

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD MECÁNICA
DE LAS PERFORACIONES DE POZOS VERTICALES
DE PETRÓLEO UTILIZANDO EL MÉTODO
DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Br. Moreno R., Eleazar A.
C.I.: 16.972.473
Para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, junio de 2012

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD MECÁNICA
DE LAS PERFORACIONES DE POZOS VERTICALES
DE PETRÓLEO UTILIZANDO EL MÉTODO
DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

Tutor Académico: Prof. Alberto Pertuz, PhD.
Tutor Industrial: Ing. Gerañ Pineda, Msc.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Br. Moreno R., Eleazar A.
C.I.: 16.972.473
Para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, junio de 2012

DEDICATORIA

Dedicado a mi mamá Margarita y mi papá Pedro, dos personas que tienen toda una vida de lucha por ser mejores padres y personas, lo que abarca muchísimo más del apoyo incondicional que siempre me han brindado y seguro estoy lo harán eternamente, también incluye el haberse esforzado día a día para forjar en mi valores y principios, que unidos con el gran amor que nunca ha faltado en mi hogar, genera el mayor de los regalos: haberme dado todas las herramientas necesarias para triunfar en la vida, no sólo como hijo sino también como hombre, uno preparado para salir adelante frente a cualquier reto que la vida le tenga planificada. Que gran honor es ser fruto de ustedes. LOS AMO INFINITAMENTE.

Especialmente dedicado a mi hermano Pedrito, quien con tan sólo once años se ha convertido en mi fuente de inspiración, en una de las más grandes razones por las que cada día lucho por mejorar y poder ser un excelente ejemplo para su vida.

También a toda mi familia Moreno y Rizales, todos tíos y tías que han sido pilares fundamentales en mi formación y vida. A los primos, siempre incondicionales. Y mis abuelos: María Angélica, Nicomedes, mi tata Otilde y mi mamá Omelia, siempre estaré agradecidos con ustedes, mis metas son tan más como de ustedes y parte del esfuerzo es en función de horrarlos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecido primeramente con mi casa de estudio, la ilustre Universidad Central de Venezuela, que gran etapa de mi vida pude compartir en tus salones y pasillos.

A mis tutores Alberto Pertuz y Geralf Pineda, dos grandes ingenieros, quienes me brindaron apoyo y sirvieron de guía en la larga y tediosa trayectoria de realizar mi trabajo de grado.

A Intevep, no sólo a la institución sino a las personas que ahí hacen vida, conocí excelentes profesionales (incluyendo a mis compañeros tesistas y pasantes), quienes siempre me brindaron apoyo incondicional.

Agradecido con cada uno de los profesores, que a lo largo de la carrera me regalaron sus conocimientos de manera desinteresada y lograron formar otro ingeniero de la UCV, especialmente al profesor Liber Videla. Y por supuesto a los protagonistas que siempre están atrás de las camaras, pero haciendo que solo ellos pueden, todo el personal de la universidad en especial a las secretarias de la escuela de mecánica.

Y por último pero no menos importante a los amigos y panas, que tuve la suerte de conocer en la UCV.

RESUMEN

Moreno R. Eleazar A.

EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD MECÁNICA DE LAS PERFORACIONES DE POZOS VERTICALES DE PETRÓLEO UTILIZANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Tutor académico: Prof. Alberto Pertuz, PhD.

Tutor industrial: Ing. Geralf Pineda, Msc.

CARACAS. UCV. FACULTAD DE INGENIERÍA. ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA. 2012

132 páginas

Palabras clave: cañoneo, perforación, cementación, estabilidad de perforaciones, método de elemento finito, anisotropía, esfuerzos, deformaciones, simulación

Resumen: Dentro de los procesos de completación de pozos petroleros, el cañoneo es uno de los más importantes debido a que puede definir su vida productiva; si es ejecutado de manera eficiente aumenta drásticamente la tasa de recuperación de hidrocarburos, pero en caso contrario podría ocasionar pérdidas totales de zonas productoras.

La eficiencia del cañoneo se mide en productividad, que es la meta final de toda empresa dedicada a la explotación de hidrocarburos, sin embargo, como éstos se encuentran en rocas porosas, al ser trasladados al fondo del pozo también arrastran consigo partículas de arena, que es un elemento indeseable, no sólo porque su acumulación puede tapar una zona productora sino porque genera daños en las herramientas y tuberías instaladas. El origen de la producción de arena es la generación de deformaciones plásticas en la formación, lo que genera fallas en las rocas disgregando partes de sí mismas.

En la presente investigación se propone un modelo numérico analizado con el método de los elementos finitos, capaz de representar las condiciones físicas reales tanto del proceso de cañoneo como de los previos necesarios para la construcción del pozo, a partir del cual se realiza una evaluación de la estabilidad mecánica del sistema revestidor-cemento-formación modificando entre otras variables, las propiedades elásticas del cemento y los esfuerzos *in situ*.

Con la presente investigación, se pudo determinar que apuntar las perforaciones a 60° con el esfuerzo máximo horizontal, en vez de ser alineadas directamente, puede hasta duplicar el riesgo de producir arena; y que con una misma configuración del sistema de cañoneo, se podría triplicar el riesgo de producir arena si se emplea en una formación con un régimen de esfuerzos *in situ* inverso en vez de uno normal.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	1
 CAPÍTULO I. EL PROBLEMA	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
OBJETIVOS	6
1. General.....	6
2. Específicos	6
JUSTIFICACIÓN	7
ALCANCE Y LIMITACIONES	8
 CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	
ANTECEDENTES DE MODELOS QUE REPRESENTEN EL PROCESO	
DE CAÑONEO DE POZOS	10
PROCESO DE CAÑONEO DE POZOS PETROLEROS.....	20
1. Principios de la perforación de pozos	20
2. Proceso de perforación.....	21
2.1. Terminación del pozo.....	23
2.2. Fluido de perforación.....	24
2.2.1. Controlar las presiones de la formación.....	25
2.2.2. Suministrar un revoque liso, delgado e impermeable.....	26
3. Cañoneo de pozos	27
3.1. Tipos de sistemas de cañoneo	27
3.1.1. Sistemas de cañoneo con cable o guaya (<i>casing guns</i>)	28
3.1.3. Sistemas de cañoneo a través de la tubería de producción (<i>through tubing systems</i>).....	28
3.1.2. Sistemas de cañoneo bajados con la completación (<i>tubing conveyed perforating, TCP</i>)	29
3.2. Revestimientos (<i>liners</i>) y cargas explosivas	30

4. Principios de geomecánica	32
4.1. Elasticidad y plasticidad	32
4.2. Esfuerzos de campo.....	35
4.2.2. Esfuerzo vertical o de sobrecarga	35
4.2.3. Esfuerzos horizontales	36
4.2.4. Magnitud relativa de los esfuerzos <i>in situ</i>	38
4.2.5. Presión de poro	39
4.3. Propiedades mecánicas de la roca	40
4.3.1. Propiedades estáticas.....	40
4.3.2. Propiedades dinámicas	41
5. Impacto de las propiedades del yacimiento en el cañoneo	42
5.1. Daño a la formación	42
5.2. Impacto de la configuración del pozo y de las condiciones de presión	44
5.2.1. Presión en la pared del hueco	44
5.2.2. Propiedades del revestidor y el cemento.....	44
5.2.3. Tolerancia revestidor-cañón	46
6. Determinación de la presión de cañoneo	46
6.1. Bajobalance dinámico	47
6.2. Cañoneo sobrebalance	48
6.2.1. Cañoneo en condiciones de sobrebalance extremo	48
7. Relación entre las deformaciones plásticas y el riesgo de producción de arena.....	49
MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	51
1. Introducción.....	51
2. Aspectos históricos.....	52
3. Principios de esfuerzos y equilibrio	54
3.1. Condiciones de frontera.....	57
3.2. Relaciones deformación unitaria-desplazamiento	58
3.3. Relaciones esfuerzo-deformación unitaria.....	59
4. Principio de Hamilton.....	61
5. Problemas de análisis de esfuerzos y deformaciones.....	63
5.1. Idealización.....	64
5.2. Discretización del dominio	65

5.3. Solución.....	66
5.3.1. Formulación del elemento finito	66
5.3.2. Rigidez del elemento.....	70
5.3.3. Términos de fuerza	71
5.3.4. Cálculos de los esfuerzos.....	72
5.3.5. Solución con elementos hexaédricos	73
6. Errores en el método de elementos finitos.....	74
MÉTODO PARA VALIDAR UN MODELO NUMÉRICO ELASTOPLÁSTICO	76
1. Aplicación de la Ley de Kirsch	76
2. Convergencia del mallado.....	78
CÁLCULOS EN ABAQUS.....	79
1. Esfuerzo von-Mises (σ_{VM})	79
2. Deformación plástica equivalente (ϵ_{eq}^{pl})	79
 CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	
1. Tipo de investigación.....	82
2. Diseño de la investigación.....	83
3. Población y muestra.....	83
4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	84
5. Metodología de la investigación	84
5.1. Propuesta del modelo numérico (MEF)	84
5.2. Definición de los casos de carga	87
5.3. Aplicación de la Ley de Kirsch	88
6.5. Convergencia del mallado	88
 CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS	
RESULTADOS	90
1. Aplicación de la Ley de Kirsch	90
2. Primera aproximación del modelo elastoplástico	92
3. Convergencia del mallado.....	98
4. Evaluación de esfuerzos y deformaciones en las paredes de las perforaciones.....	101
5. Influencia de la anisotropía en los esfuerzos <i>in situ</i>	103
5.1. En modelos ensamblados	103

5.2. En las adyacencias de las perforaciones	107
5.2.1. Para régimen normal de esfuerzos	107
5.2.2. Para régimen inverso de esfuerzos	110
6. Influencia de las propiedades elásticas del cemento	112
7. Evaluación variando la configuración geométrica	114
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	117
1. Aplicación de la Ley de Kirsch	117
2. Primera aproximación del modelo elastoplástico	117
3. Convergencia del mallado.....	119
4. Evaluación de esfuerzos y deformaciones en las paredes de las perforaciones.....	120
5. Influencia de la anisotropía en los esfuerzos <i>in situ</i>	121
5.1. En las adyacencias de las perforaciones	121
6. Influencia de las propiedades elásticas del cemento	122
7. Evaluación variando la configuración geométrica	123
 CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
CONCLUSIONES	125
RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	127
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128
UNIDADES Y ABREVIATURAS	132

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Radio de productividad vs. longitud de perforación, variando la densidad de tiro	10
2. Radio de productividad vs. longitud de perforación, variando el ángulo de fase	10
3. Comparación de penetración en la formación. Datos de prueba API RP-43	11
4. Efecto de la orientación del cañoneo en el riesgo de producción de arena.....	13
5. Incremento del caudal variando la permeabilidad de la formación	15
6. Radio de productividad vs. densidad de tiro.....	16
7. Geometría de perforación en revestidor-cemento-formación por cañoneo.....	17
8. Impacto del radio de penetración en relación con el radio de productividad	17
9. Configuración geológica para la existencia de un yacimiento.....	20
10. Proceso de construcción de un pozo vertical	23
11. Barrenas petroleras.....	25
12. Diagrama del proceso de cañoneo	27
13. Cañón tipo <i>casing gun</i>	28
14. Cañón tipo <i>through tubing</i>	29
15. Cañón tipo <i>tubing conveyed perforating</i>	30
16. <i>Liners</i> de cañoneo	30
17. Secuencias del cañoneo, hoyo grande(<i>Big Hole</i>) y gran profundidad (<i>Deep Penetrating</i>)	31
18. Esfuerzo-deformación de un material elástico	33
19. Esfuerzo-deformación de un material elástico no lineal	33
20. Representación de un material poroso	34
21. Ensayo triaxial para una muestra de roca.....	35
22. Esfuerzos verticales (sobrecarga)	36
23. Distribución de esfuerzos horizontales y fracturas alrededor del hoyo.....	36
24. Prueba tipo <i>leak-off</i> , volumen en función del tiempo	37
25. Regímenes de esfuerzos <i>in situ</i> : a)normal, b)transcurrente e c)inversa.....	38
26. Presión de poro en función de la profundidad de la formación	39
27. Esfuerzo en función de la deformación de una roca	41

28. Distintas zonas creadas a raíz de la pérdida de fluido en la formación.....	43
29. Impacto de la presión en las paredes del pozo en la penetración del cañoneo.....	44
30. Efecto del espesor del revestidor en el diámetro de entrada del túnel.....	45
31. Efecto de la dureza del revestidor sobre el diámetro del hueco.....	45
32. Efecto de la tolerancia entre el cañón-revestidor sobre la longitud del túnel	46
33. Pruebas de bajobalance dinámico.....	47
34. Cuerpo tridimensional.....	55
35. Equilibrio de un volumen elemental	56
36. Volumen elemental en la superficie	57
37. Volumen elemental en la superficie	58
38. Procedimiento de modelado a través del método de los elementos finitos.....	64
39. Ejemplo de una malla bidimensional con elementos y nodos numerados.....	66
40. Elemento tetraédrico.....	67
41. Elemento maestro para funciones de forma.....	67
42. Elemento hexaédrico.....	73
43. Esfuerzos alrededor del hoyo perforado.....	90
44. Error relativo de la representación de esfuerzos en función de la distancia alrededor del hoyo.....	91
45. Esfuerzos <i>in situ</i> aplicados a la formación intacta (igual para modelo elástico o elastoplástico)	92
46. Perforación de la formación virgen.....	93
47. Deformaciones plásticas equivalentes luego de la perforación.....	93
48. Distribución de esfuerzos al descender el revestidor.....	94
49. Distribución de esfuerzos en el revestidor al bombear la lechada	94
50. Distribución de esfuerzos en el cemento sólido (fraguado completamente)	94
51. Distribución de esfuerzos al fraguar el cemento.....	95
52. Distribución de esfuerzos luego de ejecutar el cañoneo	96
53. Distribución de esfuerzos en la formación (corte en perforación a 60°)	96
54. Deformaciones plásticas equivalentes luego del cañoneo (corte en perforación a 60° y corte horizontal)	97
55. Esfuerzos en dirección radial de la formación apreciando la plastificación del material	97
56. Tiempo de procesamiento modificando la densidad del mallado.....	99

57. Esfuerzos máximos en el cemento modificando la densidad del mallado	99
58. Esfuerzos mínimos en el cemento modificando la densidad del mallado	99
59. Esfuerzos máximos en la formación modificando la densidad del mallado.....	100
60. Esfuerzo mínimo en la formación modificando la densidad del mallado	100
61. Deformaciones plásticas equivalentes en la formación modificando la densidad del mallado.....	101
62. Esfuerzos en secciones de las paredes de las perforaciones.....	102
63. Líneas de las paredes de las perforaciones	102
64. Deformaciones plásticas equivalentes en secciones las paredes de las perforaciones.....	103
65. Esfuerzos máximos en la formación variando la anisotropía de esfuerzos horizontales	105
66. Esfuerzos mínimos en la formación variando la anisotropía de esfuerzos horizontales	105
67. Deformaciones plásticas equivalentes en la formación variando la anisotropía de esfuerzos horizontales	106
68. Esfuerzos en las paredes de las perforaciones alineadas con el esfuerzo horizontal máximo (régimen normal).....	107
69. Esfuerzos en las paredes de las perforaciones alineadas a 60° con el esfuerzo horizontal máximo (régimen normal).....	108
70. Deformaciones plásticas equivalentes en las paredes de las perforaciones alineadas con el esfuerzo horizontal máximo (régimen normal)	109
71. Deformaciones plásticas equivalentes en las paredes de las perforaciones alineadas a 60° con el esfuerzo horizontal máximo (régimen normal).....	109
72. Esfuerzos en las paredes de las perforaciones alineadas con el esfuerzo horizontal máximo (régimen inverso)	110
73. Esfuerzos en las paredes de las perforaciones alineadas a 60° con el esfuerzo horizontal máximo (régimen inverso)	111
74. Deformaciones plásticas equivalentes en las paredes de las perforaciones alineadas con el esfuerzo horizontal máximo (régimen inverso)	112
75. Deformaciones plásticas equivalentes en las paredes de las perforaciones alineadas a 60° con el esfuerzo horizontal máximo (régimen inverso).....	112
76. Esfuerzos máximos y mínimos variando las propiedades elásticas del cemento	113

77. Distribución de esfuerzos luego de ejecutar el cañoneo (3 tpp y ángulo de fase 180°)	114
78. Esfuerzos en las paredes de las perforaciones (3 tpp y ángulo de fase 180°)	115
79. Deformaciones plásticas equivalentes en las paredes de las perforaciones (3 tpp y ángulo de fase 180°)	115
80. Presiones laterales en las paredes del pozo mientras fragua el cemento	118
81. Deformaciones plásticas equivalentes en las paredes de las perforaciones alineadas a 60° con el esfuerzo horizontal máximo (ambos regímenes)	122
82. Deformaciones plásticas equivalentes luego del cañoneo (3 tpp y ángulo de fase 180°)	123

ÍNDICE DE TABLAS

1. Dimensiones geométricas del modelo	85
2. Propiedades de materiales	85
3. Cargas geostáticas	86
4. Cargas aplicadas.....	87
5. Errores presentes en el modelo numérico al representar los esfuerzos.....	91
6. Variación de tópicos modificando la densidad del mallado.....	98
7. Esfuerzos horizontales a 4.746 m (15.572 pies).....	104
8. Propiedades elásticas del cemento	113

INTRODUCCIÓN

El primer paso para producir hidrocarburos es definir diseños de perforación y completación de pozo, procesos cuyos costos se estiman en millones de dólares, por tal motivo son llevados a cabo bajo preestablecidos márgenes económicos que aseguren la rentabilidad al extraer petróleo y/o gas, sin poner en riesgo el medio ambiente y los profesionales que los ejecutan.

Las operaciones para la construcción de un pozo se inician con la perforación, que consiste en abrir un agujero en la formación mediante la rotación de una mecha por la cual se conduce un fluido conocido como lodo de perforación, este se encarga de trasladar los ripios taladrados hacia la superficie; a cierta profundidad programada se detiene y se sube la sarta de perforación para luego descender una tubería de acero (revestidor), esta se asienta y se bombea una lechada de cemento por el centro del revestidor hasta que suba por el espacio anular entre la tubería y la formación, estando ahí se deja fraguar. Estos pasos se repiten tantas veces como hoyos se hayan programado, siempre reduciendo el diámetro de la mecha, de manera que el pozo tome forma telescópica. Los pozos revestidos y cementados tienen una mayor estabilidad, reduciendo drásticamente las posibilidades de derrumbe de la formación (Sullaway, 1991).

Sin embargo, las secciones de tubería y cemento aíslan aún más el yacimiento del pozo, y para iniciar la producción se deben generar caminos que los unan y permitan trasladar los hidrocarburos hacia el fondo del pozo para luego ser llevados a la superficie. Dichos trayectos se realizan mediante el cañoneo, proceso que involucra hacer descender un cañón en el pozo a la profundidad que se determinó la existencia de petróleo o gas, y activar sus cargas explosivas que impulsan proyectiles metálicos y los hacen penetrar en el revestidor y el cemento para luego adentrarse en la formación estableciendo la comunicación.

