimentos y la dirección de máxima porosidad y permeabilidad.

4.13.6.- APLICACIONES EN PRODUCCIÓN

La orientación de núcleos puede ser utilizada para la determinación de direcciones de fracturas naturales. Esto va a ser fundamental en yacimientos fracturados de rocas con baja permeabilidad, donde la producción ocurre por los sistemas de fracturas naturales. Núcleos orientados usados en conjunto con análisis geomecánicos de laboratorio, también pueden ser utilizados para la determinación de las direcciones de esfuerzos en sitio, lo cual es fundamental para determinar la dirección óptima de pozos desviados y horizontales.

La dirección de los esfuerzos va a jugar un papel importante en la estimulación de pozos por fracturamiento hidráulico, ya que la dirección de la fractura inducida está determinada por el campo de esfuerzos.

4.13.8.- VENTAJAS DEL PALEOMAGNETISMO SOBRE MÉTODOS CONVENCIONALES

La orientación de núcleos por paleomagnetismo tiene grandes ventajas sobre los métodos tradicionales mecánicos por las siguientes razones:

- Menor costo por no requerir tiempo adicional del taladro.
- Menor costo por no requerir equipo especializado de pozo como cámaras, rollos, etc.
- Menor costo por requerir menos personal especializado en el taladro.
- Puede ser utilizado en núcleos existentes tomados hace muchos años.
- No se necesita ensamblar equipo especializado de pozo antes de bajar al hoyo.
- Al no utilizar “cuchillas marca núcleos” no existe el error por corrimiento.
- Disminuye errores sistemáticos por no tener un complicado sistema mecánico.
- Capacidad de detectar errores si las muestras han sido dañadas magnéticamente.
- No hay limitaciones de alta temperatura ya que no se necesitan rollos fotográficos.
- Se puede orientar solamente las zonas de interés identofocadas en superficie.

CAPÍTULO V: REVESTIMIENTOS

5.1.- DEFINICIÓN

Es una tubería que se utiliza para recubrir el hoyo, con el propósito principal de proteger las paredes del pozo.

Según su ubicación y función en el hoyo, pueden clasificarse en: revestimiento conductor, de superficie, intermedio y de producción.

5.2.- CLASIFICACIÓN

5.2.1.- REVESTIMIENTO CONDUCTOR

Incluye la primera tubería de revestimiento. El hoyo para el tubo conductor puede perforarse y después ser entubado, sin embargo, generalmente es hincado (terrenos pantanosos o mar afuera). Este tipo de revestidor comúnmente es de 16 a 48 pulgadas de diámetro externo y se coloca generalmente hasta 300 pies. [8]

Su función principal es reducir al mínimo la pérdida de circulación a poca profundidad, además protege las restantes sartas de corrosión.

5.2.2.- REVESTIMIENTO DE SUPERFICIE

Es el punto de partida para el cabezal del pozo. La profundidad de asentamiento de este tipo de sarta puede ser solamente de 200 pies, pero comúnmente alcanzan los varios miles de pies, dependiendo de las condiciones locales encontradas. El diámetro del revestidor de superficie debe ser menor que el conductor. [8]

Puede ser utilizado para evitar derrumbes de las formaciones no consolidadas y débiles que están cerca de la superficie y proteger de la contaminación las arenas de agua dulce. También protege de la corrosión a cualquier sarta de revestimiento subsecuente que se baja en el pozo. En el caso de que ocurra una arremetida, el revestidor superficial generalmente permite contener el flujo en el pozo cuando se cierran los impíderreventones. [8]

5.2.3.- REVESTIMIENTO INTERMEDIO

El propósito primario de un revestidor intermedio está en proteger el hoyo. Es por lo general, empleado para cubrir las zonas débiles donde un peso inadecuado del lodo puede ocasionar pérdida de circulación. Aislar las zonas de presiones anormales y subnormales para perforar posteriormente intervalos profundos con un peso de lodo óptimo. Este revestimiento permite la utilización de grandes pesos de lodo sin amenazar las formaciones someras. Controla las zonas de sal y las lutitas desmoronables de fácil desprendimiento. Puede ser colocado a 5000 pies o más de profundidad, el número de sartas dependerá de la profundidad total del pozo, de los problemas que pueden irse presentando al momento de perforar el hoyo y de las condiciones geológicas del área. [8]

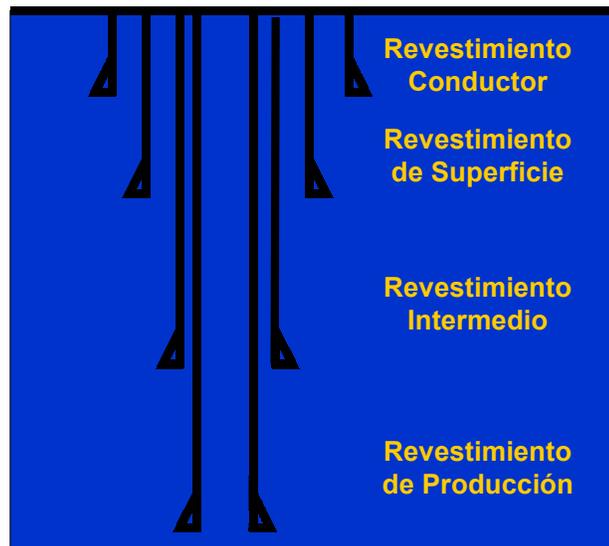


Figura 5.1

Diagrama mecánico de revestimientos

5.2.4.- REVESTIMIENTO DE PRODUCCIÓN

La colocación de este revestimiento es uno de los objetivos principales en la perforación de un pozo de petróleo o gas. Es la última sarta que va en el hoyo para los efectos de las operaciones de perforación, frecuentemente la más larga y pesada. La sarta de producción en algunos casos soportará las presiones máximas del pozo (estimulación y fractura) y las presiones altas, si existen, de las formaciones productoras. Debe ser la sarta de mejor calidad dentro del hoyo debido a las condiciones que involucra. Sirve de

protector para la tubería de producción y de cualquier otro equipo usado en el pozo. Debe cementarse cuidadosamente para evitar la comunicación de la formaciones productoras con las arenas o formaciones superiores. Esta sarta aísla el yacimiento de los fluidos indeseables en la formación productora y desde otras zonas penetradas por el pozo. [8]