El uso de explosivos en la completación de pozos empezó en 1926 usando cortadores mecánicos, sin embargo, tuvieron que transcurrir cuatro años de pruebas con el método para obtener aumentos considerables en la producción (Hilchie, 1990).

A mediados de los años 30 se empezó a usar municiones en el cañoneo, método que se mantuvo dos décadas a la vanguardia de la completación de pozos, a pesar de que el rendimiento disminuía drásticamente con formaciones y/o revestidores de alta dureza. A finales de los años 50, se desarrolló un sistema donde se detonaban explosivos con cargas huecas

moldeadas –conocido como perforación a chorro (*jet-perforating*)–, las cuales alcanzaban una velocidad de 1.000 m/s (3.300 pies/s), cualidad que hacía posible realizar penetraciones más profundas y limpias, generando menos escombros al penetrar el acero y el cemento (Bell *et al.*, 1995).

Este sistema ha presentado avances considerables en el diseño del cañón y cargas empleadas, sobrepasando velocidades en la detonación de 7.600 m/s (25.000 pies/s), capaces de generar perforaciones en la formación de hasta 1 metro (40 pulgadas). Actualmente, en más de 95 por ciento de los casos, el sistema usado es cañoneo con cargas moldeadas, que brindan un amplio rango de posibilidades para adaptarse a los requerimientos de cada pozo, mientras las perforaciones con municiones sólo se usan en formaciones frágiles o suaves (King, 1995).

El propósito general de optimizar el proceso de cañoneo es disminuir la producción de arena hacia el pozo, esta depende de la resistencia de las rocas, de los esfuerzos *in situ*, de los fluidos producidos y de los cambios en las tasas de flujo generados por la caída de presión al agotarse el yacimiento. Los problemas asociados con la producción de arena abarcan desde su manejo y eliminación en la superficie hasta la erosión y daño de los equipos de subsuelo (Ali *et al.*, 2001). Si la velocidad de flujo no es capaz de transportar la arena producida hacia la superficie, esta acumulación en el fondo puede detener por completo la extracción de hidrocarburos, y para establecer de nuevo la producción, se debe aplicar rápidamente métodos que hagan circular esta arena o se perderá el pozo por completo (Economides *et al.*, 1998).

Motivado a lo expresado anteriormente, en la compañía Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima (Pdvs), se presenta la necesidad de evaluar diseños de cañoneo, con la finalidad de determinar cuál de ellos genera la configuración más estable, que asegure la integridad mecánica del pozo y permita extender su vida productiva.

En las últimas dos décadas, se ha presentado a escala mundial un avance acelerado de tecnologías, que son implementadas por empresas buscando optimizar la totalidad de procesos de producción, y de esta manera asegurar un producto final de excelente calidad. La empresa petrolera siempre a la vanguardia tecnológica, y motivada por los altos márgenes de ganancias económicas, no cierra posibilidades a la aplicación de nuevas técnicas, entre estas se tiene el análisis mediante modelos numéricos a través del método de los elementos finitos (MEF), que ofrece la posibilidad de representar virtualmente condiciones reales y evaluar de forma rápida y económica (no es necesario construir prototipos) cualquier proceso, pudiendo identificar la influencia de cada variable, además se pueden hacer proyecciones de nuevos modelos.

La siguiente investigación se llevará a cabo proponiendo modelos numéricos, en los cuales se pretende evaluar la estabilidad mecánica de las perforaciones generadas en el cañoneo, que está vinculada directamente con el riesgo de arenamiento en el pozo debido a que si la estructura: revestidor, cemento y formación es capaz de soportar los esfuerzos generados, se puede asegurar que las rocas del yacimiento no se deformarán plásticamente, es decir, no se producirá un exceso de arena que limite su flujo hacia la superficie. Se describirán y comprenderán las relaciones significativas entre las variables que definen el sistema de cañoneo en pozos de petróleo.

El proyecto está dividido en cuatro partes. La primera expone el planteamiento del problema, los objetivos y justificación de la investigación. La segunda parte está conformada por el marco teórico, donde se introducen conceptos básicos y antecedentes del proceso de construcción de pozos petroleros y la completación de los mismos a través del cañoneo; al final se presentan fundamentos teóricos del método de los elementos finitos (MEF), los cuales ayudarán a comprender el cálculo numérico que se realiza para determinar valores de esfuerzo y deformación en los modelos. La tercera parte expone el marco metodológico que nos guiará en la completación de nuestros objetivos propuestos. La última sección presenta los resultados y sus análisis, además de las conclusiones obtenidas al realizar la evaluación de la estabilidad mecánica en las perforaciones.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Investigaciones previas concluyen que la integridad de las perforaciones generadas al cañonear pozos se encuentra entre los tópicos de mayor importancia para controlar la producción de arenas, la cual en líneas generales se produce por dos fenómenos: el primero es la falla mecánica de las rocas que constituyen el yacimiento, lo que conlleva al arenamiento en las perforaciones, y el segundo es el arrastre de estos sedimentos hacia el pozo por el fluido de producción.

Al completar los pozos de petróleo mediante el cañoneo, se está realizando una invasión brusca y alteración geométrica del sistema revestidor-cemento-formación, que modifica y redistribuye los esfuerzos deformando cada material según sus propiedades mecánicas y cargas presentes; estas pueden ser elásticas, que son reversibles y el material retoma su condición inicial, o plásticas, que modifican su geometría de manera permanente. Las últimas son las que generan fallas en la formación, aumentando el riesgo de producir arena en el pozo, lo que trae como consecuencia una reducción en la producción de hidrocarburos y daños en los equipos de completación y superficie.

Con esta investigación se pretende responder interrogantes como: cuáles variables constituyen el proceso de cañoneo, y la influencia de cada una en la estabilidad mecánica de las perforaciones; se determinará cuánto ayuda la sección de cemento en mantener la integridad de la formación y los hoyos generados. Adicionalmente el enfoque es determinar cuáles son las zonas donde se concentran los esfuerzos, y mediante criterio falla hallar los niveles máximos que soportan las secciones de cemento y formación antes de deformarse plásticamente.

OBJETIVOS

1. GENERAL

Evaluar la estabilidad mecánica de las perforaciones generadas en el proceso de cañoneo en pozos verticales, utilizando el método de los elementos finitos (MEF), con la finalidad de establecer el grado de influencia de las propiedades elásticas del cemento y de los parámetros característicos del cañoneo en la probabilidad de producción de arena.

2. ESPECÍFICOS

1. Realizar un estudio bibliográfico acerca de: conceptos de perforación de pozos, geomecánica petrolera, consideraciones operacionales sobre el proceso del cañoneo, producción de arena, y antecedentes de modelos analíticos y numéricos a través del MEF que representen el proceso de cañoneo.
2. Proponer un modelo numérico, basado en el método de los elementos finitos, que permita representar el comportamiento del sistema físico involucrado.
3. Validar el modelo propuesto asegurándose que puede representar la distribución de esfuerzos presente en el modelo real.
4. Identificar casos de carga en el pozo, que se presentan al cañonear y en procesos previos como: perforación y cementación.
5. Evaluar el comportamiento de las perforaciones y su influencia en la distribución de esfuerzos y generación de deformaciones en el cemento y la formación.
6. Evaluar la influencia de esfuerzos *in situ* en la distribución y generación de esfuerzos y deformaciones en el yacimiento y las perforaciones generadas en el proceso de cañoneo.
7. Evaluar la influencia de las propiedades mecánicas del cemento (módulo de Young y coeficiente de Poisson) en la integridad de las perforaciones generadas en el proceso de cañoneo.

JUSTIFICACIÓN

El cañoneo de un pozo es una operación de gran importancia ya que define su vida productiva, además muy compleja porque, al ser uno de los procesos de completación, están en riesgo el dinero y tiempo invertidos en fases previas de perforación y cementación, motivado a esto se deben realizar precisas cuantificaciones de las reservas en el yacimiento que determinen la rentabilidad al extraer los hidrocarburos. Cabe destacar que sólo en 10 por ciento de los pozos exploratorios se halla petróleo, y que apenas 2 por ciento dan resultados que permite su explotación (McCray y Cole, 1970).

Con este margen tan bajo de productividad en pozos perforados, es vital que en aquellos donde se asegure rentabilidad al explotar, los procesos se realicen de la manera óptima alargando la vida productiva del mismo. El cañoneo es uno de esos procesos, y su inadecuada realización puede conllevar desde un exceso en la producción de arena hasta la pérdida completa de zonas productoras, lo que genera pérdidas de millones de dólares por inversiones anteriores.

Muchas variables deben ser tomadas en cuenta a la hora de diseñar un eficiente proceso de cañoneo; éstas dependerán, entre otros factores, de las propiedades del yacimiento, de los esfuerzos *in situ* y de los daños generados al perforar, lo que trae como consecuencia que no existan dos casos totalmente iguales y se deba estudiar cada pozo por separado. Representar estas condiciones físicas y parámetros geométricos en modelados numéricos permitirá evaluar posibles configuraciones del sistema de cañoneo, y analizando a través del método de los elementos finitos se logrará determinar de forma relativamente rápida y económica cuál es la más estable, condición que asegura la integridad de las perforaciones en el sistema revestidor-cemento-formación. El beneficio de asegurar la estabilidad mecánica en las perforaciones es disminuir el riesgo de producir arena, lo que consecuentemente aumenta el radio de productividad y alarga la vida útil del pozo permitiendo extraer la mayor cantidad posible de hidrocarburos.

Actualmente, en una sociedad donde a diario la tecnología presenta grandes avances, se debe optimizar cada proceso para ofertar un producto final competitivo, en la empresa petrolera es indispensable porque, a pesar del alto margen de ganancia, las inversiones también son muy costosas. Tales motivos justifican la realización de esta investigación.

ALCANCE Y LIMITACIONES

La siguiente investigación está dirigida a evaluar la estabilidad mecánica en perforaciones generadas al cañonear, para esto se propone realizar modelos elastoplásticos tridimensionales de pozos verticales, dichos modelos serán mallados con elementos hexahédricos de ocho nodos.

Se implementará una condición anisotrópica de esfuerzos, además se apreciarán las cargas hidrostáticas de los fluidos de perforación, completación y del cemento antes de fraguar. La aplicación de estas fuerzas a nuestro modelo lo aproximan a la correcta representación de las condiciones físicas reales presentes en la sección del pozo a ser cañoneada.

El modelo base y sin las perforaciones del cañoneo, se validará aplicando la Ley de Kirsch sobre la distribución tridimensional de esfuerzos en placas planas, con esto se determinan cuáles son las dimensiones geométricas apropiadas para la correcta representación del sistema físico real.

Luego de haber validado el modelo, se realizarán corridas variando: las propiedades del cemento, el régimen y magnitudes de los esfuerzos *in situ*, y la dirección relativa entre las perforaciones y los esfuerzos principales horizontales. Con estos resultados, se evaluarán las concentraciones de esfuerzos y deformaciones, logrando determinar cuál configuración es la más estable y ayuda a mantener la integridad del sistema revestidor-cemento-formación, de esta manera se podrán definir las relaciones entre las variables que componen el sistema de cañoneo de pozos, consiguiendo optimizar la aplicación del proceso.

Entre las limitaciones de los modelos a realizar, se tienen las siguientes: los esfuerzos *in situ* estarán alineados ortogonalmente, es decir, el esfuerzo de sobrecarga coincide con el vertical y los máximo y mínimo horizontales con los ejes x y y respectivamente. La roca, el cemento y el revestidor se considerarán homogéneos y continuos. Como lo que se pretende evaluar es la estabilidad mecánica de las perforaciones y no el radio de productividad, no se tomará en consideración el flujo en medio poroso presente en la interacción del pozo con los lodos de perforación y completación. Además no se tomarán en cuenta las fluctuaciones de temperatura en el fondo del pozo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

ANTECEDENTES DE MODELOS QUE REPRESENTEN EL PROCESO DE CAÑONEO DE POZOS

Entre los primeros estudios del proceso de cañoneo que se realizaron utilizando modelos por elementos finitos, se encuentra el realizado por Twyford y Tyler en 1984. En el análisis del proceso no se tomó en cuenta el diámetro de hoyos y por presuntos resultados similares se unificaron ángulos de fases de 90° , 120° y 180° , las características geomecánicas fueron las propias de yacimientos en Prudhoe Bay (Alaska, EEUU). Variaron la longitud de perforación y la densidad de tiro, además se analizan perforaciones con cañones bajados con guayas (*tubing guns*) y con la sarta de completación (*casing guns*). Se realizó cañoneo en bajobalance y sobrebalance.

Twyford y Tyler concluyeron que la densidad de tiro y la longitud de perforación son lo más importante en la productividad; además expresan que al cañonear a 0° , la convergencia de flujo reduce la producción, sin embargo, en pozos mal cementados puede ser eficiente su aplicación para asegurar uniformidad en la profundidad de los hoyos. También determinaron que el diámetro tiene mínimo impacto en el Radio de Productividad (RP).

Concluyeron que es preferible cañonear en bajobalance, ya que la presión de la formación logra expulsar los escombros hacia el pozo. En las figuras 1 y 2 se evidencia que con perforaciones profundas ($L_p > 25$ cm), se consigue una comunicación entre el yacimiento y el pozo, esto es indispensable cuando hay daño severo (grandes reducciones de permeabilidad) producido por perforar y/o cañonear en sobrebalance.

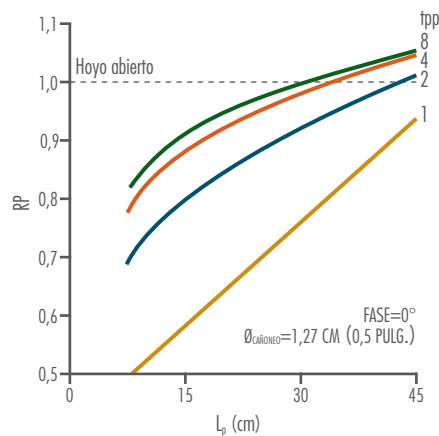


FIGURA 1. RADIO DE PRODUCTIVIDAD VS. LONGITUD DE PERFORACIÓN, VARIANDO LA DENSIDAD DE TIRO

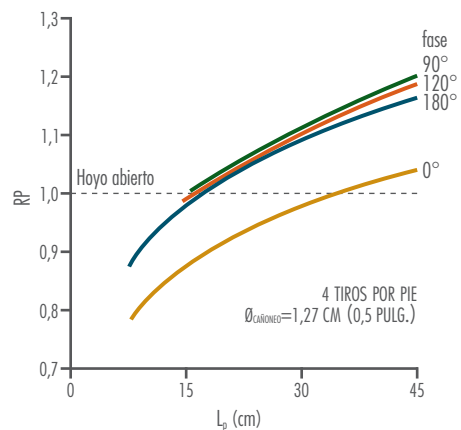


FIGURA 2. RADIO DE PRODUCTIVIDAD VS. LONGITUD DE PERFORACIÓN, VARIANDO EL ÁNGULO DE FASE

En la figura 3, se observa que el cañoneo con *casing gun* genera perforaciones de hasta 35 centímetros (14 pulg.) de longitud, mientras que con *tubing guns* se obtiene un máximo de 25 centímetros (10 pulg.).

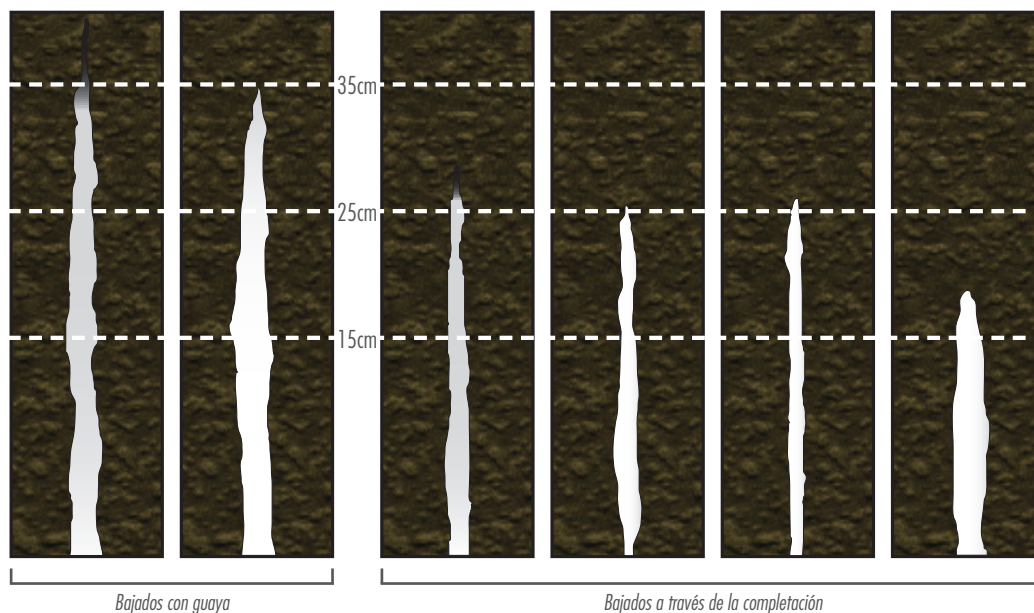


FIGURA 3. COMPARACIÓN DE PENETRACIÓN EN LA FORMACIÓN. DATOS DE PRUEBA API RP-43

En un estudio posterior realizado por M. Ichara (1990), quien analizó exclusivamente pozos de gas —entre las variables estaban densidad de tiro y longitud de perforación—, se apreció la permeabilidad en la formación y la turbulencia generada en el momento en que el crudo fluye desde el yacimiento hacia el pozo. Los esfuerzos *in situ* son anisotrópicos, cualidad que aproxima el modelo a condiciones reales.

A diferencia de los pozos de petróleo, donde se registran cambios de 30 por ciento en el radio de productividad variando la condición de esfuerzos de isotrópica a anisotrópica, en los de gas es despreciable, las variaciones máximas son de 5 por ciento.

Expresó que con una permeabilidad menor a 10 mD, la turbulencia es despreciable en la variación del RP, que sólo es afectado por la longitud de perforación y la densidad de tiro. La turbulencia causa pérdidas de 75 por ciento en altas permeabilidades. Asumir una condición idealizada, en donde los esfuerzos máximo y mínimo horizontales son iguales (isotropía), trae como consecuencia que cambiar al ángulo de fase afecte drásticamente el RP, mientras que en anisotropía es despreciable. Cuando la densidad de tiro es menor de 4 tiros por pie (tpp), el ángulo de fase tiene un efecto despreciable.

También en 1991, J.M. Somerville y A. Bin Samsuri, realizaron un estudio donde incluyen análisis de deformación de la formación luego del cañoneo. Propusieron un modelo numérico en dos dimensiones, donde representaron el corte a lo largo de la sección cañoneada (plano vertical), y se asumió que toda la zona estudiada está dentro del yacimiento. La formación es linealmente elástica (elastoplástica), homogénea e isotrópica en sus esfuerzos *in situ*. Se varió la densidad de tiro entre 1 tpp y 6 tpp; el ángulo de fase de 0° y 90°; el diámetro de entrada entre 0,635 y 2,54 centímetros (0,25-1 pulg.); por último la longitud de perforación varió entre 6,35 y 25,4 cm (2,5-10 pulg.).

Con este estudio se logró determinar que las fracturas empiezan en la interfase cemento-formación, y con más de 4 tpp se empiezan a producir deformaciones plásticas. Una mayor cantidad de fracturas genera mayor producción de escombros, que a su vez reduce la estabilidad de la perforación y compromete la extracción del crudo. Duplicar la densidad de tiro incrementa 8 veces la producción de escombros. También concluyeron que con 0° en ángulo de fase se obtiene la configuración menos estable, esto debido a la concentración de esfuerzos en un mismo plano vertical; y la configuración más estable se consigue con un patrón en espiral. Para optimizar la estabilidad del hoyo, la geometría individual de cada perforación influye menos que la estructural, es decir, se debe tomar especial atención a la densidad de tiro (tpp) y el ángulo de fase.

El mismo año (1991), Santarelli y Zuridel propusieron un modelo donde idealizaron muchas variables que lo distancian de condiciones reales; realizan los cálculos de la estabilidad del cañoneo justo antes de realizar la perforación (como si no se hubiera abierto el pozo, y por consiguiente es imposible suponer el proceso de cañoneo), cuando la presión del pozo es igual a la del yacimiento, esto elimina la realización de estimación de flujo; y eliminando la presión de poro se puede asumir que la roca es homogénea e isotrópica.

Se asigna desplazamiento cero en dirección horizontal, simulando una cementación perfecta; con esta condición, el ángulo de fase no tiene notable influencia en el riesgo de producción de arena (ver figura 4). Expresan que con microanillos en la interfase cemento-revestidor de un milímetro ya se presentan problemas de estabilidad en el cañoneo, sin embargo, no hay detectores para fallas tan pequeñas.

Con este estudio, los autores lograron concluir que el riesgo de producción de arena aumenta 5 veces si las perforaciones no se orientan paralelas al esfuerzo horizontal máximo. Que el riesgo de producción de arena no depende de la profundidad de la perforación pero sí de la densidad de tiro. Los límites generales son: con fase de 180°, 12 tpp; y con fase de 0°, máximo 8 tpp.

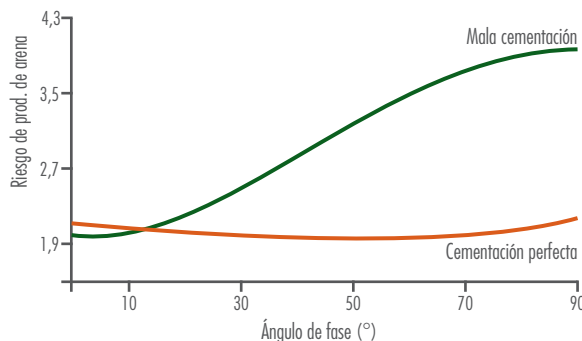


FIGURA 4. EFECTO DE LA ORIENTACIÓN DEL CAÑONEO EN EL RIESGO DE PRODUCCIÓN DE ARENA

En 1992, J. Tronvoll y otros, realizaron un estudio sobre el control de producción de arena; explican que, a pesar de que aumentan los gastos, es requerido por seguridad tanto a los trabajadores como a los equipos y tuberías. En un yacimiento de gas se puede generar una fuga de arena a 138 MPa (20.000 lppc) en sólo una hora.

Usando su modelo numérico propuesto obtuvieron las propiedades de la roca mediante gráficas esfuerzo-deformación. La formación es anisotrópica y heterogénea.

Confirmaron resultados del estudio anterior al observar que la falla en la cavidad empieza en la interfase cemento-formación. Además concluyen que la presión de poro no afecta significativamente el esfuerzo en bordes donde empieza la falla y que no se tiene precisión para determinar la estabilidad y posible colapso luego de que la roca falla.

En 1993, A. Behie y A. Settari, propusieron un modelo con técnicas semianalíticas; los autores comentan que el uso directo de modelos con elementos finitos es impráctico para trabajos de diseño. Utilizan dos modelos: a) flujo a través de núcleos, y b) múltiples perforaciones, permite cualquier geometría (incluyendo espacio irregular), excentricidad del cañón, empaque de grava, daños por perforación del pozo y heterogeneidad en la formación.

Esta investigación se considera que no aportó novedades en el análisis de estabilidad del proceso de cañoneo, se repitieron resultados obtenidos anteriormente en modelos realizados por elementos finitos. Tal motivo constata que la aplicación de modelos numéricos son convenientes en el estudio de cualquier proceso del área petrolera, en este caso el cañoneo, debido a la relativa facilidad con que se pueden realizar, además de poder modificar variables rápidamente y comparar resultados, lo que permite optimizar el proceso en cuestión al menor costo posible.

Posteriormente N. Kessler y otros (1993) realizaron un estudio con dos modelos: uno totalmente vertical, y otro con desviación de 45°. Se analizó la influencia del revestidor como soporte suplementario.

Asumieron que los esfuerzos horizontales son anisotrópicos, y que el esfuerzo vertical es igual al peso de la sobrecarga obtenido de la integración de registros de densidad. El modelo propuesto fue capaz de reproducir la influencia de la orientación del cañoneo en el riesgo de producción de arena. Esto ha sido validado tanto con datos de campo como con simulaciones numéricas en tres dimensiones utilizando modelados en elementos finitos. El modelo se puede utilizar para optimizar la geometría del cañoneo con el fin de reducir al mínimo la producción de arena mediante la determinación de los parámetros más favorables, tales como desviación del pozo y la dirección de la orientación o la perforación.

En 1995, Y. Tang y otros, propusieron un modelo analítico en pozos de gas, se guiaron por fórmulas de Tariq y Forchheimer. Explican que la velocidad de filtración del gas a través de medios porosos es muy alta, y no obedece a la Ley de Darcy. Con este modelo lograron determinar que el daño por la perforación y el diámetro de perforación influyen más en pozos de gas que en los de crudo, y que no hay casos idénticos, es decir, cualquier ángulo de fase puede ser el mejor o el peor, esto depende de la anisotropía y si el cañoneo se realiza en zonas con alto daño por perforación o formaciones no consolidadas. Al cañonear en zonas dañadas, el incremento de la profundidad de las perforaciones mejora mucho el RP, pero, cuando se supera la zona dañada y ya el hoyo cañoneado hizo la función de *bypass*, la influencia de la longitud de perforación se reduce. La anisotropía afecta severamente cuando el ángulo de fase es 180° ; cuando éste se modifica a 0° , el efecto es menor debido a que controla y reduce más eficientemente el espacio entre perforaciones. En consecuencia, la fase óptima depende de la anisotropía.

Tres años luego de la investigación de Tang, A. Ghalambor y otros presentaron un trabajo en el cual se realiza el cañoneo en extremo sobrebalance; expresan que al realizar el proceso en esta condición se forman microfracturas, las cuales no son uniformes en longitud y tamaño pero sí en su dirección; dichas fracturas cumplen la función de superar la zona compactada y conectar el crudo con el pozo.

En el modelo propuesto, todos los nodos en el borde del modelo se fijan, excepto los localizados en el eje del cañoneo que se pueden desplazar. Los demás nodos del bloque pueden desplazarse y rotar libremente. Luego de este estudio se pudo comprobar que las fracturas tienden a originarse en la dirección del esfuerzo máximo principal. Si el cañoneo se orienta en dirección del esfuerzo máximo se obtienen hoyos más profundos, mientras que los que no se orienten, a pesar de tener una menor profundidad tendrán fracturas mayores que cubren la misma función de *bypass*.

Con permeabilidad de 1 mD, cañonear en sobrebalance aumenta 62 por ciento el caudal de extracción del crudo, si la permeabilidad se fija en 1.000 mD, sólo se incrementa 14 por ciento (ver figura 5); por lo tanto se recomienda aplicar en formaciones con baja permeabilidad.

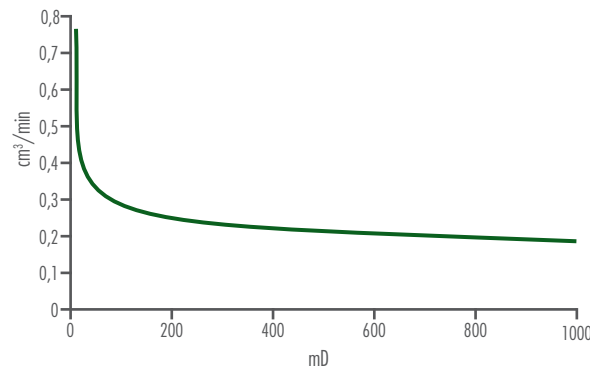


FIGURA 5. INCREMENTO DEL CAUDAL VARIANDO LA PERMEABILIDAD DE LA FORMACIÓN

A.L. Sulbaran y otros, en 1999 prousieron un modelo numérico elastoplástico donde estudiaron un yacimiento en el lago de Maracaibo, el cual tenía formaciones débiles; los esfuerzos *in situ* eran muy elevados además de un alto contraste entre los esfuerzos horizontales máximo y mínimo. El esfuerzo vertical se obtuvo integrando registros de densidad de la roca. Los investigadores tenían conocimientos previos en el análisis del proceso de cañoneo, entre ellos explicaron que al aumentar la densidad de tiro se incrementa el radio de productividad y se disminuye la velocidad de flujo en cada perforación (menor riesgo de arenamiento), pero también se reduce la distancia entre hoyos lo que podría hacer colapsar la formación. Con sólo rotar 25° la dirección del cañoneo en relación con la del esfuerzo máximo horizontal, la deformación plástica equivalente de la periferia de la perforación aumenta de $3,8e-5$ a $6,2e-3$; sin embargo, hasta este valor se considera aceptable para la estabilidad de la perforación. Además nos recomiendan que la distancia entre perforaciones debe ser al menos 3 veces el diámetro que se estima ocupará la zona compactada y que sólo se debe penetrar con *Big-Hole* (menor profundidad pero mayor diámetro de entrada) en formaciones no consolidadas o cuando se planee fracturar hidráulicamente, de lo contrario siempre hacerlo con perforaciones profundas.

En sus resultados se encuentra que si la densidad de tiro es menor a 6 tpp el RP decrece rápidamente, y a más de 8 tpp no hay aumento significativo pero es mayor el riesgo de producir arena (ver figura 6). Se recomienda entre 6 y 8 tpp.

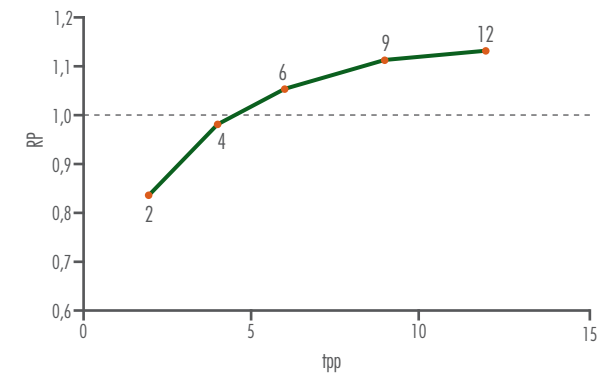


FIGURA 6. RADIO DE PRODUCTIVIDAD VS. DENSIDAD DE TIRO

Con un cañoneo orientado, OPOP (*Optimal Phased and Oriented Perforating*), se presentan grandes mejoras en la producción del pozo. Los promedios en un yacimiento ubicado en el lago de Maracaibo son: a) rata producción de arena 14,3 lbm/kbbl, y b) producción diaria de crudo 1.500 BOPD (producción diaria de barriles); luego de completar con este cañoneo selectivo, se registró 0,5 lbm/kbbl y 4427 BOPD respectivamente.

En 2002, J. Ansah y otros realizaron estudios en modelos numéricos, variaron la longitud de perforación, el diámetro de entrada y la densidad de tiro; a diferencia de estudios previos, agregaron el daño en las perforaciones por la formación de una zona compactada que reducía la permeabilidad de la formación.

Su criterio para validar que sus modelos eran correctos se basaba en que, si el reservorio se diseña con un tamaño 100 veces más grande que el diámetro de la perforación cañoneada, el error por bordes se reduce a 1 por ciento, además de que el espesor vertical mínimo a estudiar debía ser 3 pies.

Adicional al modelo de la formación con la camisa y cemento (las tres perforadas), se diseña un modelo representando el hoyo cañoneado con sus propias condiciones de borde y reducción de permeabilidad (zona compactada), es nombrado *Perforated Core Inflow Model* (PCIM).

El hoyo presenta siete geometrías posibles. El que presentó mejores resultados fue un túnel con forma cónica, en su entrada al revestidor se halló promedio de diámetros y se incrementa en la sección cementada para reducir en la formación (ver figura 7).

Luego del estudio pudieron concluir que en alta anisotropía la geometría del hoyo es de suma importancia para mantener su estabilidad y que determinar el espesor del área compactada es de gran ayuda, porque afecta drásticamente la permeabilidad en la región que rodea la perforación.

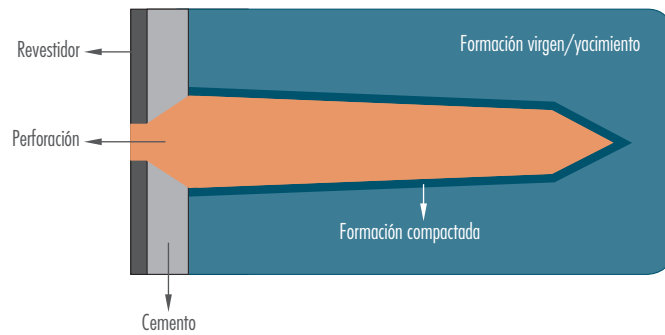


FIGURA 7. GEOMETRÍA DE PERFORACIÓN EN REVESTIDOR-CEMENTO-FORMACIÓN POR CAÑONEO

En ese mismo año (2002), T. Yildiz propuso un modelo semianalítico para representar el proceso de cañoneo; entre sus resultados publicó que en la zona compactada la permeabilidad es 10 por ciento de la original, y el espesor promedio es de 12,7 mm (0,5 pulg.).

El lodo de perforación compacta la roca y reduce la permeabilidad. También logró determinar la importancia de superar la zona compactada y dañada por la perforación del pozo y el cañoneo, en función de incrementar el radio de productividad (ver figura 8). En zonas dañadas (formaciones no consolidadas), las penetraciones profundas reducen la productividad drásticamente. Se recomiendan perforaciones *Big-Hole*.

La perforación selectiva incrementa la productividad en forma drástica; regularmente para cañonear pozos se divide la sección objetivo en diferente intervalos, para cada uno se fija densidad de tiro, patrón y profundidad de perforaciones. Si se determina con precisión las propiedades de la formación (en cada una de sus capas) y la localización del crudo, se puede hasta triplicar el RP con el mismo costo de un cañoneo regular.

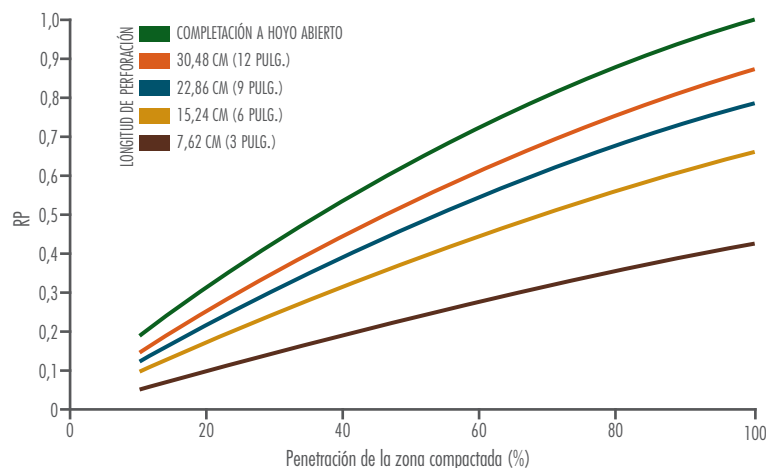


FIGURA 8. IMPACTO DEL RADIO DE PENETRACIÓN EN RELACIÓN CON EL RADIO DE PRODUCTIVIDAD

K. Furui y otros en 2004 publicaron un modelo numérico donde se evalúa el proceso de cañoneo en pozos horizontales; en él tomaron en cuenta el factor “skin” que es el producido al filtrarse en la formación el lodo de perforación o el de completación, reduciendo la permeabilidad y a su vez la producción de crudo o gas.

En este tipo de pozos, el cañoneo se orienta en dirección a la menor permeabilidad, esto reduce el factor “skin” y aumenta el radio de productividad (RP). Con ángulo de fase en 0° o 180° , el factor “skin” debido a la zona compactada se reduce 40 por ciento.

En secciones horizontales muy largas el cañoneo se suele realizar en secciones a hoyo abierto, es decir, sin haber sido cementadas ni revestidas, y con densidades de tiro bajas, hasta 0,5 tpp, sin embargo, cuando la permeabilidad está muy afectada es preferible cementar, esto siempre y cuando el cañoneo supere la zona compactada y haga su función de *bypass*, así se obtendrán valores menores del factor “skin” que en la completación a pozo abierto.

En 2007, J. Zhang y otros (2007) publican su trabajo donde estudiaron la optimización de la geometría, densidad de tiro y orientación de las perforaciones para reducir el riesgo de producción de arena. Nos confirman que para obtener correctas predicciones de producción de arena se debe asumir que los esfuerzos en la formación son anisotrópicos.

Lograron determinar que el esfuerzo máximo (compresión), luego del cañoneo, se encuentra en plano perpendicular a la dirección de perforación, en éste es más probable el pandeo. Además concluyeron que cuando se empieza a producir arena se forma un arco dentro de la formación, este al principio soporta los esfuerzos, pero al fallar empieza el arenado hacia el pozo. Si la presión de poro es muy baja se producen fallas por corte, si es muy alta por tensión. En modelo con densidad de tiro de 4 tpp ya presenta deformaciones plásticas, sin embargo la estabilidad es mucho mayor que con 8 tpp.

Entre las últimas investigaciones realizadas donde se evaluó el rendimiento del proceso de cañoneo se encuentra la ejecutada en 2008 por J. Andrews y otros; ellos realizaron un modelo físico en laboratorio y se guiaron por el criterio de falla propuesto por Drucker-Prager, el cual está basado en el rendimiento sobre elongación plástica efectiva; también se guían en su estudio por la falla según Mohr-Coulomb.