5.3.- PROCEDIMIENTO GENERAL DE DISEÑO

Han surgido muchas filosofías para el diseño de revestimientos. En la mayoría de los casos, están basadas en la experiencia de cada ingeniero. Debido a esto, se ha optado por la creación de procedimientos que toman medidas para la prevención de problemas tales como la ruptura, colapso o corrosión. Anterior al diseño de revestimientos es recomendable un análisis de las condiciones de operación esperadas. [8]

Para diseñar la sarta de revestidores de un pozo hay que conocer una serie de datos, tales como la presión de poro y de fractura hasta la profundidad final, la distribución de temperaturas, presencia de agentes corrosivos y el método de levantamiento artificial si es que existe, con la finalidad de establecer el propósito del mismo. Esto dará una idea parcial del riesgo envuelto y las bases sobre las cuales, se deben predecir los requerimientos del diseño. [8]

Otro factor a considerar, es el tipo de pozo que se desea perforar, debido a que las condiciones de diseño en un pozo de desarrollo son disímiles a los de un pozo exploratorio. [8]

Las tuberías de revestimiento son diseñadas usualmente para las condiciones siguientes:

- Estallido
- Colapso
- Tension
- Efectos biaxiales

La terminación ideal es aquella que se logra con el menor costo posible (tomando el costo inicial y los operacionales) y que satisface las demandas del mismo programa para la mayoría del tiempo de duración del pozo. Para diseñar inteligentemente la terminación de un pozo, se deben hacer estimaciones razonables de las características productivas

durante la vida del pozo. Se deben tomar en cuenta y evaluar tanto al yacimiento como a los aspectos mecánicos involucrados. [8]

5.4.- POZOS DE DESARROLLO Y DE AVANZADA

En estos pozos, normalmente existe suficiente historia de perforación y producción que permiten la determinación exacta de las condiciones de operaciones venideras. La información de los pozos vecinos (presión de poros, presión de fractura), permiten realizar predicciones exactas de las condiciones futuras de perforación y producción. Los datos provenientes de los pozos vecinos deben eliminar las hipótesis bajo las cuales se diseñaron las sartas de los pozos exploratorios. Sin embargo, es necesario analizar en estas áreas que la producción e inyección no han alterado las presiones de la de la formación, de tal forma que obliguen a cambiar las densidades del lodo o el número de sartas requeridas. [8]

5.5.- POZOS EXPLORATORIOS

En estas áreas, no se dispone de datos sobre la historia de perforación y producción, por esta razón las presiones de poro y fractura, los datos de temperatura, etc, son más difíciles de determinar. Debido a esta incertidumbre, las condiciones estimadas para el diseño son más severas, que las encontradas realmente. [8]

5.6.- PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACERO

5.6.1.- ESFUERZO EN EL PUNTO CEDENTE

La prueba de tensión permite obtener información sobre la resistencia de los materiales usados. En esta prueba se somete una sección del material de tamaño convencional a un aumento gradual de la carga. Para cargas relativamente bajas de elongación del material es linealmente proporcional y a la carga aplicada. En este caso, no ocurren deformaciones permanentes del material y se dice que esto sucede en el “rango elástico” de la curva: carga en función de elongación. A medida que la carga continúa aumentando, se llega a un punto en la mencionada curva donde se obtiene elongación sin aumento de la carga. Este punto se conoce con el nombre de punto cedente. [8]

Al dividir la carga correspondiente al punto cedente entre el área transversal de la sección sometida a la prueba, se obtiene el esfuerzo cedente. Aumentos de cargas, a partir del punto cedente, ocasionan deformaciones permanentes del material (rango plástico) hasta que físicamente la sección de prueba se rompe. El esfuerzo en el punto de rotura se denomina el esfuerzo final de tensión. En el diseño de una sarta de tubería, el valor numérico de los esfuerzos en tuberías se debe usar con discreción. Esto se debe a que dichos esfuerzos se determinan suponiendo sólo cargas axiales, mientras que, en la realidad, las tuberías están sometidas a esfuerzos multidireccionales. [8]

5.6.2.- DUCTILIDAD

Se define como la propiedad que poseen algunos materiales de deformarse en el rango plástico, sin fracturarse. Por lo tanto, un material con una ductilidad alta se deforma apreciablemente antes de quebrarse. La ductilidad se expresa como un porcentaje de elongación con respecto a una sección patrón y usando especificación API para cada grupo de tubería. [8]

5.6.3.- DUREZA

Cuando el material falla, se dice que experimenta una fractura dúctil o una fractura quebradiza. Una fractura dúctil ocurre con una deformación plástica antes y durante la propagación de la fractura. En cambio, una fractura quebradiza ocurre con muy poca elongación y con una mayor rapidez que la fractura dúctil. La dureza se refiere a la propiedad que posee un material para resistir a la formación de una fractura quebradiza. La dureza o resistencia al impacto se mide mediante la prueba del “Impacto de Charpy”. Esta consiste en golpear y fracturar una sección de prueba con el péndulo en movimiento. [8]

5.7.- SENSIBILIDADES DE LA TUBERÍA DE ALTA RESISTENCIA

La tubería de alta resistencia puede fallar, fundamentalmente, debido a las razones siguientes:

- Defectos originales en su fabricación
- Daños ocasionados durante su transporte, manejo y bajada al pozo
- Debilitamiento causado por la presencia de hidrógeno en el pozo

Cualquier avería o ranura parcial en la superficie de un material representa a un punto potencial para la concentración de esfuerzos. Esto origina una tendencia a extender la avería o ranura más profundamente. Este proceso se puede imaginar físicamente como algo parecido al efecto ocasionado cuando se introduce una cuña en un material. Los materiales de baja resistencia son generalmente blandos y dúctiles. Por esta razón, la concentración de esfuerzos se desempeña parcialmente mediante la plasticidad del elemento. En cambio, en materiales de alta resistencia, los esfuerzos no se disipan, por lo tanto fallan con mayor rapidez al ser sometidos a esfuerzos. [8]

Cuando existe un cierto grado de humedad sólo se necesitan trazos de H_2S para que se produzca debilitamiento de la tubería por presencia de hidrógeno. Este proceso de debilitamiento se denomina comúnmente fractura por corrosión sulfurosa. Hasta el presente no se conoce de una manera exacta cómo se efectúa el proceso; sin embargo, se sabe que la corrosión es causada por la absorción de átomos de hidrógeno en la estructura atómica de la tubería. Los átomos de hidrógeno son de menor tamaño que la mencionada estructura, por lo tanto, se mueven dentro del acero. Este paso se puede interpretar de una forma similar a la manera como gránulos de arena fina se cuelan a través de un empaque con grava. [8]