Se modeló un bloque de la formación con una sola perforación vertical y hacia abajo. No toman en cuenta la sección cementada (estimación que se aleja de la realidad), por lo que se tiene una interfase revestidor-formación.

A través del modelo se determinó que el diámetro de la zona compactada es de aproximadamente 2,54 cm (1 pulg.) en la entrada, y que después de una profundidad de 20,32 cm (8 pulg.) este se reduce drásticamente hasta 0,25 cm (0,1 pulg.).

En las investigaciones previas enfocadas a optimizar el proceso de cañoneo se cubre el análisis de influencia que tiene la mayoría de las variables que conforman el sistema, sin embargo, en ninguna de ellas se aprecia la variación y el régimen de los esfuerzos *in situ*; por tal motivo la presente investigación esta dirigida a evaluar dichas variables, y adicionalmente de conocer la posible influencia de la sección de cemento en mantener la estabilidad mecánica de las perforaciones en el sistema revestidor-cemento-formación.

PROCESO DE CAÑONEO DE POZOS PETROLEROS

1. PRINCIPIOS DE LA PERFORACIÓN DE POZOS

El proceso de exploración es el primer paso en la búsqueda de hidrocarburos, y consiste en la identificación de los elementos y condiciones que permiten suponer que en un área determinada existe alta probabilidad de encontrar acumulaciones de petróleo y/o gas. Estas acumulaciones de hidrocarburos se denominan yacimientos, y constituyen el estrato de roca permeable que ocupa el petróleo cuando se descubre al perforar (ver figura 9). La existencia de los yacimientos amerita de ciertos fenómenos geológicos: un estrato poroso y permeable, una capa impermeable superior y una barrera de permeabilidad; o una combinación de ambas que entrapen al petróleo evitando que este continúe su migración (Pino, 2009).

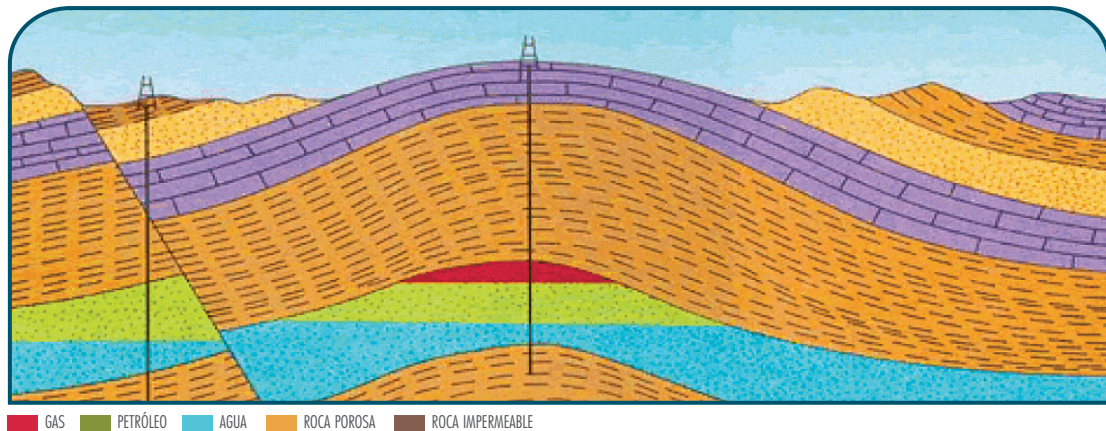


FIGURA 9. CONFIGURACIÓN GEOLÓGICA PARA LA EXISTENCIA DE UN YACIMIENTO (VILLA, 2007)

Con el propósito de identificar estos elementos y condiciones, se utilizan métodos geológicos y geofísicos. Los estudios geológicos en la actualidad se basan únicamente en el análisis del subsuelo, puesto que el trabajo superficial está hecho en su totalidad, sin embargo, se debe resaltar que por algunos años este trabajo fue una herramienta valiosa para la industria en la localización de petróleo.

La exploración geofísica data de comienzos del siglo XX, y actualmente es un instrumento importante en la exploración de petróleo. La base de la mayoría de las técnicas

de exploración geofísica la forman algunas leyes fundamentales de la física; el objetivo principal es la localización de áreas potencialmente favorables para la acumulación de hidrocarburos. Para ello se utilizan métodos superficiales: gravimétrico, magnético, sísmico; además se usan métodos de subsuelo, como registros de tiempo de perforación, espesor, densidad, etcétera.

A partir de los estudios geológicos y geofísicos, es posible llegar a la conclusión de si vale la pena o no realizar la perforación y construcción de un pozo. No obstante, ésta es la única forma de verificar la existencia de un yacimiento; pero cuando se decide iniciar la perforación de un pozo no sólo se busca demostrar que existe la acumulación de hidrocarburo, sino determinar que su extracción y comercialización son factibles y rentables en términos económicos. Es importante destacar que únicamente en uno de cada diez pozos exploratorios se halla petróleo, y que sólo dos de cada cien dan resultados que permiten su explotación de forma rentable. Por esta razón, después del trabajo de exploración, se realiza la caracterización del yacimiento, la cual permitirá la cuantificación de las reservas de hidrocarburo en términos de barriles. Sin embargo, estas reservas en el subsuelo sólo tienen un valor potencial, por lo que es necesario colocarlas en superficie para comercializarlas y que adquieran un valor real, y es allí donde la perforación cubre un papel fundamental, ya que proporciona un conducto entre el yacimiento y la superficie (McCray y Cole, 1970).

2. PROCESO DE PERFORACIÓN

La perforación de pozos es un proceso que se debe realizar ordenada y metódicamente, y debe ser llevado a cabo dentro de un margen económico preestablecido, cumpliendo normas de seguridad, higiene y ambiente. El principal objetivo de la perforación es proporcionar un conducto entre el yacimiento y la superficie que permita la explotación de los fluidos almacenados en el mismo. El cumplimiento de este objetivo depende en gran medida del desempeño de un gran número de profesionales que intervienen en el proceso de perforación, quienes se encargan de diseñar, planificar, determinar, ejecutar y supervisar el programa para la construcción de un pozo (Smith, 1991).

La perforación se realiza con mechas de diámetro adecuado, el cual se va disminuyendo a medida que se profundiza, de manera que el hoyo adquiera una forma telescópica (CBHE, 2006). El proceso de construcción de un pozo vertical se inicia bajando la mecha

para perforar el hoyo superficial o la primera sección; una vez que se alcanza la profundidad programada, se asienta el revestidor de superficie e inmediatamente se procede a continuar con la perforación introduciendo una mecha de menor diámetro para construir la sección intermedia del hoyo, al asentar el revestidor intermedio se inicia el proceso de cementación; en primera instancia se hace fluir un líquido que al salir por el espacio anular entre la tubería y la formación arrastra el lodo de perforación y limpia las paredes de posibles revoques que se hayan formado por la adherencia con el lodo, esto mejora el contacto del cemento con la formación; inmediatamente después de este limpiador pasa un separador, cuya única función es aislar la lechada del limpiador; el cemento cubre el espacio anular que se planificó llenar y se deja fraguar.

Este proceso se repite tantas veces como revestidores se hayan programado; los pozos revestidos y cementados tienen una mayor estabilidad, pues reducen drásticamente las posibilidades de colapso en la formación (Sullaway, 1991). Finalmente se asienta el revestidor de producción, a través del cual se extraerán los fluidos de la zona productora, donde se realiza la terminación del pozo. La forma más común es mediante el cañoneo (ver figura 10).

El pozo puede perforarse en forma vertical, horizontal o inclinada. Cada sección del hoyo se protege al introducir y cementar el revestidor de diámetro adecuado para cada tamaño. La profundidad total y la desviación o perfil del pozo dependen de la profundidad y la ubicación de la trampa estructural o estratigráfica que contiene la acumulación de hidrocarburos. Esta información en conjunto con los diámetros del hoyo, los requerimientos de potencia, las dimensiones de la sarta de perforación, el programa de revestimientos y los potenciales problemas de hoyo, son los principales parámetros a tomar en cuenta para seleccionar el equipo de perforación y su capacidad (Rempu, 2011).

En resumen, las operaciones durante la construcción de un pozo se inician con la mudanza del taladro, la cual consiste en el transporte e instalación de los equipos y materiales necesarios para la construcción del pozo. Una vez que el equipo ha sido instalado se inicia el proceso de perforación, que incluye el tiempo rotando y los tiempos de viaje, el primero se refiere al tiempo efectivo de la perforación, durante el cual se rota la mecha y se circula el fluido de perforación; los viajes incluyen las sacadas y metidas de la sarta para cambiar la mecha, este proceso de perforación se realiza por cada sección del pozo. Posteriormente se inicia el proceso de correr la tubería de revestimiento, en el cual se baja el revestidor hasta la profundidad programada de asentamiento, para iniciar el proceso de cementación, que consiste en preparar y bombear una lechada de cemento de acuerdo con las características

de la formación, para consolidar el hoyo y proteger la formación, una vez que este proceso se ha llevado a cabo hasta la última sección ha terminado el proceso de construcción del pozo. Posteriormente se sigue una técnica conocida como terminación de pozos, que consiste en instalar el equipo que pondrá a producir petróleo, gas o agua.

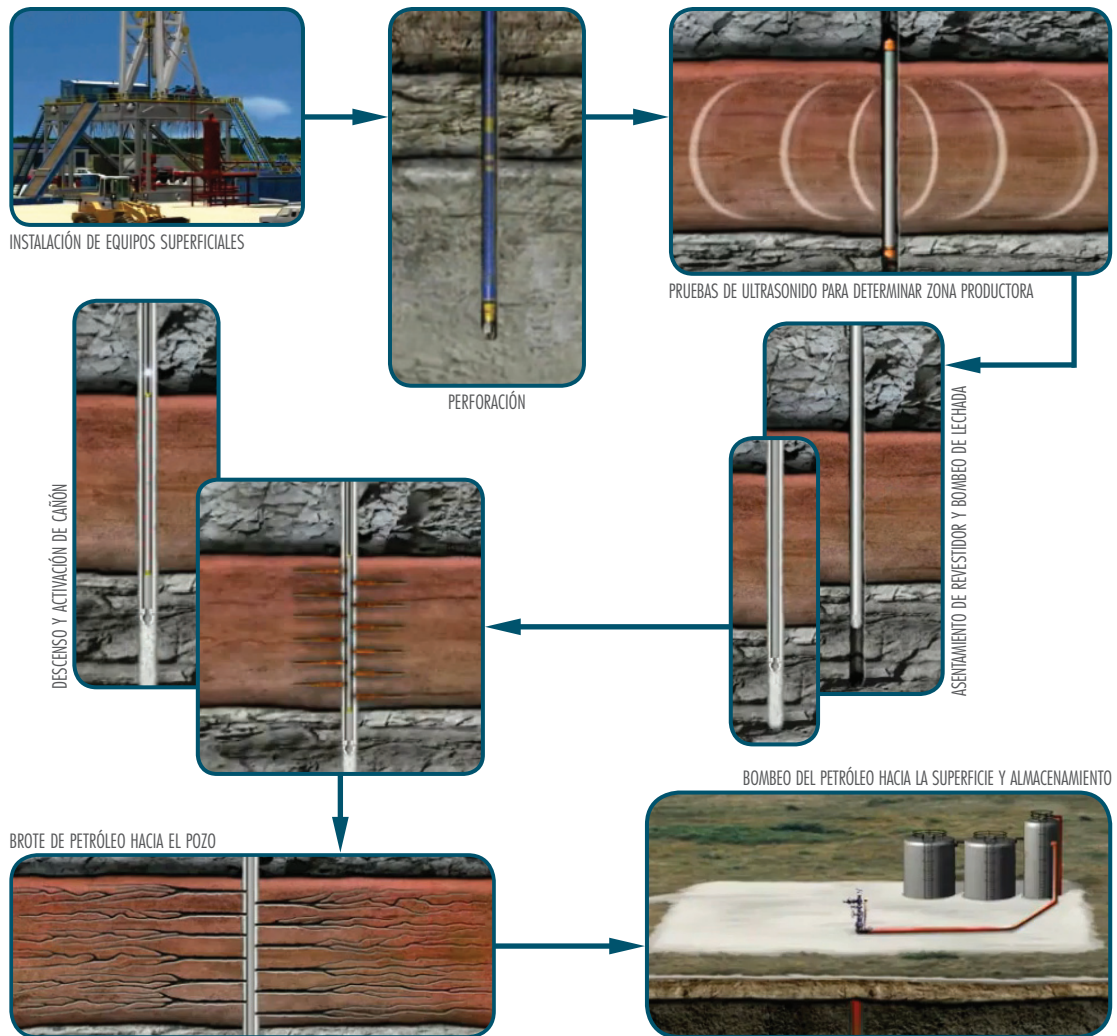


FIGURA 10. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE UN POZO VERTICAL

2.1. Terminación del pozo

Una vez finalizadas las tareas de perforación, la formación debe ser probada y evaluada para determinar si el pozo debe ser terminado para producir o si, en su defecto, debe ser abandonado. La terminación de un pozo es una operación compleja y muy importante ya

que define la vida productiva del pozo. Esta complejidad está determinada por: el tipo de roca que constituye la formación; el tipo de pozo (la geometría que se formó al perforar: vertical, horizontal, en S, S especial, etcétera); el daño a la formación causado por el fluido de perforación (lodo); los requerimientos de estimulación y rehabilitación, y los mecanismos de producción del yacimiento.

La elección de la terminación debe ajustarse al tipo y a la mecánica del flujo: del yacimiento al pozo y del fondo del pozo a la superficie, como también al tipo de crudo. Si el yacimiento tiene suficiente presión para expeler petróleo hasta la superficie, al pozo se le cataloga como de flujo natural. Pero si la presión es suficiente para que el petróleo llegue nada más que hasta cierto nivel en el pozo, entonces se hará producir por medio de bombeo mecánico, hidráulico o por levantamiento artificial a gas (Barberii, 1998).

2.2. Fluido de perforación

En el proceso de construcción de pozos, los fluidos de perforación se hacen circular dentro del hoyo para cumplir una serie de funciones vitales en la perforación rotatoria; y, por lo tanto, éste debe ser diseñado para brindar las condiciones óptimas y protección de la formación a un costo aceptable.

La circulación de dicho fluido se inicia al comenzar la perforación y sólo debe interrumpirse al agregar cada tubo, o durante el tiempo que dure el viaje que se genere por el cambio de la mecha. El pozo debe mantenerse siempre con circulación o lleno de fluido de perforación, pues la falla o descuido en el control de esta condición de trabajo puede ocasionar desde el derrumbe del pozo hasta el total descontrol de la presión de las potenciales capas productivas que se perforen, generando “surgencias” fuera de control con consecuencias tales como incendios, pérdidas de equipos, de vidas humanas y daños al ambiente (Prieto, 1997).

El fluido de perforación cubre varias funciones en este proceso, entre ellas:

- Transportar los ripios de perforación, derrumbes o cortes desde el fondo del hoyo hasta la superficie.
- Limpiar, enfriar y lubricar la mecha y la sarta de perforación, –formaciones con gran dureza pueden dañar los dientes de la mecha– (ver figura 11).
- Prevenir derrumbes de formación soportando las paredes del hoyo.
- Ayudar a soportar, por flotación, el peso de la sarta de perforación y del revestimiento.
- Transmitir la potencia hidráulica a la formación por debajo de la mecha.

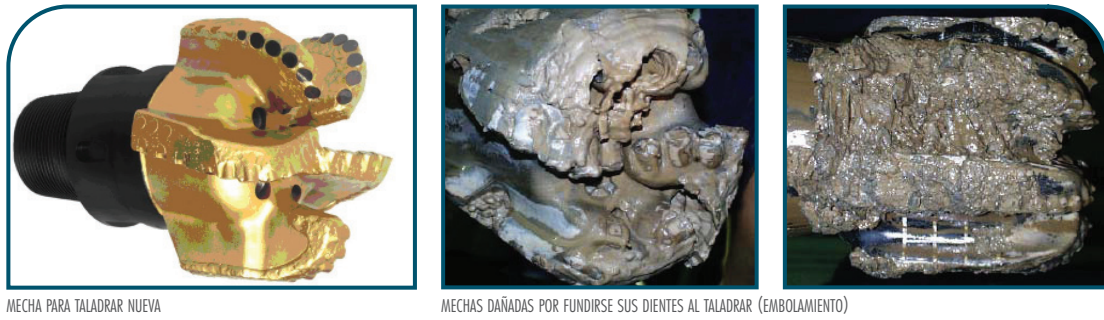


FIGURA 11. BARRENAS PETROLERAS (PRIETO, 2007)

Adicional a estas funciones que cumple el lodo de perforación en el proceso de perforación, se deben agregar dos que afectan drásticamente el proceso de completación del pozo, lo que conlleva a aplicar cañoneo de pozos en forma casi obligatoria, estos son:

- Controlar las presiones de la formación.
- Suministrar un revoque liso, delgado e impermeable para proteger la productividad de la formación.

2.2.1. Controlar las presiones de la formación

El fluido de perforación se prepara con la finalidad de contrarrestar la presión natural de los fluidos en las formaciones. Se debe alcanzar un equilibrio justo, es decir, un equilibrio tal en el que la presión ejercida por el fluido de perforación (presión hidrostática) contra las paredes del pozo sea suficiente para contrarrestar la presión que ejercen los fluidos que se encuentran en las formaciones, el petróleo y el gas; pero que, además, no sea tan fuerte como para dañar el pozo. Si el peso del fluido de perforación fuese muy grande, podría provocar la fractura de la roca y el fluido de perforación se perdería hacia la formación (Gatlin, 1960).

Existen tres formas básicas de llevar a cabo el proceso de perforación del pozo, y estas dependen de la relación entre la presión hidrostática y la presión de formación:

- Balance: cuando la presión hidrostática es igual a la presión de formación.
- Bajobalance: cuando la presión hidrostática es menor que la presión de formación.
- Sobrebalance: cuando la presión hidrostática es mayor que la presión de formación.

En el argot petrolero, se denomina presión hidrostática a la presión ejercida por un fluido sobre el fondo de un pozo a determinada profundidad. Ésta es directamente proporcional a la densidad del fluido de perforación y a la altura de la columna de fluido de perforación y puede determinarse a través de la ecuación 1.1.

$$P_H = 0,052 h \rho$$

EC. 1.1

donde:

P_H : presión hidrostática, lppc

ρ : densidad del fluido de perforación, lpg

h : altura de la columna de fluido, pies

2.2.2. Suministrar un revoque liso, delgado e impermeable

Un revoque es un recubrimiento impermeable que se forma en la pared del hoyo, debido al proceso de filtración, el cual puede ocurrir bajo condiciones tanto dinámicas como estáticas, durante las operaciones de perforación. La filtración bajo condiciones dinámicas ocurre mientras el fluido de perforación está circulando, y bajo condiciones estáticas cuando se acoplan las conexiones o se realizan los viajes.

Los fluidos de perforación se componen de una fase líquida y partículas sólidas. La filtración se refiere a la acción mediante la cual la presión diferencial hace entrar a la fase líquida del fluido de perforación dentro de una formación permeable. Durante este proceso, las partículas sólidas son filtradas, formando un revoque. Si la fase líquida también contiene un líquido inmiscible entonces las gotas del líquido también se depositarán en el revoque y contribuirán al control de filtración.

Por tanto, se busca que el fluido de perforación forme un revoque fino e impermeable sobre las paredes del pozo, de modo que la tasa de filtración de la fase líquida de dicho fluido a la formación sea baja; pues la presencia de ésta disminuye la permeabilidad efectiva de la arena al fluir petróleo o gas (Gatlin, 1960).

Realizar la perforación en sobrebalance produce la filtración del lodo en la formación. Si el enfoque es sólo en el proceso de cementación, se obtiene un efecto positivo, debido a que se forma un revoque en las paredes de la formación que reduce su permeabilidad y posterior producción de agua hacia el pozo. En líneas generales, esto permite que el cemento fragüe de forma eficiente y cumpla su función de brindar estabilidad al pozo. Cuando el enfoque es la completación y producción del pozo, tener una previa filtración del lodo de perforación ocasiona una zona dañada en la pared de la formación con drástica disminución en la permeabilidad; estos daños pueden ser remediados construyendo caminos que hagan función de *bypass* entre el yacimiento y el pozo, dichos trayectos se realizan mediante el cañoneo.

3. CAÑONEO DE POZOS

Consiste en el proceso de creación de una trayectoria eficiente de comunicación entre el yacimiento y el pozo empleando para ello un sistema de carga explosiva-cañón. Para llevar a cabo las operaciones de cañoneo es necesario un conocimiento profundo del yacimiento y del pozo; el éxito de tales operaciones se mide en términos de productividad del yacimiento (Rempu, 2011).

El proceso involucra hacer descender el cañón en el pozo a la profundidad a la cual se desea establecer la comunicación con el yacimiento. Tal proceso comprende la introducción, el descenso, el disparo del sistema de cañoneo en el pozo y su posterior extracción (ver figura 12).

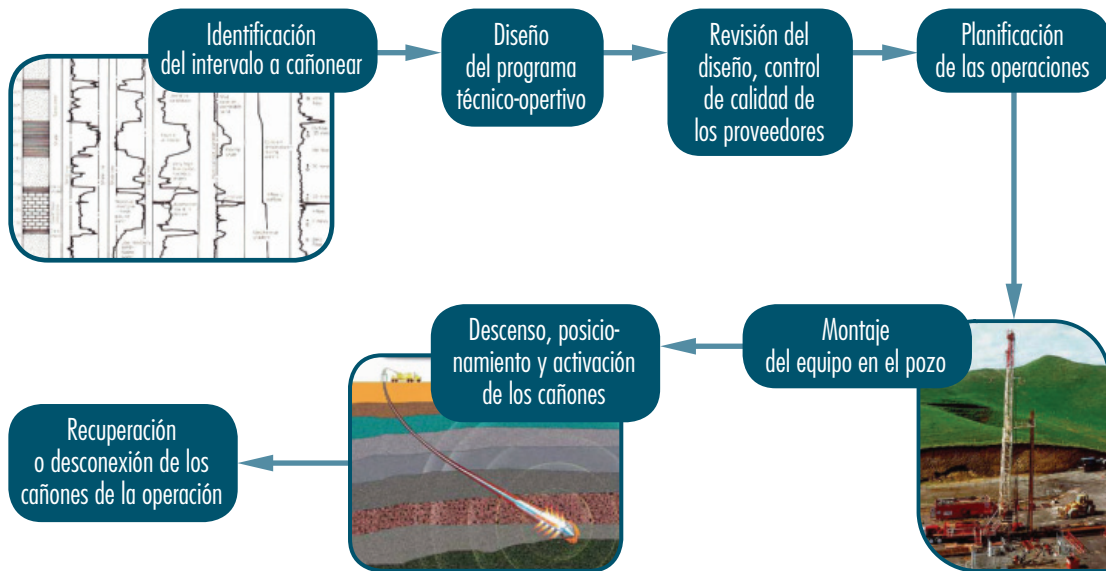


FIGURA 12. DIAGRAMA DEL PROCESO DE CAÑONEO

3.1. Tipos de sistemas de cañoneo

Básicamente existen tres tipos distintos de sistemas de cañoneo: aquellos que se emplean en los pozos revestidos antes de bajar la completación, otros que se bajan y posicionan con la completación, y los que se bajan a través de la sarta de completación (IESL, 2007), estos son:

- Cañoneo con cable o guaya (*casing gun*).
- Sistemas de cañoneo bajados con la completación (*tubing conveyed perforating*).
- Sistemas de cañoneo bajados a través de la tubería de producción (*through-tubing*).

3.1.1. Sistemas de cañoneo con cable o guaya (*casing guns*)

Es el sistema de cañoneo más antiguo y se ha venido empleando con éxito por mucho tiempo. Se aplicaba en los pozos donde la presión del yacimiento se contenía usando el peso del lodo (sobrealance), hoy en día ese no es necesariamente el caso y los cañones a través del revestidor se pueden emplear en condiciones donde la presión del yacimiento puede superar la presión ejercida por el fluido que se emplea en el pozo (bajobalance).

El cañoneo se lleva a cabo por lo general luego de asentar/cementar el revestidor o durante el mantenimiento y limpieza previo a la corrida de la sarta de completación. Otros beneficios del sistema de cañoneo a través del revestidor son:

- Control preciso de la profundidad.
- El empleo de cargas más grandes debido a que el diámetro del cañón es mayor.
- Las operaciones mecánicas son sencillas y confiables.
- Control efectivo del pozo y mayor seguridad.

La figura a continuación ilustra un cañón de este tipo y su sección transversal.

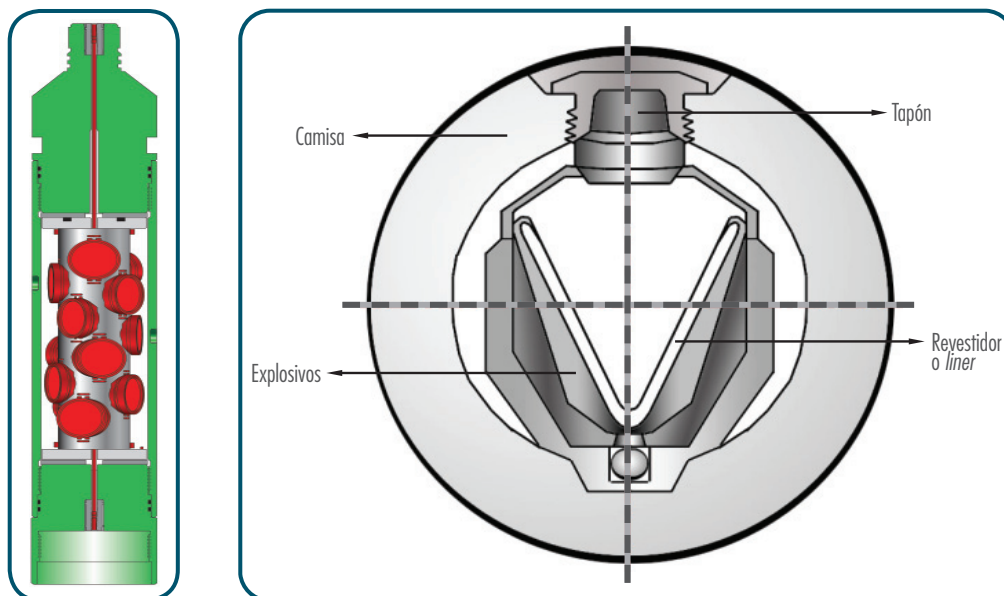


FIGURA 13. CAÑÓN TIPO CASING GUN (HALLIBURTON, 2004 / IESL, 2007)

3.1.3. Sistemas de cañoneo a través de la tubería de producción (*through tubing systems*)

Como su nombre lo indica, estos sistemas se bajan a través de la sarta de completación existente, limitando su aplicación a causa del tamaño de la tubería y de sus componentes

(ver figura 14). El tamaño típico de los cañones es menor a 5,08 cm (2 pulg.), estos sistemas son susceptibles a problemas mecánicos; sin embargo, algunas de sus ventajas son:

- Rápida instalación y recuperación.
- Reducción de costos, ya que no hace falta retirar la completación.
- Mínima pérdida de producción.
- Control preciso de la profundidad.

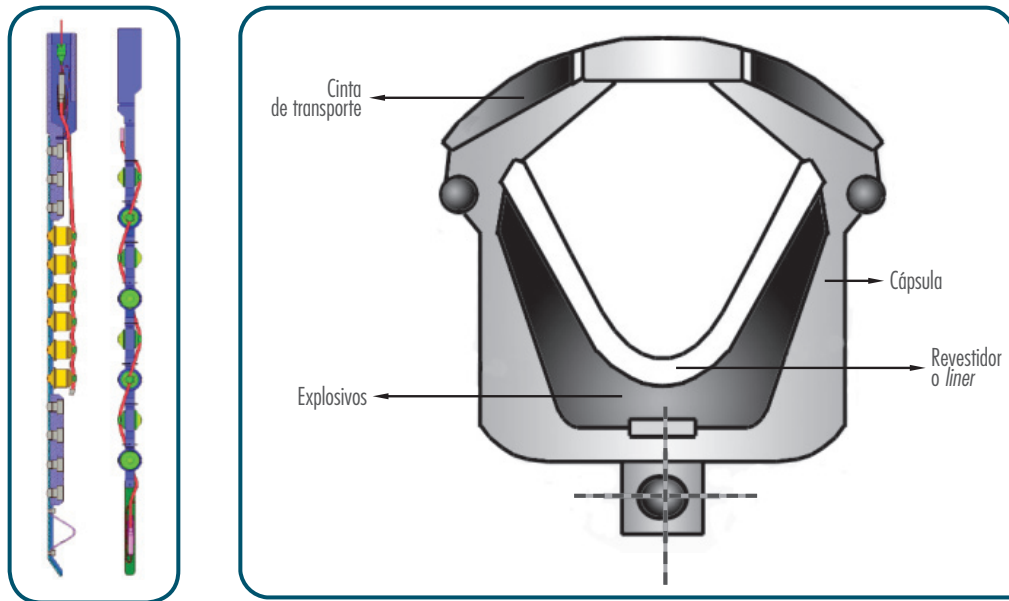


FIGURA 14. CAÑÓN TIPO THROUGH TUBING (OILSERV / IESL, 2007)

3.1.2. Sistemas de cañoneo bajados con la completación (*tubing conveyed perforating, TCP*)

La instalación de sistemas de cañoneo conjuntamente con la completación es relativamente novedosa e implica anexas físicamente el cañón y sus componentes al fondo de la sarta de completación. Este sistema implica la perforación de un hoyo adicional (sumidero) que permite acomodar los cañones en caso de que los mismos caigan dentro del hoyo después de ser activados, lo cual ocurre con frecuencia. Estos sistemas ayudaron a superar las dificultades y restricciones iniciales que presentaba el sistema de cañoneo a través de la tubería de producción, tales como: permitir el control de la presión del pozo, utilizar el máximo diámetro y longitud del cañón, y el control de profundidad, siendo todos estos factores críticos en el cañoneo (Guerra, 2004). Conocidos también como TCP, son un método efectivo y operacionalmente sencillo (ver figura 15). Algunas de sus ventajas son:

- Se puede cañonear secciones de yacimiento largas en una sola corrida.
- Es posible emplear cargas explosivas de mayor potencia.
- Reduce significativamente el tiempo operativo.
- Tiene la ventaja de mejorar la productividad a través del cañoneo en condiciones de bajobalance.

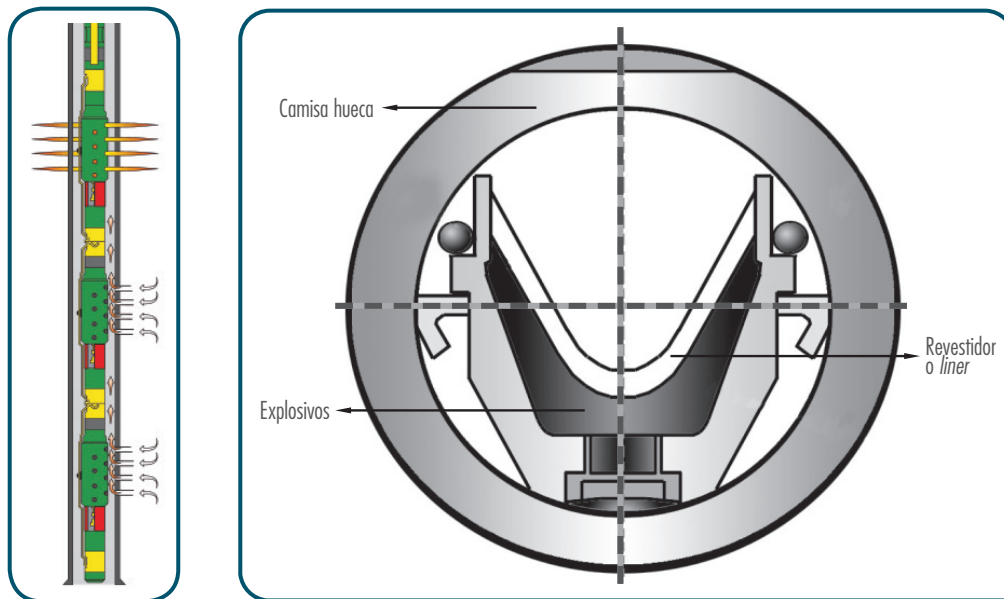


FIGURA 15. CAÑÓN TIPO TUBING CONVEYED PERFORATING (HALLIBURTON, 2004 / IESL, 2007)

3.2. Revestimientos (*liners*) y cargas explosivas

Los revestimientos son aleaciones de metal maquinado a tolerancias muy precisas, las cargas explosivas que se emplean en estas operaciones generan altas presiones y elevadas temperaturas (ver figura 16).

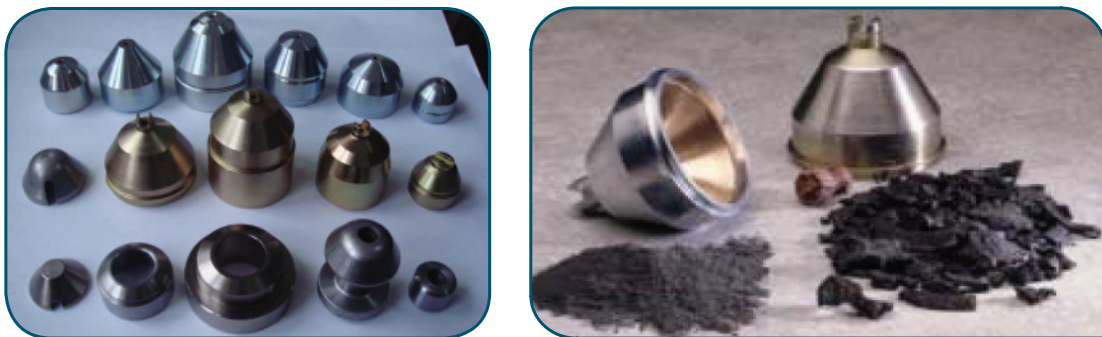


FIGURA 16. LINERS DE CAÑONEO (NINGBO JINGDA / BAKER HUGHES)

Diferentes características del colapso y la penetración resultan en función de la forma y el material del revestimiento. Si la geometría de la camisa (*liner*) es cónica, se formará una penetración relativamente profunda y el diámetro del agujero será pequeño; si el *liner* es parabólico o semiesférico, la penetración será corta pero con un diámetro de orificio grande (ver figura 17). El diseño del revestimiento tiene una enorme influencia en la penetración; la forma del *liner* se utiliza para categorizar los perforadores de chorro, ya sea de penetración profunda (*Deep Penetrating-DP*) o un agujero grande (*Big Hole-BH*). Las cargas DP crean agujeros con diámetros entre 5,08 y 12,7 milímetros (0,2 y 0,5 pulg.) con profundidades de varias decenas de centímetros; éstas son las cargas que se utilizan principalmente para la perforación de formaciones duras. Las cargas BH generalmente se usan para perforar formaciones no consolidadas que requieren alguna forma de control de arena; generan perforaciones con diámetros de entre 15,24 y 38,1 milímetros (0,6 y 1,5 pulg.), de esta manera facilitan la colocación de empaques de grava o de agentes de sostén, y su penetración en las formaciones es de 20 centímetros (8 pulg.) o menos (Halliburton, 2004).

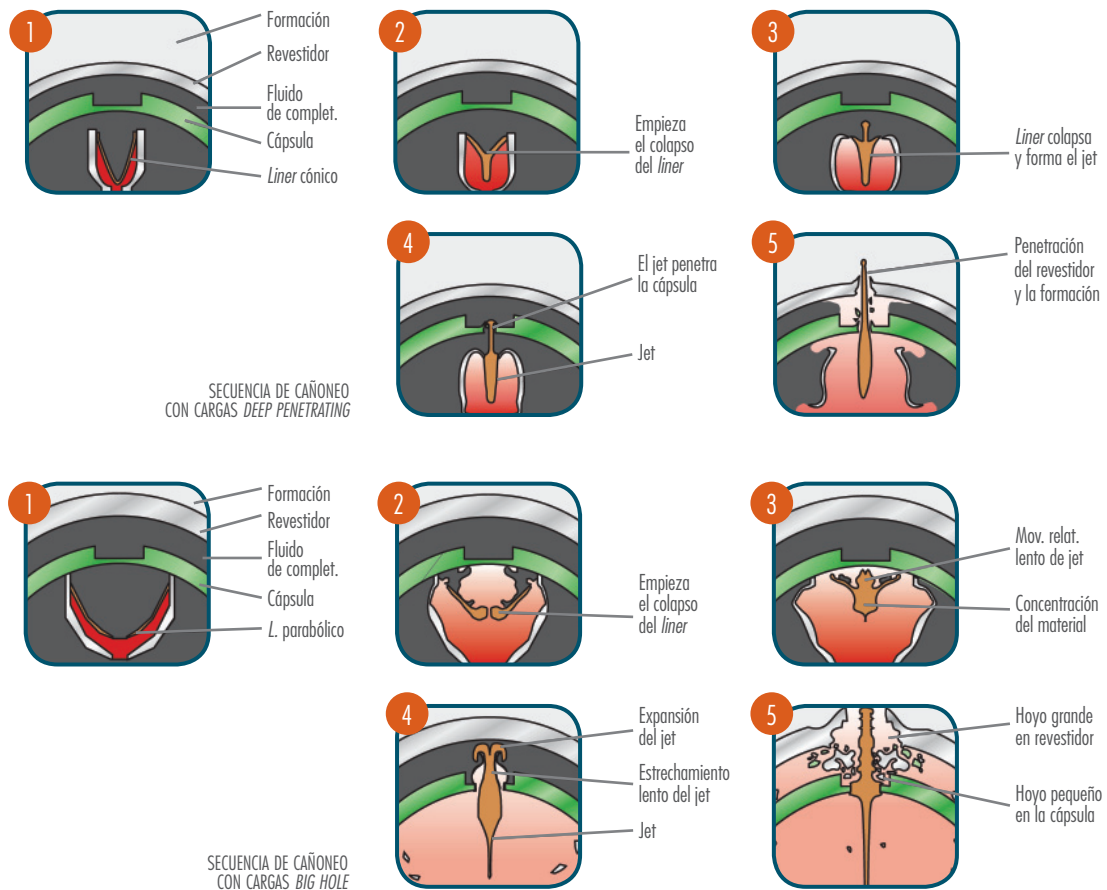


FIGURA 17. SECUENCIAS DEL CAÑONEO, HOYO GRANDE (*BIG HOLE*) Y GRAN PROFUNDIDAD (*DEEP PENETRATING*) (HALLIBURTON, 2004)

4. PRINCIPIOS DE GEOMECÁNICA

Para la generación de un modelo geomecánico es importante establecer el modelo constitutivo del material, el cual va desde modelos sencillos (elástico-lineal) hasta modelos mucho más complejos que requieren de mayor cantidad y calidad de información para poder ser usados, pero que se ajustan mejor a lo que realmente ocurre con la roca. Después de establecer el modelo constitutivo del material, uno de los pasos importantes para construir el modelo geomecánico es la determinación de las propiedades mecánicas de la roca. Aunque se pueden hacer algunas pruebas de campo para determinar ciertos parámetros, la mayoría de los resultados requieren de núcleos y ensayos especializados de laboratorio (Fjaer *et al.*, 1996). Los parámetros mecánicos provenientes de formaciones geológicas pueden ser divididos en tres grupos:

1. Parámetros elásticos; la teoría de elasticidad permite establecer relaciones lineales entre la aplicación de esfuerzos y las deformaciones resultantes para un medio poroso.
2. Parámetros poroelásticos; juegan un rol importante en el acoplamiento entre el fluido y el medio sólido.
3. Parámetros de resistencia; son los dependientes del nivel de carga y pueden ser compresivos o de tensión.