Cuando dos átomos de hidrógeno se encuentran dentro de la estructura del acero, se combinan y forman una molécula de hidrógeno. Esto hace que el volumen de la estructura del acero aumente, lo cual origina esfuerzos internos. La estructura de un acero dúctil se puede agrietar a consecuencia de estos esfuerzos internos. [8]

El acero de gran ductilidad, pero de baja resistencia, puede disipar el efecto del aumento de esfuerzos sin fallar. Por esta razón, cuando existe un ambiente con presencia de H_2S , los aceros de gran ductilidad y de baja resistencia son los más indicados. [8]

5.8.- CONSIDERACIONES MECÁNICAS

La configuración mecánica o “el sistema de conexión del pozo” es, a menudo, la clave para ser capaz de agotar efectivamente el yacimiento, monitorear el rendimiento hoyo abajo y modificar la situación del pozo cuando sea necesario. Esta configuración

mecánica también es decisiva para decidir qué se debe hacer en el pozo para controlar el flujo de los fluidos del yacimiento, petróleo, gas y agua. [8]

Mecánicamente, un diseño de terminación de un pozo es un problema complejo de ingeniería. La filosofía es diseñar tanto las condiciones específicas del pozo, como las del campo y las área. En resumen las consideraciones mecánicas básicas que se deben tener presentes en el diseño de la terminación de un pozo son:

- a.- el método de terminación
- b.- el número de terminaciones dentro del hoyo perforado
- c.- la configuración de la tubería de revestimiento
- d.- el diámetro del conducto de producción
- e.- el intervalo de las terminaciones

5.9.- DEFORMACIÓN DEL REVESTIMIENTO PRODUCTO DEL PROCESO DE CAÑONEO

Las enormes presiones producidas por la detonación de las cargas huecas (hasta 4 millones de Lpc) puede dar la errónea idea que el revestimiento pudiera ser destruido cada vez que es perforado por el cañón. [1]

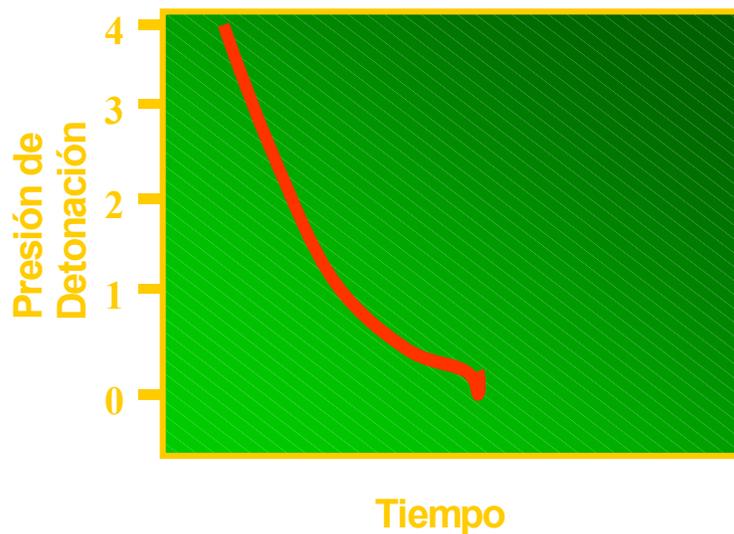


Figura 5.2

Gráfica Presión de Detonación vs Tiempo

Afortunadamente, la reacción explosiva genera una presión que alcanza su valor máximo solamente por un corto tiempo y después decrece rápidamente, como se observa en la figura 5.2, de manera que la presión de la detonación ha decaído en gran manera antes de hacer impacto con el revestimiento. [15]

El daño o deformación o deformación del revestimiento dependerá:

- tipo de arma empleada
- condiciones del pozo

Los cañones recuperables no producen daño en el revestimiento ya que el tubo que protege las cargas absorben parte de la energía. El daño o deformación puede ser producido por los cañones del tipo no recuperable. El daño producido por los cañones recuperables puede observarse en la figura 5.3.

La magnitud del daño variará en función de las siguientes variables:

- cantidad de carga explosiva
- presión hidrostática del pozo
- espesor del revestimiento
- resistencia del revestimiento
- soporte del revestimiento o “back - up”

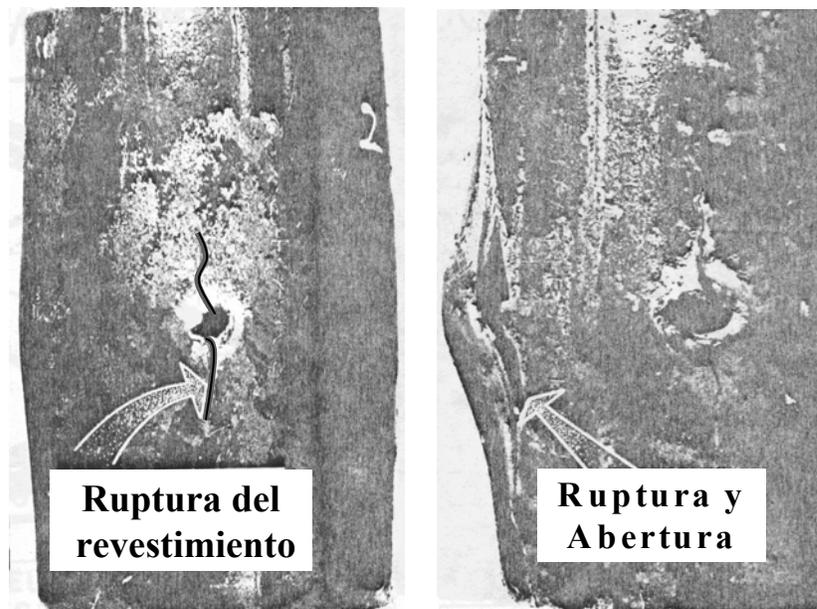


Figura 5.3

Daño al revestimiento producido durante el proceso de cañoneo

En los casos en los que el revestimiento ha sido perforado de forma eficiente, es decir, la perforación no ha producido una ruptura adicional al revestimiento, solo se observa el orificio causado por el jet de perforación (figura 5.4) el revestimiento experimenta una reducción en su resistencia, esta disminución puede llegar a ser crítica en caso de producirse daño adicional y en condiciones de alta densidad de disparo.

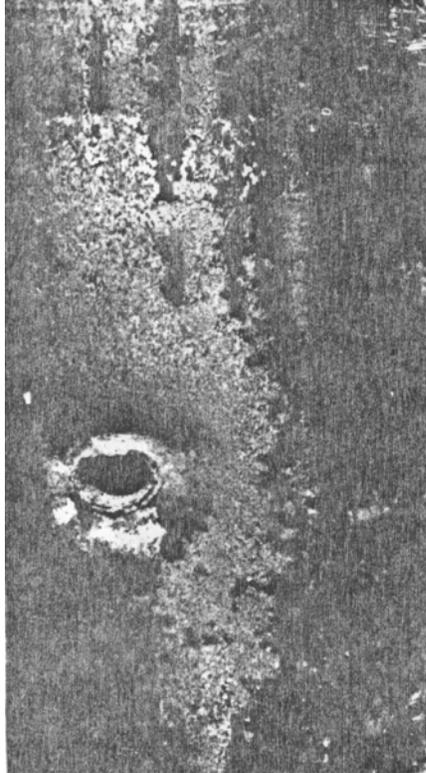


Figura 5.4

Orificio causado por el jet de perforación sin daño adicional al revestimiento

CAPÍTULO VI: DESARROLLO CONCEPTUAL Y PROPUESTA PARA MODELAR Y ANALIZAR POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EL CAÑONEO DE UN POZO.

6.1.- INTRODUCCIÓN

El método de elemento finito es un procedimiento basado en el computador que puede ser usado para analizar estructuras y medios continuos. Es un método numérico muy versátil que es ampliamente utilizado en la resolución de problemas aplicados a análisis de ingeniería. Las aplicaciones van desde el análisis por deformación y esfuerzo de automóviles, aeronaves, edificios y estructuras de puentes hasta el análisis de los campos de flujo de calor, de fluidos, magnético, filtraciones y otros problemas de flujo. Avances en los programas de computadora han hecho mucho más fácil y eficiente el uso del elemento finito para la solución de problemas complejos de ingeniería en computadores personales. [9]

Si el objetivo de la ingeniería es desarrollar un código de elemento finito; entonces, el entendimiento de la teoría de elemento finito es esencial. Por otro lado, si el objetivo del usuario, es el uso de un código de elemento finito; entonces, es necesario para su ejecución:

- ❖ entendimiento rudimentario de los conceptos fundamentales del método de elemento finito, y
- ❖ entrenamiento (incluyendo las capacidades y limitaciones) del programa de computadora que será usado.

6.2.- ANTECEDENTES

Aunque el nombre del método de elementos finitos se ha dado en los últimos años, el concepto ha sido usado desde hace varios siglos. Por ejemplo, los matemáticos encontraron la circunferencia de un círculo mediante la aproximación de un polígono. Para este caso (figura 6.1), cada lado del polígono puede ser llamado un elemento finito.

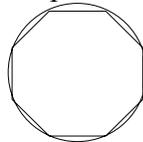


Figura 6.1

Aproximación del área de un círculo utilizando un polígono de ocho lados

En la figura 6.1 puede observarse que a medida que incrementamos el número de lados del polígono (elementos finitos) el valor aproximado de su área convergerá al valor verdadero.

Generalmente se reconoce que el método de elementos finitos fué introducido por Turner, Clough, Martín y Topp, quienes en 1956 presentaron un trabajo en el cual se ocupaban de la solución aproximada de problemas de estado plano de tensiones, relacionados con procesos de análisis estructural de la industria aeronáutica. El esquema presentado seguía lo que podemos llamar enfoque físico de elementos finitos. [21]

La idea fundamental consistía en extender los métodos de análisis matricial de estructuras de barras, para permitir el tratamiento de problemas continuos, bi y tridimensionales. [21]

El primer libro sobre elementos finitos por Zienkiewicz y Chung fue publicado en 1967. A finales de la década de 1960 y principios de la siguiente, el análisis por elemento finito se aplicó a problemas no lineales y de grandes deformaciones. El libro de Oden sobre continuos no lineales apareció en 1972. [21]

Las bases matemáticas se fijaron en la década de 1970. Nuevo desarrollo de elementos, estudios de convergencia y otras áreas afines pertenecen a esta categoría. [9]

6.3.- DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

El cálculo de deformaciones, tensiones y esfuerzos con los métodos clásicos de análisis es realizado por medio de las ecuaciones y condiciones de borde que describen el problema. El uso de métodos clásicos debe considerarse prohibido cuando los sistemas físicos son complejos. En tales casos, la mejor alternativa es usualmente una solución obtenida con el método de elemento finito.[12]

Las diferencias primarias entre el método clásico y el de elementos finitos radica en la forma en que ellos observan la estructura y el procedimiento para la solución resultante. Los métodos clásicos consideran la estructura como un medio continuo, cuyo comportamiento es gobernado por ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales. El método de elemento finito considera la estructura como la discretización del continuo. El comportamiento de estos elementos discretos, y de la estructura en general, es obtenida por

la formulación de un sistema de ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas por un computador. Los elementos discretos son llamadas elementos finitos. Los puntos donde los elementos finitos son interconectados por funciones de interpolación, son conocidos como nodos o puntos nodales. La subdivisión del continuo en subregiones es la que se denomina malla de elementos finitos, y es la que posibilita los cálculos y su programación. [2]

El objetivo del método es determinar la respuesta de un sistema modelado con elementos finitos y sujeto a unas cargas dadas. Durante la aplicación de elementos finitos para la resolución de un problema, debemos tener como objetivo la realización de un modelo, el cual debe ser la aproximación de un sistema físico real. Cuando el problema requiere de una formulación analítica difícil de desarrollar, para solucionarlo los métodos numéricos en general han demostrado ser más factibles para atacar este tipo de problemas y entre los numerosos métodos numéricos, se destaca el de elementos finitos. [2]

El procedimiento para el análisis de elemento finito abarca siete pasos. Los pasos 1,3,4 y 6 requiere decisiones hechas por el usuario, en donde se requiere la capacidad del ingeniero para la selección de un modelo que cumpla con dos requisitos:

- ❖ ser lo más sencillo posible, y
- ❖ reflejar de la manera más precisa posible el problema real

El equilibrio entre estos dos puntos arroja el modelo ideal de simulación.