Otro de los aspectos importantes para trabajos de cañoneo es determinar el campo de esfuerzos y la presión de poro antes de cañonear el pozo, así como los esfuerzos inducidos durante el proceso de perforación. Una vez que se tienen las propiedades mecánicas de la formación, el campo de esfuerzos y el tipo de material, es necesario establecer en qué punto la roca va a fallar. Para esto último se utiliza lo que se conoce como criterio de falla.

4.1. Elasticidad y plasticidad

Cuando un material tiene la habilidad de resistir y restituirse de la deformación producida por la aplicación de una fuerza se le conoce como elástico. El caso más simple de elasticidad es cuando existe una relación lineal entre las fuerzas externas aplicadas y las deformaciones generadas por esas fuerzas. Este comportamiento es conocido como elástico lineal. Esto se aplica en los casos en que las fuerzas son suficientemente pequeñas. Si el material presenta un comportamiento lineal, existe una relación entre el esfuerzo (σ) y la deformación (ϵ), como se muestra en la figura 18, la cual es conocida como la Ley de Hooke (ver ecuación 1.2).

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x$$

EC. 1.2

donde E es el módulo de Young, el cual pertenece a un grupo de parámetros conocidos como módulos elásticos. El módulo de Young es la capacidad que tiene el material de deformarse bajo la aplicación de esfuerzos, lo cual quiere decir que el material es más difícil de deformar mientras mayor sea el valor del módulo de Young.

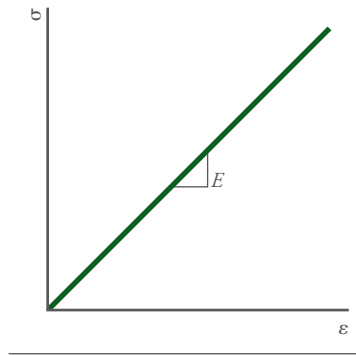


FIGURA 18. ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE UN MATERIAL ELÁSTICO

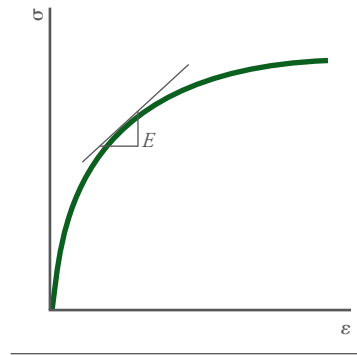


FIGURA 19. ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE UN MATERIAL ELÁSTICO NO LINEAL

El comportamiento elástico lineal no ocurre frecuentemente en la realidad, sino que presenta un comportamiento elástico no lineal (ver figura 19).

Otra consecuencia de la aplicación de esfuerzos axiales es el incremento en el espesor. Esta relación entre la contracción axial (ϵ_x) y la expansión lateral (ϵ_y) se conoce como la relación de Poisson (ν):

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}$$

EC. 1.3

Existen otros tipos de respuestas elásticas, como por ejemplo la viscoelasticidad, donde el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación es dependiente del tiempo.

En el caso específico de mecánica de rocas, las formaciones tienen porosidad y permeabilidad. La teoría de elasticidad para sólidos no es capaz de describir completamente el comportamiento de materiales porosos, por lo que se incorpora el concepto de poroelasticidad y se comienza a hablar de esfuerzo efectivo, introducido originalmente por Terzaghi para suelos y después modificado para rocas (Kang *et al.*, 2009).

$$\sigma = s - \alpha P_0$$

EC. 1.4

donde α es el coeficiente de Biot,

$$\alpha = 1 - \frac{K_b}{K_{ma}}$$

EC. 1.5

donde K_b y K_{ma} son el módulo volumétrico total y de la matriz, respectivamente.

El coeficiente de Biot es un parámetro poroelástico que describe la eficiencia de las presiones de fluidos en contrarrestar los esfuerzos totales aplicados, como se muestra en la figura 20.

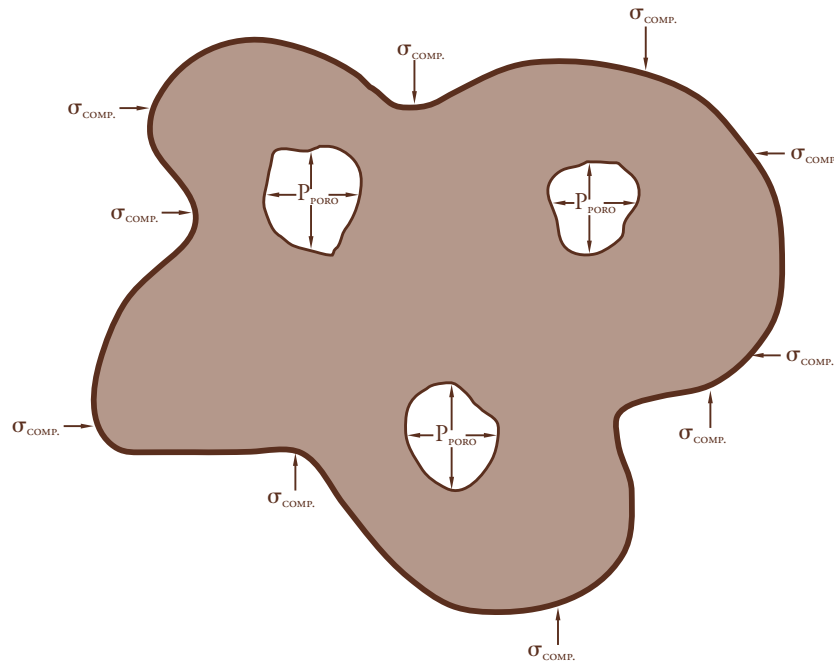


FIGURA 20. REPRESENTACIÓN DE UN MATERIAL POROSO

Los materiales geológicos presentan modelos más complejos y no fallan una vez que alcanzan el punto de cedencia, sino que pueden soportar carga y seguir deformándose antes de fallar. Este tipo de comportamiento se conoce como comportamiento plástico. Existen diferentes leyes constitutivas o modelos teóricos que tratan de reproducir el comportamiento

de la curva esfuerzo-deformación de los materiales, las cuales van desde el comportamiento más sencillo (elástico) hasta comportamientos más complejos, como por ejemplo Clam Clay, usado para estudiar arenas no consolidadas (Fjaer *et al.*, 1996). La figura 21 muestra el comportamiento de una muestra de roca sometida a esfuerzos de compresión en el laboratorio.

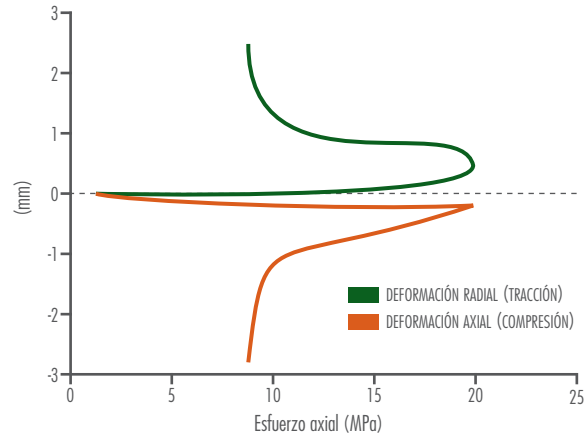


FIGURA 21. ENSAYO TRIAXIAL PARA UNA MUESTRA DE ROCA (IESL, 2007)

4.2. Esfuerzos de campo

Otro de los elementos necesarios para llevar a cabo cualquier estudio de mecánica de rocas es el campo de esfuerzos. Generalmente, se supone que los esfuerzos que actúan en la zona son principales, por lo que se considera un esfuerzo vertical y dos esfuerzos horizontales, los cuales pueden ser iguales (isotrópicos) o diferentes (anisotrópicos). Adicionalmente, el conocimiento de la presión de poro de la formación a estudiar es un factor importante para el análisis (IESL, 2007).

4.2.2. Esfuerzo vertical o de sobrecarga

Mientras va ocurriendo el proceso de sedimentación, las formaciones subyacentes tienen que soportar el material que se va depositando. Esta carga o esfuerzo generado se denomina esfuerzo de sobrecarga o esfuerzo vertical (S_v), como se muestra en la figura 22. El esfuerzo vertical a la profundidad “z” generado por la sobrecarga de los sedimentos es $S_v = \rho g z$. Si la densidad varía con la profundidad, el esfuerzo de sobrecarga puede ser calculado como se muestra (Finkbeiner, 2000):

$$S_z = \int_0^z \rho(z) g dz$$

EC. 1.6

donde $z = 0$ corresponde a la superficie.

Siguiendo lo mencionado, se observa que los valores del esfuerzo vertical total pueden ser estimados de la integración de un registro de densidad. Un valor típico para el average del esfuerzo vertical es 24,85 kPa/m (1,1 lppc/pie).

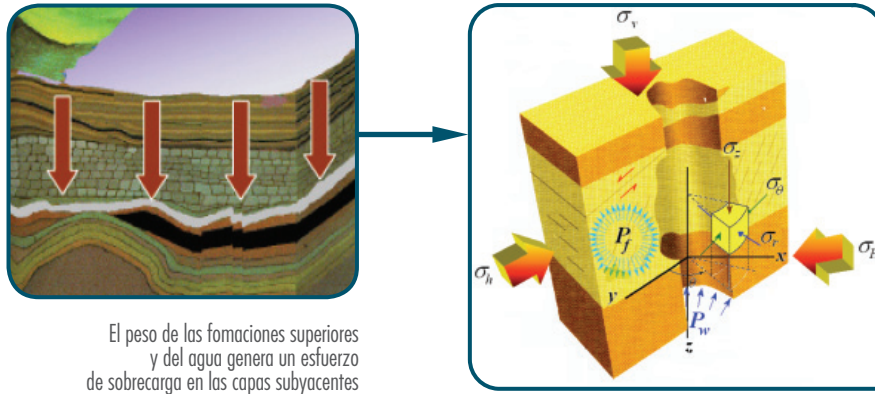


FIGURA 22. ESFUERZOS VERTICALES (SOBRECARGA) (CICCOLAV, 2008)

4.2.3. Esfuerzos horizontales

En el caso de los esfuerzos horizontales es importante determinar tanto la magnitud como la orientación de los mismos. Una de las formas de conocer si existe anisotropía de esfuerzos horizontales (esfuerzos diferentes) en un área es a través de la identificación de las fracturas, las cuales son alargamientos producto de los esfuerzos generados alrededor del hoyo que sobrepasan el esfuerzo necesario para provocar falla por corte en la pared del hoyo (IESL, 2007) (ver figura 23).

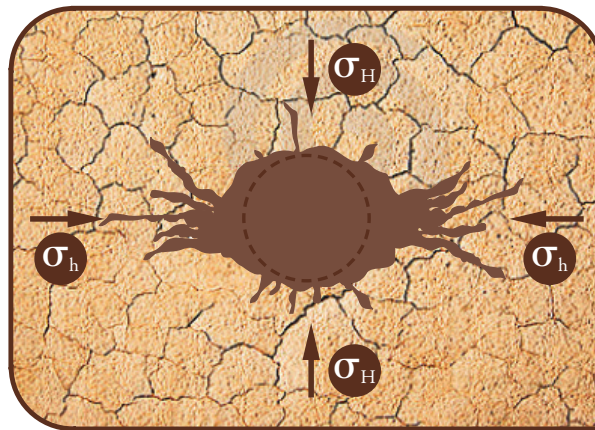


FIGURA 23. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS HORIZONTALES Y FRACTURAS ALREDEDOR DEL HOYO

Magnitud de los esfuerzos horizontales

En el caso de los esfuerzos horizontales es más difícil inferir su valor. La mayoría de los métodos de medición directa para obtener el esfuerzo horizontal mínimo están relacionados con la generación de fracturas en la zona cercana al hoyo. Estas mediciones son pruebas de inyectividad de pozos como *minifrac*s (pruebas que se hacen antes de un trabajo de fracturamiento hidráulico) y pruebas de *extended leak off* (pruebas realizadas durante la etapa de perforación). Este tipo de pruebas no son rutinarias, por lo que se tienen muy pocos datos para obtener el valor del esfuerzo horizontal mínimo.

En la prueba de integridad de presión, ésta se incrementa hasta un valor de peso de lodo preestablecido para la siguiente sección del hoyo y su propósito principal es verificar la calidad de la cementación del revestidor. Esta prueba no alcanza a fracturar la formación.

La siguiente figura ilustra el comportamiento típico y los eventos más representativos en una prueba tipo *leak off*; la presión se mide en función del volumen debido a que la constante medida en el mecanismo que ejerce la presión es la cantidad de aire que se comprime y envía hacia el fondo del pozo.

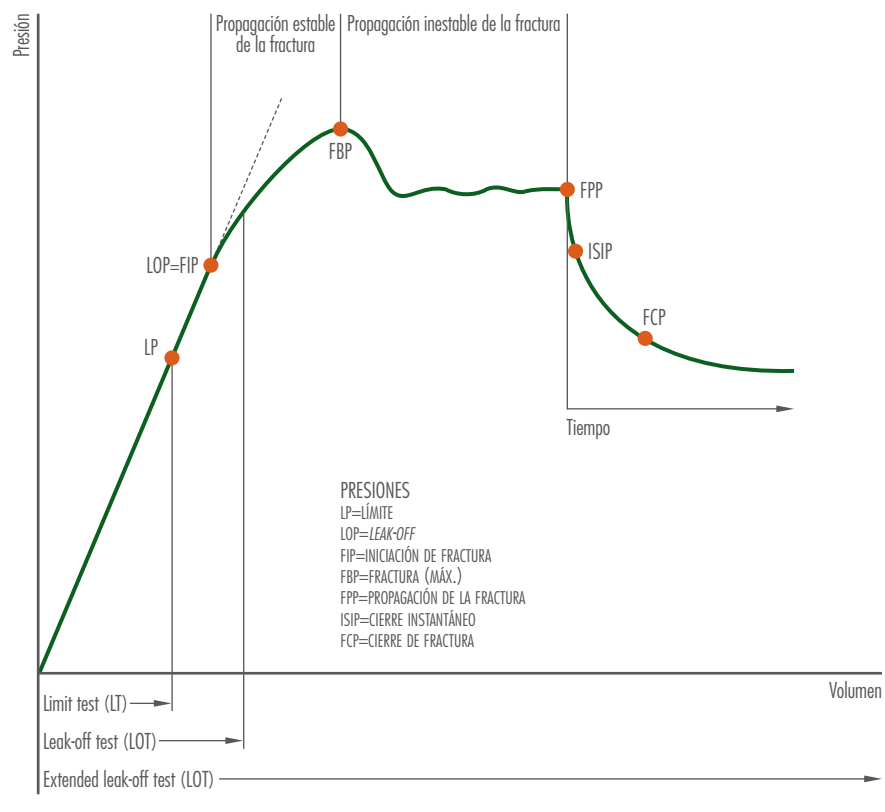


FIGURA 24. PRUEBA TIPO *LEAK-OFF*, VOLUMEN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (IESL, 2007)

- Presión de *leak off* (LOP) o presión de iniciación de fractura (FIP): es el primer punto donde hay una disminución permanente en la pendiente. Generalmente, este valor es igual o mayor al esfuerzo mínimo.
- Presión de ruptura o fractura (FBP): después de la presión de iniciación de fractura o de *leak off*, es el punto máximo de la curva hasta donde aumenta la presión.
- Presión de propagación de la fractura (FPP): es la presión de extensión de la fractura.
- Presión de cierre instantáneo (ISIP): es el valor al cual cae la presión, una vez que la bomba se detiene y desaparece la fricción.
- Presión de cierre de fractura (FCP): es la presión definida como el menor de los esfuerzos principales. Para formaciones bien compactadas, la presión de cierre instantáneo se considera igual a la presión de cierre de la fractura.

Generalmente, no se ejecutan pruebas de *extended leak off* (XLOT), sino sólo se llega hasta la etapa de *leak off* (LOT) o se realiza una prueba de integridad de presión (FIT o LT).