El procedimiento utilizado para la construcción del modelo, definición de las condiciones de borde, aplicación de cargas y la resolución de sistemas matriciales puede simplificarse en los siguientes pasos: [2]

Paso 1: Modelar, discretizar y definir el tipo de y propiedades del elemento

Debe construirse la geometría de nuestro modelo a estudiar, esta estructura es dividida en elementos finitos. Preprocesadores permiten al usuario crear la malla sólido. Debe definirse módulo de Young, coeficiente de Poisson y el tipo de material. Este es uno de los pasos más cruciales en la determinación de la solución aproximada del problema.

Paso 2: Ensamblaje de las matrices de esfuerzos del elemento

Este paso es llevado a cabo por el computador, quien se encarga de relacionar los desplazamientos nodales con las fuerzas aplicadas a los nodos.

Paso 3: Aplicación de cargas

Es posible definir fuerzas uniformes, concentradas, presiones, momentos.

Paso 4: Definir condiciones de borde

Deberán definirse los grados de libertad de cada uno de los nodos. Este paso permitirá acoplar el modelo definido al caso en estudio y debe ser estudiado cuidadosamente

Paso 5: Resolución del sistema de ecuaciones y cálculo de los resultados

Paso 6: Interpretación y análisis

6.4.- FUNDAMENTOS DE LA SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

Antes de realizar la malla con elementos finitos, es necesario realizar un bosquejo del sistema físico, indicando geometría, condiciones de borde, cargas y discontinuidades de la geometría en forma general. Es imprescindible que el bosquejo también incluya las dimensiones del sistema. [13]

Como siguiente paso, se debería estudiar si el modelo puede ser simplificado, en el sentido de aplicar simetrías y/o reducir de tres dimensiones (3D) a dos dimensiones (2D), lo que simplificaría en gran magnitud el problema. [13]

6.5.- PRINCIPIOS DE MODELAJE

Crear el modelo adecuado es el aspecto de mayor importancia en un análisis en elementos finitos. La meta es desarrollar una muestra que proporcione suficientes elementos para obtener resultados exactos sin necesidad de malgastar interpretación de la data y tiempo de procesamiento. [2]

El modelaje debiera siempre estar basado en el entendimiento conceptual del sistema físico y un conocimiento del comportamiento anticipado de la estructura. Aparte del entendimiento del comportamiento del sistema, el analista debiera hacer el esfuerzo por comprender los conceptos fundamentales de la teoría de elemento finito. [2]

Para el modelaje de un sistema se recomienda tomar los siguientes principios como una base para desarrollar modelos factibles y óptimos. Cabe destacar que estos modelos no son aplicables para el 100% de los casos. Los principios no pueden substituir el uso experto y juicio del ingeniero. [2]

6.8.- EJEMPLOS CONCEPTUALES DE APLICACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EL CAÑONEO DE UN POZO

Ciertos problemas pueden ser desarrollados por más de un tipo de análisis. Por ejemplo, un cilindro sometido a una presión interna, mostrado en la figura 6.2, puede ser analizado en, al menos, tres formas diferentes: [14]

- ❖ un problema de un plano de esfuerzo
- ❖ un problema de axisimetría
- ❖ una estructura en tres dimensiones

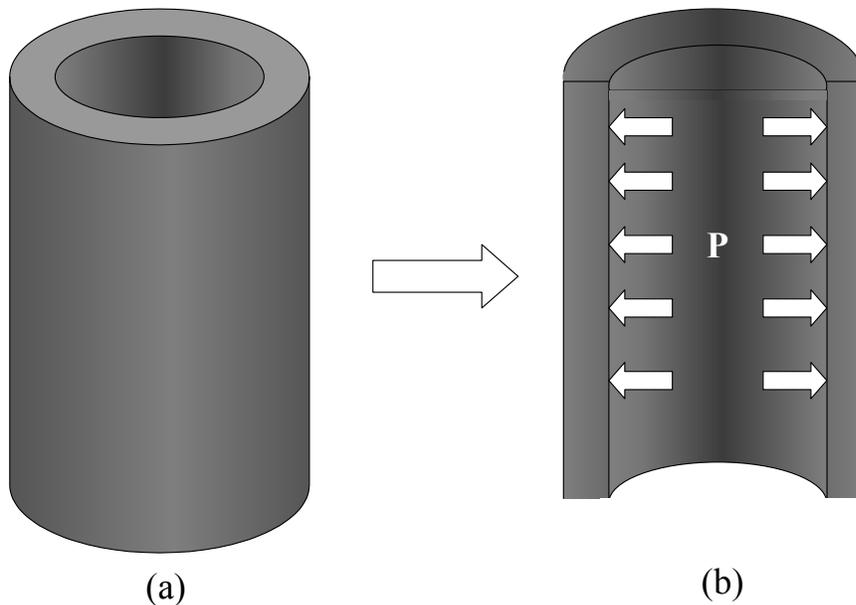


Figura 6.2

Cilindro sometido a una presión P

6.8.1.- UN PROBLEMA DE UN PLANO DE ESFUERZO

En este caso la geometría del modelo consiste de la sección circular obtenida por intersección del cilindro con el plano YZ (figura 6.3). Mediante el uso de un plano de

esfuerzo, nosotros obtenemos resultados que son válidos para cualquier sección del cilindro.

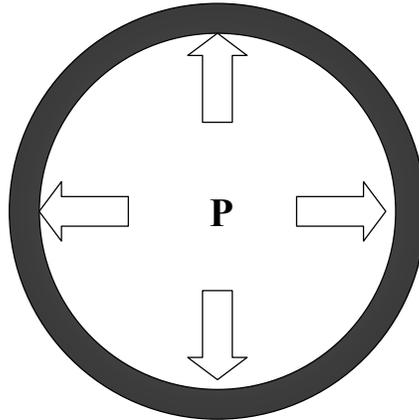


Figura 6.3

Modelo de una sección de un cilindro sometido a una presión P

6.8.2.- UN PROBLEMA DE AXISIMETRÍA

El modelo usando elementos axisimétricos es mostrado en la figura 6.4. En este modelo todos los nodos sobre los lados AB y CD están restringidos, y la presión P es aplicada sobre el lado AC. La deformación y los esfuerzos obtenidos del análisis del modelo axisimétrico son válidos para toda la estructura. La utilización del modelo de axisimetría requiere que las cargas sean también axisimétricas.

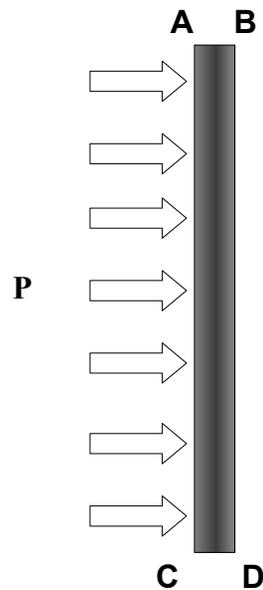


Figura 6.4

Modelo de axisimetría de un cilindro sometido a una presión P

6.8.3.- UNA ESTRUCTURA EN TRES DIMENSIONES

El cilindro es modelado según la figura 6.2. Este es el modelo más elaborado y el menos eficiente, es aplicable cuando la carga no es axisimétrica.

6.9.- MODELO DE UN REVESTIMIENTO CAÑONEADO

Debido a las irregularidades geométricas que debe presentar el modelo (los orificios producidos por el jet de perforación), solo es posible utilizar un modelo tridimensional, con una malla más refinada a nivel de las perforaciones. Es imprescindible refinar la malla en las zonas cercanas a las perforaciones, ya que será nuestro punto crítico de estudio.

Cuando el revestimiento es bajado al hoyo, el acero se elonga en una magnitud que será proporcional a la densidad del lodo y al peso del acero. Una vez que el revestimiento alcanza la profundidad de asentamiento, se procede a la operación de cementación. Hay dos hechos importantes a considerar para la definición de los grados de libertad: la elongación inicial y el asentamiento con el cemento. El modelo real debe permitir inicialmente una elongación del acero, pero en el momento en que es cañoneado debe tener la restricción de movimiento también en la dirección vertical.

De esta manera nos vemos en la necesidad de calcular de qué manera influye la elongación del revestimiento en su resistencia a las diversas cargas a las cuales es sometido. Este cálculo puede realizarse para el revestimiento sin cañonear, de manera de simplificar el proceso. Este valor nos servirá como un factor de corrección, y acercar nuestro modelo aproximado a nuestro modelo real.

Los nodos presentes en el modelo se dividirán en dos grupos al momento de definir los grados de libertad. Los nodos de la parte superior del modelo deberán empotrarse, lo que simulará la unión de los revestimientos con el cabezal del pozo. Los nodos restantes tendrán la libertad de movimiento en la dirección “z” (para pozos verticales).

El límite de resistencia del acero que se utilizará en la simulación estará definido por el punto de fluencia del material.

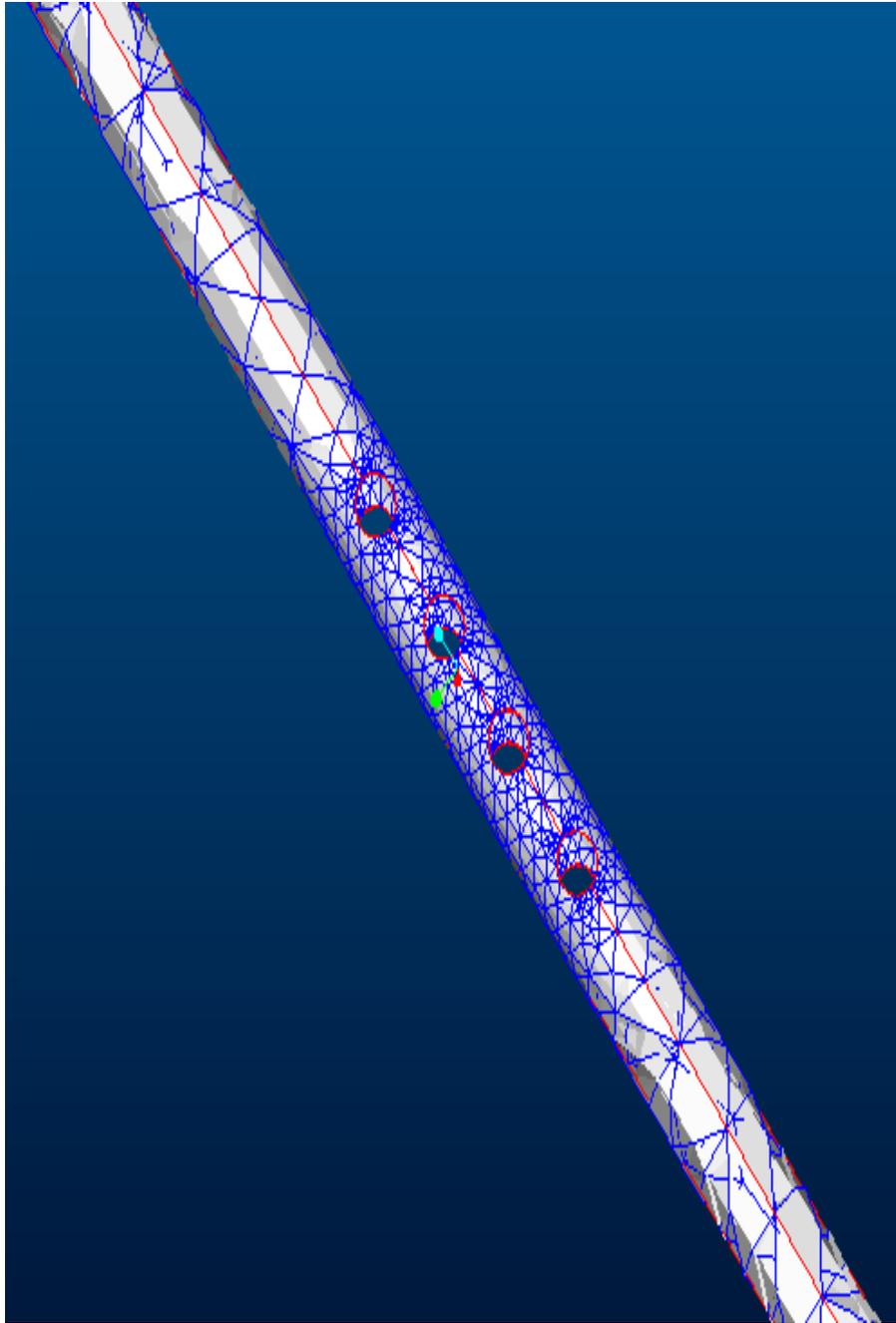


Figura 6.5
Modelo tridimensional de un revestimiento cañoneado

Como ya se ha dicho, debido a las discontinuidades geométricas solo es posible realizar un modelo tridimensional para el caso en estudio. Posterior a la definición de las propiedades del material, del elemento, y anterior a las cargas aplicadas y los grados de

libertad de los nodos, debe definirse la malla, la cual puede observarse en la figura 6.5 de color azul.

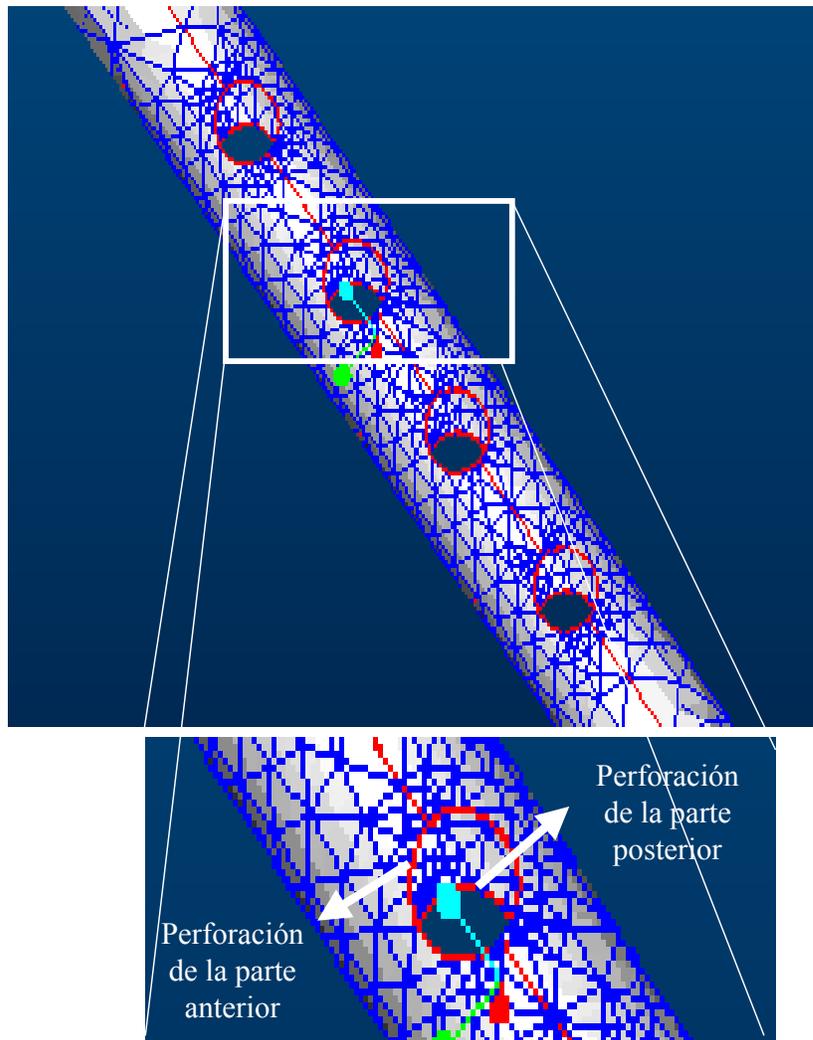


Figura 6.6
Mallado más refinado a nivel de las perforaciones

De color rojo puede observarse el límite de las perforaciones, la cual nos define una circunferencia, y en color azul el mallado del elemento, puede observarse que a nivel de las perforaciones la malla es mucho más refinada debido a que es nuestro punto crítico de menor resistencia y es objeto de un estudio más detallado.

Posterior a la definición de la malla y los grados de libertad de los nodos, se procede a la corrida del modelo y el post procesamiento de datos, el cual puede realizarse

gráficamente, a continuación, en la figura 6.7 puede observarse un pieza de acero el cual es sometido a un gradiente de presión en las secciones laterales, puede verse la distribución de esfuerzos, en colores a lo largo del modelo. La escala a la izquierda se encuentra en megapascal.

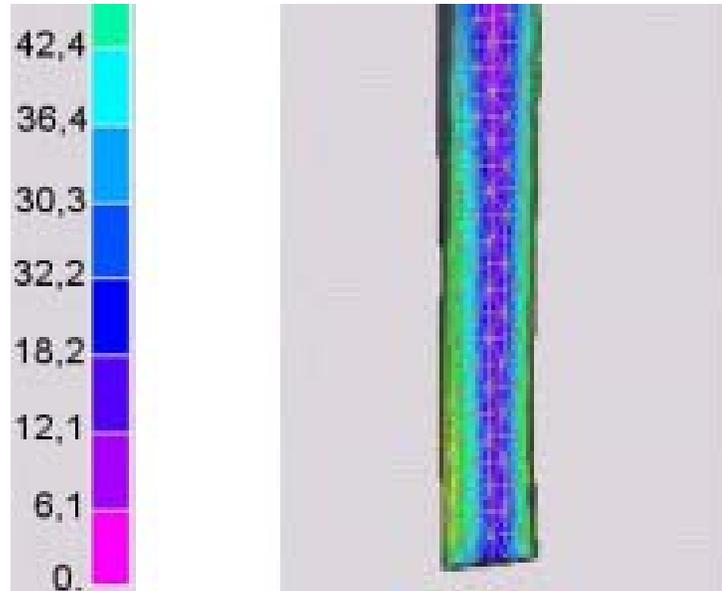


Figura 6.7

Corrida utilizando el modelo de elementos finitos

6.10.- RECOMENDACIONES GENERALES

- ❖ Definir los nodos en puntos de carga, puntos que presenten discontinuidades en la geometría, y en aquellas regiones donde se requiere una mayor información sobre los esfuerzos o desplazamientos.
- ❖ La no uniformidad en un mallado es frecuentemente requerida para obtener resultados precisos en regiones que presenten cambios abruptos en la geometría o en las cargas.
- ❖ Cuando sean usado elementos laminares para modelar superficies curvas, mantener un ángulo menor a 10 grados.
- ❖ Se sugiere mantener una relación de aspecto no mayor a 5, definida como el cociente entre la dimensión mayor y la dimensión menor.

- ❖ Cambios abruptos en el tamaño de los elementos debe ser evitado, pero cuando sea necesario el uso de elementos de diferentes tamaños, deben modelarse las partes transicionales del diseño con cambios en las dimensiones de los elementos adyacentes en un factor menor de 2.

CAPITULO VII EL PROBLEMA

7.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante la producción de pozos, frecuentemente nos vemos en la necesidad de reparaciones prematuras debido a una deficiente comunicación hidráulica entre la formación y la tubería de producción. Esto puede producir problemas de arenamiento y reducir el recobro de hidrocarburos de la arena productora

La función del ingeniero de petróleo es determinar los parámetros involucrados en el proceso de cañoneo de manera que, permita optimizar la productividad del yacimiento y alargar la vida útil del pozo.

Será necesario estudiar las variables responsables de la migración de finos hacia el pozo y las causas de la reducción de permeabilidad en las zonas cercanas al túnel de perforación. La migración de finos obstruirá los canales porosos dificultando el flujo y reduciendo la productividad. Esto ha llevado a reparaciones en el pozo, muchas veces de forma prematura.

Es necesario conocer todas los factores involucrados en la formación de daño en el yacimiento para poder realizar el diseño del proceso de cañoneo en forma óptima.

Debido a los disparos a los cuales está sometidos el revestimiento, se define un daño sobre el acero que puede resultar en falla del material y posterior ruptura. Es necesario cuantificar y tipificar daño producido al revestimiento en forma conceptual y plantear modelos que puedan llevar a reducir las condiciones de riesgo lo cual se reflejará en reducción de costos durante la explotación del pozo.

7.2.- JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE

Se piensa analizar los fundamentos teóricos que permitan determinar la densidad de disparo, fase de cañoneo y técnica de cañoneo a utilizar para reducir el daño a la formación, lo cual permitirá optimizar la vida productiva de un yacimiento a un menor costo; para esto, debe cumplir con los siguientes objetivos:

- ✓ Penetrar a través de la tubería de revestidor, del cemento y de la zona dañada, hasta alcanzar la formación virgen.

- ✓ Crear la mayor cantidad de orificios abiertos al flujo, para la evaluación de los intervalos productores.
- ✓ Permitir orificios limpios para la inyección de agua, gas, grava o cemento.
- ✓ Crear flujo radial por efectos de simetría en la fase de disparos.
- ✓ Crear y mantener flujo laminar en las perforaciones de formación para evitar arenamientos.
- ✓ Lograr la tasa óptima de producción y un mayor recobro de hidrocarburos del yacimiento evitando reparaciones prematuras.

Como segunda parte del trabajo, el estudio abarcará un análisis conceptual del tipo de daño producido al revestimiento por el proceso de cañoneo, dicho daño puede desencadenar el colapso del material y producir fracturas o agrietamientos.

De igual manera se aportará los conceptos básicos fundamentales necesarios para el planteamiento de modelos que permitan la resolución de sistemas que permitan obtener valores precisos de las condiciones de riesgo.

7.3.- OBJETIVOS

7.3.1.- OBJETIVO GENERAL

- ✓ Determinar el cañoneo óptimo de un pozo

7.3.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar la densidad de disparo, ángulo de fase y diferencial óptimo de cañoneo, necesarios para optimizar la producción y minimizar el daño a la formación
- ✓ Definir en forma conceptual el tipo de daño causado al revestimiento por el proceso de cañoneo
- ✓ Analizar conceptos básicos que permitan plantear modelos matemáticos para cuantificar la reducción en la resistencia del revestidor cuando es sometido a los diversos esfuerzos internos, externos y tensionales como resultado del daño producido por las perforaciones.

7.4.- LIMITACIONES

No se dispone de data de campo, lo cual obligará a realizar el trabajo desde un punto de vista conceptual

CONCLUSIONES

A medida que se incremente el diferencial de presión mayor será la limpieza y mayor será la velocidad del fluido, debido a esto mayor será su capacidad de arrastre. Para rocas no consolidadas el efecto de la alta velocidad de fluidos puede desencadenar en un problema más grave, arenamiento del pozo.

Para rocas consolidadas utilizar el máximo diferencial de presión permitido por el límite de colapso del revestimiento utilizado en el pozo, lo cual permitirá la formación de microfracturas en las zonas adyacentes al pozo.

El caso más óptimo para rocas consolidadas será cuando se utilice una fase de disparo de 0° y 180° , y los disparos se realicen en dirección del máximo esfuerzo horizontal. .

Para rocas no consolidadas deberán utilizarse fases distintas de 0° y 180° , pero no se recomienda utilizar una fase de disparo, en el que alguno de los disparos se encuentre en dirección del esfuerzo principal menor .

Las conclusiones obtenidas no deberán aplicarse directamente a cualquier yacimiento, ya que las condiciones que puedan presentar son completamente distintas y pueden variar entre ellos., será necesario estudiar la características de cada zona y verificar la factibilidad de estos resultados

En el momento en que puedan obtenerse perforaciones que describan una circunferencia, sin daño adicional al revestimiento, podrán obtenerse resultados con gran precisión de la resistencia del revestimiento posterior al cañoneo.

RECOMENDACIONES

Restringir el uso de la técnica sobre balance solamente para pozos exploratorios. Por razones de seguridad se recomienda perforar con un diferencial de presión positivo para mantener mayor control del pozo. Para pozos de desarrollo y de avanzada utilizar la técnica de bajo balance lo cual permitirá una limpieza óptima del túnel de perforación.

Realizar un estudio para determinar la influencia de una alta densidad de disparo sobre la resistencia del revestimiento, utilizando la teoría presente en el trabajo, como fundamento teórico

Utilizar cañones TCP en la técnica de cañoneo bajo balance, lo cual brindará una mayor seguridad y permitirá el uso de una cantidad óptima de explosivo en cada carga.

Realizar el proceso de cañoneo utilizando fluidos de completación con la menor cantidad de sólidos posible, de manera de reducir el daño cuando se realiza el flujo hacia el túnel de perforación.

Aplicar la técnica de orientación de núcleos por paleomagnetismo porque ofrece grandes ventajas sobre los métodos convencionales

Fomentar el estudio de la técnica de orientación de núcleos por paleomagnetismo

Aplicación del modelo de elementos finitos para definir condiciones de riesgo cuando el revestimiento es sometido a altas densidades de disparo.

Diseñar metodologías de optimización para el cañoneo de pozos.