4.2.4. Magnitud relativa de los esfuerzos *in situ*

En 1951, Ernest M. Anderson propuso una descripción del régimen de esfuerzos en función de la magnitud entre el esfuerzo horizontal y vertical de la zona intervenida. El sugirió nombres para las tres configuraciones posibles del régimen de falla (ver figura 25):

- Normal $\sigma_V \geq \sigma_H \geq \sigma_h$
- Transcurrente $\sigma_H \geq \sigma_V \geq \sigma_h$
- Inversa $\sigma_H \geq \sigma_h \geq \sigma_V$

donde los esfuerzos son:

σ_V = vertical

σ_H = horizontal máximo

σ_h = horizontal mínimo

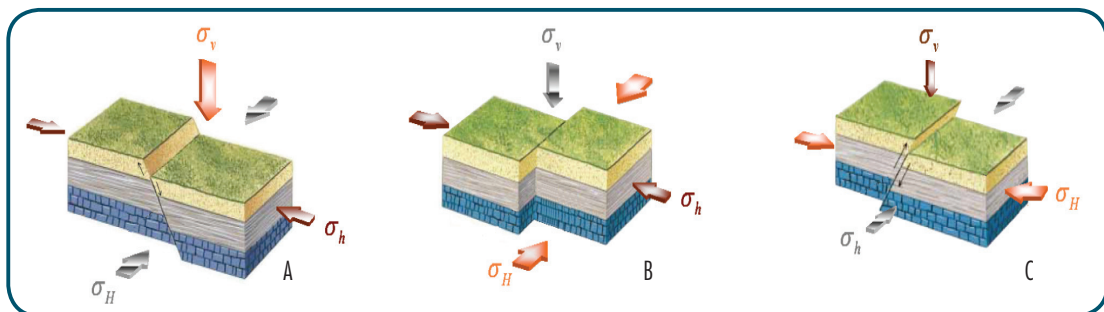


FIGURA 25. RÉGIMENES DE ESFUERZOS *IN SITU*: A)NORMAL, B)TRANSCURRENTE E C)INVERSA

La naturaleza del estado de esfuerzos que existe en cualquier punto dentro de la masa rocosa en el subsuelo es función de todos los procesos geológicos previos que han actuado sobre ésta. Sin embargo, es difícil conocer con un grado de exactitud la historia geológica de la roca, y aunque se tenga conocimiento de ella será improbable cuantificar el estado de esfuerzo en toda la zona debido a que los mecanismos reales de la deformación del material son en sí mismos desconocidos.

Absolutamente no existe justificación de asumir que el esfuerzo horizontal a una profundidad dada está relacionado con la sobrecarga de la roca; ya que cualquiera de los eventos geológicos que ha sufrido la roca pudo haber causado que los esfuerzos horizontales fuesen alterados de manera tal que la sobrecarga pierda relación sobre ella.

En conclusión, es evidente que el estado de esfuerzos no puede ser obtenido del conocimiento geológico del área y mucho menos de las ecuaciones derivadas de la mecánica del continuo. La única vía práctica para determinar la magnitud de los esfuerzos *in situ* es a través de la medición de campo (Almeida, 2007).

4.2.5. Presión de poro

La presión de poro o presión de formación es la que ejerce el fluido contenido en los poros de la roca. La presión de poro soporta parte de los esfuerzos totales aplicados al sistema, liberando a la roca de parte de esta carga. Por lo tanto, éste es un parámetro importante en cualquier estudio de mecánica de rocas (Finkbeiner, T., 2000). La figura 26 muestra las tres categorías en que puede dividirse la presión de poro.

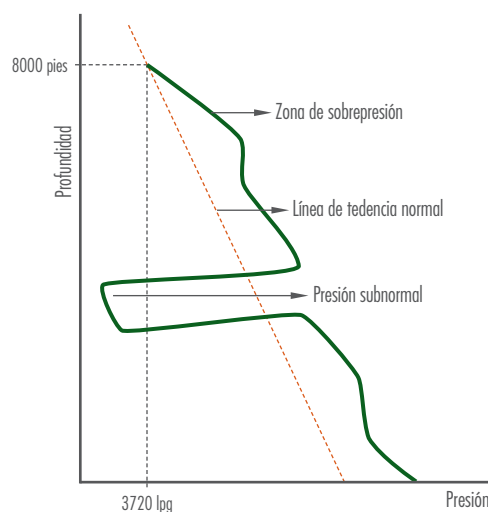


FIGURA 26. PRESIÓN DE PORO EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LA FORMACIÓN

- Presión de poro normal o presión hidrostática: es la presión que se genera por el peso de la columna estática de fluidos, por lo que sólo depende de la altura de la columna y de la densidad del fluido. Las dimensiones y geometría de la columna de fluido no tienen efecto en la presión hidrostática.
- Presión de la formación anormal o sobrepresión: cuando la presión comienza a incrementar más rápido que la tasa normal.
- Presión de la formación subnormal: cuando la presión de poro se encuentra por debajo de la tendencia normal (agotamiento).

Entre los métodos más usados para determinar la presión de poro se encuentran los que suponen que la sobrepresión se genera por el efecto de compactación; el principio se basa en el balance entre la presión de sobrecarga y la habilidad de la formación de poder expeler el agua. Cuando los sedimentos se compactan de manera normal, su porosidad se reduce al mismo tiempo que el fluido del poro sale. Sin embargo, cuando el fluido intersticial tiene dificultad para ser expelido y soporta parte de la sobrecarga, se retarda la velocidad de reducción de la porosidad o incremento de la densidad y se dice que la formación está subcompactada (Muñoz, s/f). Existe una variedad de métodos (cualitativos y cuantitativos) para la detección de presiones anormales, entre los cuales se pueden nombrar:

- Geología regional.
- Métodos a partir de la sísmica.
- Métodos después de la perforación, derivados de registros o de datos de la sísmica.
- Gravimetría.

4.3. Propiedades mecánicas de la roca

Estas propiedades están divididas en dos grandes grupos (estáticas y dinámicas) que se describirán a continuación (Fjaer *et al.*, 1996).

4.3.1. Propiedades estáticas

La forma más común de estudiar las propiedades mecánicas de la roca es a partir de la aplicación de esfuerzos compresivos a muestras cilíndricas, donde la longitud de las mismas debe ser por lo menos dos veces su diámetro –frecuentemente se realizan cilindros de longitud 5,08 cm y diámetro 2,54 cm (2x1 pulg.)–. La roca responde a los esfuerzos cambiando su volumen, deformándose o ambas cosas.

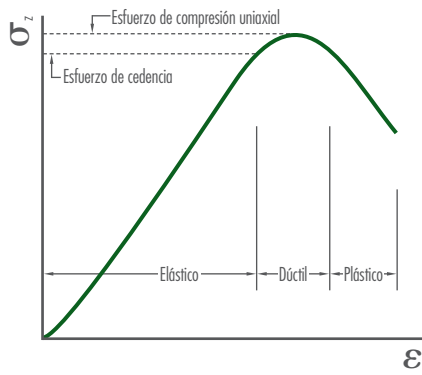


FIGURA 27. ESFUERZO EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN DE UNA ROCA

Los tapones cilíndricos tomados de los núcleos son cortados y preparados para las pruebas estáticas, para cualquier esfuerzo aplicado. Las deformaciones laterales y axiales pueden ser medidas con extensómetros o con medidores de desplazamiento, obteniendo, finalmente, una curva esfuerzo-deformación similar a la mostrada en la figura 27, donde se pueden observar los diferentes estados de deformación que puede alcanzar la muestra:

- Región elástica: la roca se deforma con la aplicación de los esfuerzos, pero puede regresar a su estado original una vez cesen los esfuerzos.
- Esfuerzo de cedencia: es el punto después del cual los cambios son permanentes y la muestra no puede volver al estado inicial, al cesar los esfuerzos.
- Resistencia a la compresión uniaxial: el punto máximo de la curva esfuerzo-deformación.
- Región dúctil: la roca sufre deformación permanente, sin perder la capacidad de resistir carga.
- Región frágil: la capacidad de la muestra de soportar los esfuerzos decrece rápidamente con el aumento de la deformación.

4.3.2. Propiedades dinámicas

Para determinar las propiedades mecánicas a partir de análisis de campo es necesario correr registros acústicos en el pozo. La herramienta de perfil acústico mide velocidades de propagación de ondas, las cuales –junto con el registro de densidad– permiten obtener parámetros mecánicos dinámicos.

La propagación de las ondas acústicas permite conocer cómo se deforman las rocas elásticamente. Se pueden generar dos tipos de ondas de manera artificial, éstas se propagan a través de la superficie y de las capas de diferente modo; estas ondas son: la de compresión

(P), y la de corte (S). Sus nombres se deben a la naturaleza de la deformación que provocan en el medio de propagación durante su paso. La onda “P” provoca, en respuesta al esfuerzo, un cambio de volumen pero no de forma, mientras que la onda “S” provoca un cambio de forma pero no de volumen.

La propagación de las ondas en un medio geológico está afectada por las propiedades físicas de las rocas. Su velocidad es función directa de la elasticidad y la densidad de la roca. La onda “P” depende de la compresibilidad de la roca “K” y de su rigidez “G” (medidas cuantitativas del cambio de volumen y forma), mientras que la onda “S” sólo depende de la rigidez.

5. IMPACTO DE LAS PROPIEDADES DEL YACIMIENTO EN EL CAÑONEO

Desde la perspectiva del yacimiento existen varios parámetros y condiciones que afectan la capacidad del proceso de cañoneo para establecer una comunicación efectiva con el pozo. La condición existente en la cara del yacimiento en función de la invasión de filtrado y sólidos, el daño mecánico, la presión de poro, así como los esfuerzos *in situ* determinarán el resultado del proceso (Rempu, 2011). A continuación se discuten en detalle cada uno de estos parámetros.

5.1. Daño a la formación

El daño a la formación a causa de la invasión de fluido/sólidos, durante la perforación o en las operaciones de mantenimiento y limpieza, puede impactar considerablemente la longitud, forma y dimensiones del túnel cañoneado. Existen tres tipos de daño a la formación que impactan el proceso de cañoneo:

- El daño causado por la invasión de fluido que ocurre a causa de los fluidos –como el lodo de perforación y la lechada de cemento–, que ingresan a la matriz de la roca.
- La invasión de sólidos que bloquea los poros y que por ende afecta la permeabilidad de la matriz.
- El daño mecánico ocasionado por la perforación al perturbar los esfuerzos *in situ* del campo, generando esfuerzos localizados que promueven la plasticidad y la eventual falla de la roca; esta falla tiende a cambiar las propiedades de la roca en la interfase yacimiento-pozo.

La figura 28 ilustra la invasión de fluido y las zonas que se generan alrededor del hoyo como resultado de ello.

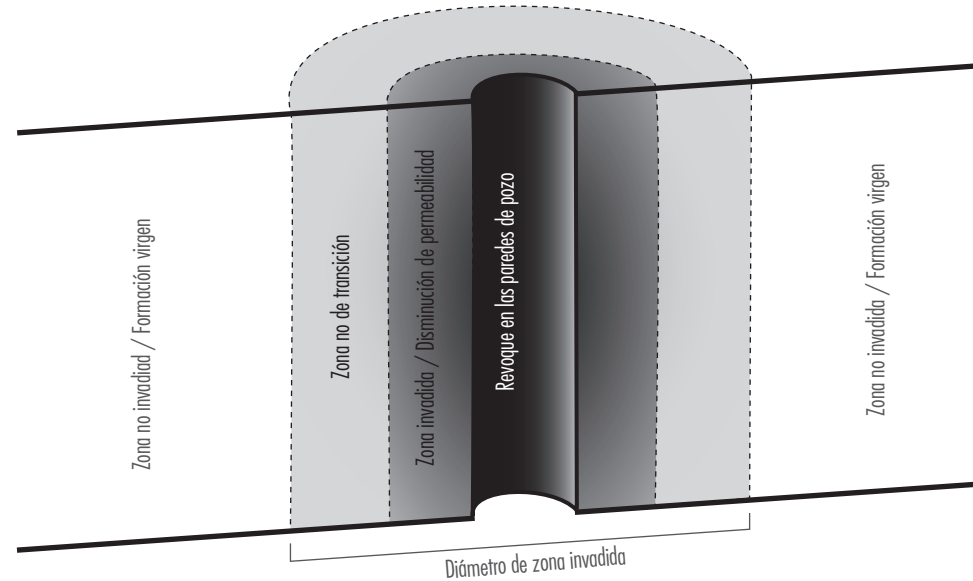


FIGURA 28. DISTINTAS ZONAS CREADAS A RAÍZ DE LA PÉRDIDA DE FLUIDO EN LA FORMACIÓN

Los sólidos en la lechada de cemento y en el lodo de perforación también penetran en la matriz, aunque la extensión de dicha penetración es mucho menos profunda. Una disminución significativa de la permeabilidad como consecuencia del daño causado por estos dos mecanismos tiene un impacto importante en el proceso de cañoneo ya que:

- Afecta adversamente la presión de poro (a causa de la compresibilidad del fluido) a medida que el túnel se crea.
- Impacta la longitud final del túnel a causa de la presencia de una mayor cantidad de sólidos en los poros.
- Impacta la permeabilidad de los alrededores de la zona aledaña al túnel ya que el daño está constituido por deformación mecánica y también por la fractura de la roca.

El impacto de los cambios en las propiedades mecánicas alrededor de las paredes del pozo da como resultado un anillo de roca fracturada o afectada conocido como radio de plasticidad. Dicho anillo está compuesto por la roca que ha cedido y que a su vez ha sufrido cambios, particularmente en la resistencia a la compresión.

5.2. Impacto de la configuración del pozo y de las condiciones de presión

En la pared del pozo también existen una serie de factores que afectan el proceso de cañoneo, pues, una vez que se dispara el cañón el jet viaja desde la camisa del cañón a través del fluido de perforación/completación, atraviesa el revestidor-cemento y penetra en la roca. Como resultado de lo anterior, la dimensión del revestidor y su grado, la presión hidrostática (en la pared del hueco), la tolerancia del cañón y el rendimiento de la carga ejercen un efecto considerable en el éxito del cañoneo, particularmente en el diámetro de entrada (ver figura 29).

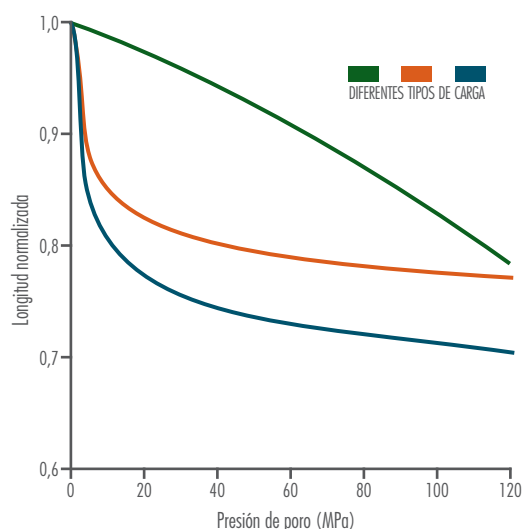


FIGURA 29. IMPACTO DE LA PRESIÓN EN LAS PAREDES DEL POZO EN LA PENETRACIÓN DEL CAÑONEO

5.2.1. Presión en la pared del hueco

Los fluidos del pozo interactúan con el jet al producirse el disparo del cañón y éste viaja hacia el revestidor, la longitud del túnel se puede reducir considerablemente dependiendo del tiempo que el jet esté expuesto a los fluidos del pozo. Esta reducción de penetración en la formación depende de la distancia (tolerancia o separación) entre el cañón y la pared del revestidor. A medida que se empleen fluidos con una mayor densidad, esta interacción tiende a “consumir” más de la energía del jet, lo cual da lugar a túneles más cortos.

5.2.2. Propiedades del revestidor y el cemento

La dimensión del revestidor, su espesor y tipo de acero son factores que afectan el rendimiento del cañoneo. Los ensayos con rayos X han demostrado que el espesor del revestidor

impacta el diámetro del túnel pero no su longitud. El mismo efecto se ha observado en los ensayos realizados con aceros de dureza superior al estándar API RP-43. A continuación se ilustra el efecto del espesor del revestidor sobre el tamaño del diámetro de la entrada del hueco cañoneado (figura 30).



FIGURA 30. EFECTO DEL ESPESOR DEL REVESTIDOR EN EL DIÁMETRO DE ENTRADA DEL TÚNEL

Si nos enfocamos en la capa de cemento, se observa que existen dos aspectos importantes a considerar: primero, su resistencia a la compresión y, segundo, su adhesión al revestidor. Para las lechadas de cemento con una densidad mayor a $1,66 \text{ g/cm}^3$ (14 lpg), la resistencia a la compresión comienza a aumentar significativamente y entonces su interferencia con el jet del cañoneo es muy pequeña.

Sin embargo, para secciones del pozo de mayor diámetro, en las cuales el espesor del cemento es mayor a las 7,62 centímetros (3 pulg.), o en los casos en los cuales se emplean formulaciones nuevas basadas en la variación del tamaño de sus partículas, éstas tienden a producir una mayor resistencia a la compresión. La siguiente gráfica presenta el efecto de la dureza del revestidor sobre el diámetro del túnel.

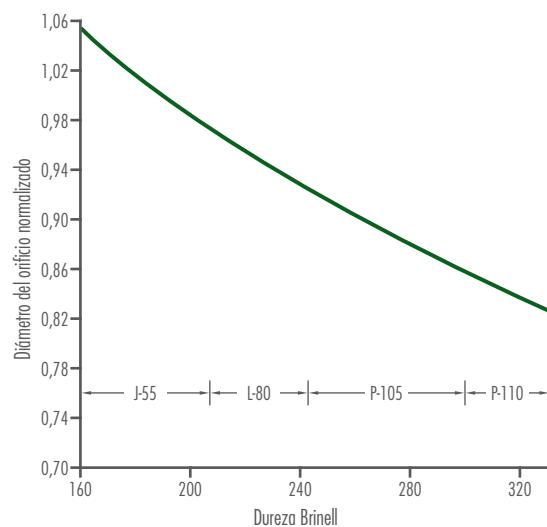


FIGURA 31. EFECTO DE LA DUREZA DEL REVESTIDOR SOBRE EL DIÁMETRO DEL HUECO

5.2.3. Tolerancia revestidor-cañón

La distancia entre el cañón y la superficie del revestidor ejerce, bajo ciertas condiciones, un efecto sobre el diámetro y la longitud del túnel. El efecto es más marcado en el diámetro de entrada que en la penetración.

Si esta distancia sobrepasa 30 por ciento del diámetro del cañón, entonces comienza a afectar la longitud del túnel (ver figura 32). Este efecto se acentúa con cargas de alta penetración (DP), en contrapartida de las cargas para agujeros grandes (BH).

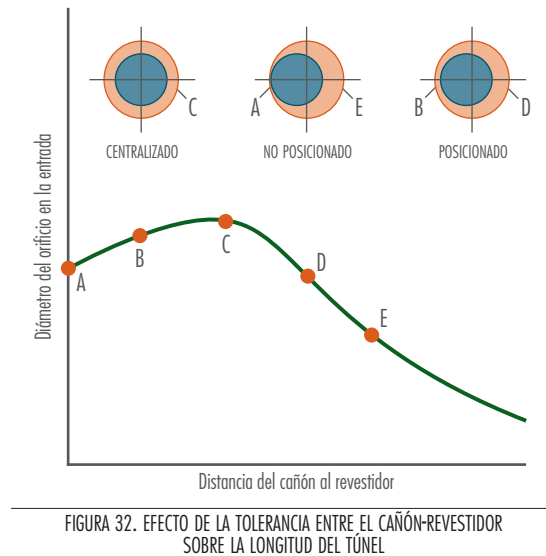


FIGURA 32. EFECTO DE LA TOLERANCIA ENTRE EL CAÑÓN-REVESTIDOR SOBRE LA LONGITUD DEL TÚNEL

La tolerancia óptima del cañón se ve afectada por la configuración del revestidor; de hecho, cuando se emplean sistemas de cañoneo a través de la tubería de producción, es poco lo que se puede hacer para reducir la tolerancia, ya que el diámetro externo del cañón es gobernado por el mínimo diámetro interno de la sarta de completación. El efecto causado por la distancia entre el cañón y el revestidor se puede minimizar en algunos casos empleando herramientas mecánicas como los centralizadores.

6. DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE CAÑONEO

Desde dos décadas, ejecutar el cañoneo de pozos en condiciones de bajobalance se ha considerado como una práctica que mejora la limpieza de la perforación y por ende la productividad. A pesar de que con frecuencia se emplean diferenciales de presión en el orden de

los 3.450 kPa (500 lppc), existen muy pocas razones técnicas que justifiquen estos valores (Rempu, 2011). Cañonear en bajobalance aporta beneficios significativos tales como:

- El diferencial de presión propicia el flujo a través de los túneles.
- El flujo ayuda a la remoción de escombros de los túneles/cavidades.
- La remoción de escombros propicia la exposición de la roca sin daño e incrementa la productividad.
- Se generan caudales de flujo mayores con una menor caída de presión.

Sin embargo, no es posible cañonear todos los pozos en condiciones de bajobalance, ya que el empleo de esta técnica tiene una serie de limitantes como la integridad revestidor/cemento y el riesgo de falla de la roca, lo cual propicia la generación de escombros sólidos. Por lo tanto, el cañoneo en condiciones de bajobalance es apropiado para pozos y yacimientos que poseen una determinada integridad mecánica, y a su vez es una condición que debe acoplarse con un control efectivo sobre el pozo a fin de garantizar la seguridad de la operación.

6.1. Bajobalance dinámico

Bajobalance dinámico es una condición de presión que ha sido identificada durante las operaciones de cañoneo la cual ocurre al momento de disparar el cañón. Es un efecto transitorio que genera una caída de presión muy rápida y corta pero suficiente para generar suficiente flujo del yacimiento hacia el túnel como para minimizar el daño causado por el proceso de cañoneo (Campos *et al.*, 2007).

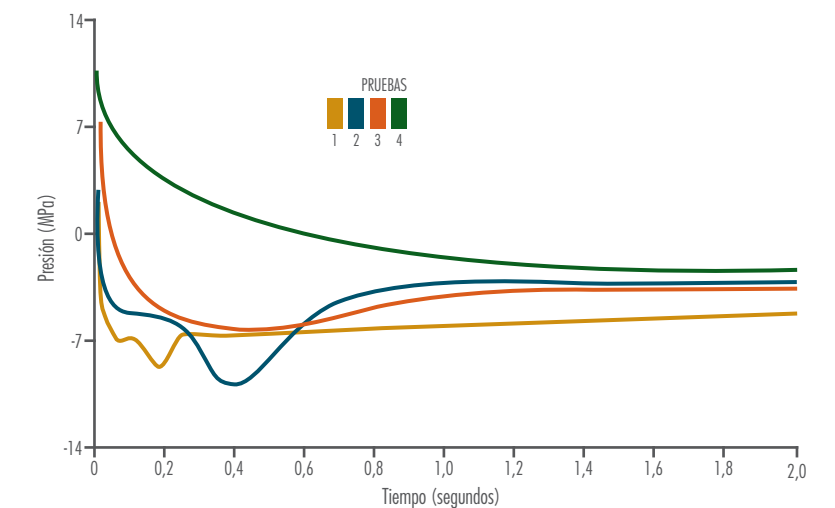


FIGURA 33. PRUEBAS DE BAJOBALANCE DINÁMICO (SCHLUMBERGER)

Este efecto ha sido implementado en la nueva generación de cañones a través del espacio interno vacío dentro de los cañones, este espacio al ser activado el cañón genera un efecto sifón muy rápido y corto el cual es reflejado en la formación. Schlumberger llevó a cabo experimentos donde se aplica un bajobalance de 6.895 kPa (1.000 lppc) y se demuestra su efecto en función del tiempo (ver figura 33).

6.2. Cañoneo sobrebalance

El cañoneo de los pozos en condiciones de sobrebalance era el método más tradicional y común para establecer la comunicación del pozo con el yacimiento. Este método ofrece muchas ventajas en términos de simplicidad, bajo riesgo y costos; sin embargo, una condición de sobrebalance puede afectar negativamente la productividad.

En la práctica, los pozos se cañonean con sólo unos cientos de libras por pulgada cuadrada por encima de la presión del yacimiento, para garantizar así control del pozo y un mínimo de daños a la formación. Cuánta presión ejercer sobre un pozo en particular dependerá de:

- El tipo de hidrocarburos (gas o petróleo).
- La presión del yacimiento.
- La disponibilidad de equipo y las restricciones de presión.

En muchos casos se utilizaba el lodo de perforación como fluido para cañonear, lo cual aumentaba el riesgo de daño a la formación a causa del contenido de sólidos del lodo. Es común que la presión de la columna hidrostática del lodo sea suficiente como para alcanzar la presión de sobrebalance y proceder con el cañoneo de manera segura y, por lo tanto, frecuentemente no es necesario utilizar equipos para control de pozo. Los lineamientos generales para el cañoneo en condición de sobrebalance eran:

$$690 \text{ kPa} < \Delta P_{OB} < 6900 \text{ kPa}$$

EC. 1.7

donde P_{OB} es el grado de presión por encima de la presión de poro.

6.2.1. Cañoneo en condiciones de sobrebalance extremo

El sobrebalance extremo es una técnica relativamente nueva con buenos resultados en algunos casos en los cuales se ha aplicado. Su principio operativo es generar una presión muy alta de sobrebalance a fin de fracturar la roca a medida que se efectúa el cañoneo. De esa

forma, se crea una red de fisuras y fracturas en el área de la pared del pozo y del túnel, lo cual permite contrarrestar el daño y mejorar la productividad.

Hay dos maneras de generar el grado de presión de sobrebalance que se requiere para aplicar esta técnica:

- Aplicación de presión de superficie.
- Generación de una sobrepresión de fondo localizada.

Aplicación de presión de superficie

La aplicación de presión desde la superficie para así generar una condición de sobrebalance implica la presurización completa del pozo y que éste en su totalidad estará sometido al grado de presión necesaria para alcanzar dicha condición.

Esto a veces se combina con un aumento de la densidad del fluido con el cual se va a cañonear, para así minimizar los requerimientos de presión. El riesgo es el de tener presiones muy altas en superficie.

Generación de una sobrepresión de fondo localizada

Para poder generar significativas presiones de sobrebalance en el intervalo a cañonear es necesario aislar dicho intervalo del resto del pozo. Cuando se emplean cañones colocados usando la completación (TCP), se incrementa la presión por medio de la completación o empleando la sarta y aislando con un empaque mecánico en conjunto con una válvula instalados en el intervalo a cañonear. La sarta de completación se puede luego despresurizar y así se limita la exposición de la misma y los efectos adversos de la alta presión.

7. RELACIÓN ENTRE LAS DEFORMACIONES PLÁSTICAS Y EL RIESGO DE PRODUCCIÓN DE ARENA

Existen dos grandes modelos que representan la producción de arena en pozos petroleros: el primero de ellos es a través de una erosión parcialmente acoplada a la presión de poro; y el segundo es donde se evalúa el comportamiento poroelástico de la roca y el arenamiento se convierte en función de la porosidad de la roca; sin embargo, ambas concepciones para estimar la producción de arena se pueden relacionar en una misma fórmula que indica la velocidad de erosión (V_E):

$$V_E = \lambda(1-n)cV_w$$

EC. 1.8

donde:

λ es el coeficiente de producción de arena; n es la porosidad; c es la concentración del transporte –la cual es función directa de la densidad del fluido productor (gas o petróleo)–; y V_w es la velocidad del fluido productor.

El coeficiente de producción de arena (λ) depende de dos constantes de calibración (λ_1 y λ_2) que se determinan empíricamente en la formación donde se emplea el cañoneo (valores típicos para estas constantes son $\lambda_1=4$, y $\lambda_2=0,001$), la relación entre estas constantes y λ se determinan de la siguiente manera (Abaqus [B], 2010):

$$\lambda = \begin{cases} 0 & \text{si } \epsilon^{pl} \leq \epsilon_{\max}^{pl} \\ \lambda_1(\epsilon^{pl} - \epsilon_{\max}^{pl}) & \text{si } \epsilon_{\max}^{pl} \leq \epsilon^{pl} < \epsilon_{\max}^{pl} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \\ \lambda_2 & \text{si } \epsilon_{\max}^{pl} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \leq \epsilon^{pl} \end{cases}$$

donde:

ϵ^{pl} son las deformaciones plásticas, y

$\epsilon_{\max}^{pl}$ es el valor de ϵ^{pl} en el punto de esfuerzo máximo para deformaciones elásticas.

Por lo tanto, la erosión sólo ocurre cuando se excede el valor de esfuerzo máximo para deformaciones elásticas, y consecuentemente se somete la formación a un estado de deformaciones plásticas, lo que disgrega la roca e inicia la producción de arena hacia el pozo.

1. INTRODUCCIÓN

El método de elementos finitos (MEF) ha llegado a ser una herramienta poderosa en la solución numérica de un amplio rango de problemas 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 del flujo de calor, de fluidos, magnético y filtraciones entre otros. Con los avances en la tecnología de las computadoras y de los sistemas CAD (*computer-aided design* / diseño asistido por computadora), pueden modelarse problemas más complejos con relativa facilidad, además son económicos ya que en una computadora pueden probarse varias configuraciones alternas antes de construir el primer prototipo.

Las limitaciones de la mente humana impiden abordar globalmente el comportamiento de los sistemas complejos que existen en la naturaleza. Por este motivo, en cualquier campo se acostumbra a dividir los problemas en componentes más simples, que se pueden comprender básicamente y que le permiten posteriormente reconstruir el comportamiento del sistema global. Éste es el modo habitual como se construyen numerosos modelos teóricos: a partir de un número finito de componentes bien definidos; esta división sucesiva, llevada al límite, conduce al concepto matemático de “infinitesimal” como constituyente elemental de un sistema continuo. Sin embargo, ni la mente humana ni las computadoras, por muy potentes que sean, pueden tratar el número infinito de elementos que constituyen un sistema continuo, salvo en problemas simples que permitan una manipulación matemática exacta. Para sortear estos obstáculos se han desarrollado cierto número de métodos de discretización; todos ellos involucran aproximaciones, pero, afortunadamente, la solución aproximada puede acercarse todo lo que se desee a la solución exacta, con solamente aumentar el número de variables discretas definidas (Miranda, 2003).

Las propiedades del material y las relaciones gobernantes son consideradas sobre esos elementos y expresadas en términos de valores desconocidos en los bordes del elemento. Posteriormente, en un proceso de ensamble, se consideran debidamente las cargas y restricciones, y se da lugar a un conjunto de ecuaciones. La solución de esas ecuaciones nos da el comportamiento aproximado del continuo (Chandrupatla y Belengundu, 1999).

2. ASPECTOS HISTÓRICOS

El método de elementos finitos, por novedoso que parezca, ya tiene varias décadas, al menos en forma conceptual. Se puede citar como bases, el cálculo diferencial e integral propuesto por Isaac Newton a finales del siglo XVII, sin embargo, el desarrollo moderno de esta técnica comienza en 1940, específicamente en el campo de ingeniería estructural, con los trabajos de Hrennikoff en 1941 y McHenry dos años después. Ellos propusieron el uso de líneas en una dimensión para representar elementos como barras o vigas y de esta manera calcular los esfuerzos soportados en sólidos con sección transversal constante.

En una investigación publicada en 1943, el matemático Hartford Courant propuso el arreglo para la solución de esfuerzos, luego añadió la aplicación del método de funciones interpolares sobre subregiones triangulares que conformaban una región entera, obteniendo resultados numéricos aproximados. En 1947, Levy desarrolló el método de flexibilidad y fuerza, pero fue seis años después, en 1953, cuando sugirió la aplicación de una nueva técnica: “El método de rigidez y desplazamiento”, el cual podría ser considerado como alternativa viable para el análisis estático en estructuras de aeronaves. Sin embargo, sus ecuaciones requerían de una gran dedicación y labor para solucionarlas a mano, por lo que dicho método de solución numérica tuvo que esperar la llegada de computadoras de alta velocidad para ofrecer tiempos aceptables de procesamiento.

En 1954 Argyris y Kelsey desarrollan el análisis estructural por medio de matrices, empleando por primera vez métodos energéticos. Este desarrollo marcó una tendencia y logró convertirlo en el principio de análisis energético en la evolución de la técnica de elementos finitos.

La primera vez que se trató de analizar cuerpos de dos dimensiones fue con los trabajos de Turner, quien en 1956 logró la implementación de matrices de rigidez para la determinación de armaduras, elementos conformados por vigas o algún otro cuerpo bidimensional conformado por triángulos y/o rectángulos sometidos a esfuerzo simple. Este procedimiento fue comúnmente conocido como “el método directo de rigidez” y se basa principalmente en obtener una matriz de rigidez de la estructura estudiada. Al mismo tiempo que se desarrollaban las computadoras de relativa alta velocidad a finales de los años 50, trabajos como los de Turner desarrollaron ecuaciones de rigidez fundadas en el método de elementos finitos para la solución matricial de estructuras. Pero no fue sino hasta 1960 cuando la frase “elementos finitos” fue introducida por Clough para describir trabajos donde se usen elementos triangulares y rectangulares para el análisis de esfuerzos.

La técnica de matriz de rigidez para placa rectangular, considerando elementos de flexión, fue desarrollada por Melosh en 1961. A ella le siguió la matriz de rigidez de cáscaras simétricas en los ejes, desarrollada para contenedores de presión en 1963 por Grafton y Strome. Ese mismo año, Martin extendió los alcances y aplicaciones del método de elementos finitos a problemas tridimensionales con el desarrollo de matrices de rigidez tetraédricas. Trabajos adicionales realizados por Gallagher en 1962 y Argyris dos años después completaron la técnica de matrices tetraédricas para el caso de estudio de sólidos simétricos en los ejes.

La mayoría de los trabajos desarrollados para la técnica de elementos finitos, hasta principios de los años 60, se enfocaron en la modelación matemática de problemas mecánicos que contemplaran únicamente deformaciones elásticas, desplazamientos cortos y concentraciones de esfuerzos bajos, en condiciones de modelos con cargas estáticas y materiales elásticos. Sin embargo, deflexiones de gran magnitud y análisis térmico así como la modelación de materiales no lineales aparecieron en 1964 con los trabajos de Gallagher, quien además introdujo el concepto de pandeo de columnas en modelos matemáticos con elementos finitos. Trabajos como los de Zienkiewicz complementaron aún más la técnica, extendiendo los alcances del método a problemas que involucran visco-elasticidad en 1968.

A finales de los años 60, el análisis por elementos finitos tomó un nuevo giro, pues, se empezaron a tomar como referencia los trabajos de modelación matemática a través de métodos energéticos, y se lograron obtener resultados más aproximados a la realidad. Se exploraba la aplicación de estos modelos de energía –aplicados ya anteriormente a la mecánica de sólidos– para la determinación de fallas del material como es el criterio de Von Mises, también conocido como “criterio de máxima energía de distorsión”. Este criterio se basa en la determinación de la energía de distorsión en un material dado, por ejemplo, la energía asociada a los cambios de forma de un material se contrapone a la energía de los cambios en volumen del mismo.

Con este criterio se establece un determinado componente estructural, el cual será seguro siempre y cuando no se exceda el valor máximo de la energía de distorsión por unidad de volumen, en la que para valores típicos del material es la energía por unidad de volumen de distorsión requerida para causar la cedencia en una prueba de tensión al mismo material.

Con el advenimiento de métodos energéticos en la mecánica de sólidos, también fueron introducidos métodos dinámicos en el análisis convencional por elementos finitos. Tal es el caso de los trabajos de Archer quien en 1965 aplicó el análisis dinámico y desarrolló el uso de matrices de masa consistente, las cuales eran aplicables a sistemas de masa residual distribuida en barras y vigas dentro del análisis estructural. Futuras extensiones al método

hicieron posible la adaptación de métodos de peso residual y se comenzó a experimentar con el método de elementos finitos ya que se observó que, al cambiar las ecuaciones de los nodos e implementar nuevas formulaciones, el método de elementos finitos tenía algunas otras aplicaciones además del área de mecánica de materiales y aplicaciones estructurales. Con los trabajos de Melosh se exploraron los campos de flujo de fluidos, torsión de flechas y conducción de calor.

Trabajos posteriores, como los de Lee, encontraron que, cuando las formulaciones directas o las variantes a las mismas son difíciles o imposibles de usar, los modelos de masa residual eran apropiados. Por ejemplo, en 1977 Lyness aplicó el método de masa residual para la determinación de campos magnéticos. En 1976 Balytschko consideró problemas con deformaciones largas, comportamiento dinámico no lineal, y mejoró las técnicas numéricas para la solución de sistemas de ecuaciones, lo que significó un gran avance para la aplicación del método, ya que a partir de los años 80, con la mejora de las computadoras disponibles en el mercado, la aplicación del método de elementos finitos viviría un auge sin precedentes. El rápido y evolutivo mundo de la computación impulsaría a diferentes compañías de *software* a incursionar en el desarrollo de este tipo de aplicaciones, ya que el método de elementos finitos había traspasado las barreras de sus orígenes para el análisis estructural y se había adecuado para una infinidad de aplicaciones y ramas de estudio que van desde la ingeniería de alimentos, pasando por la ingeniería mecánica usada en las carreras de Fórmula 1, la aeroespacial a nivel mundial, hasta la simulación de modelos geostáticos en la industria petrolera (Chandrupatla y Belengundu, 1999).

A continuación se explican conceptos básicos de esfuerzos y equilibrio de la mecánica de sólidos, los cuales son la base fundamental en la aplicación del MEF.

3. PRINCIPIOS DE ESFUERZOS Y EQUILIBRIO

En la figura 34 se muestra un cuerpo tridimensional que ocupa un volumen V y tiene una superficie S . Los puntos en el cuerpo están identificados por las coordenadas x, y, z . La frontera del cuerpo se restringe a la región donde se especifica el desplazamiento. Sobre una parte de la frontera se aplica una fuerza distribuida por unidad de área T , llamada también tracción. Debido a la acción de la fuerza se deforma el cuerpo.

La deformación en un punto $\mathbf{x}$ ($= [x, y, z]^T$) está dada por las tres componentes de su desplazamiento (ver ecuación 2.1).

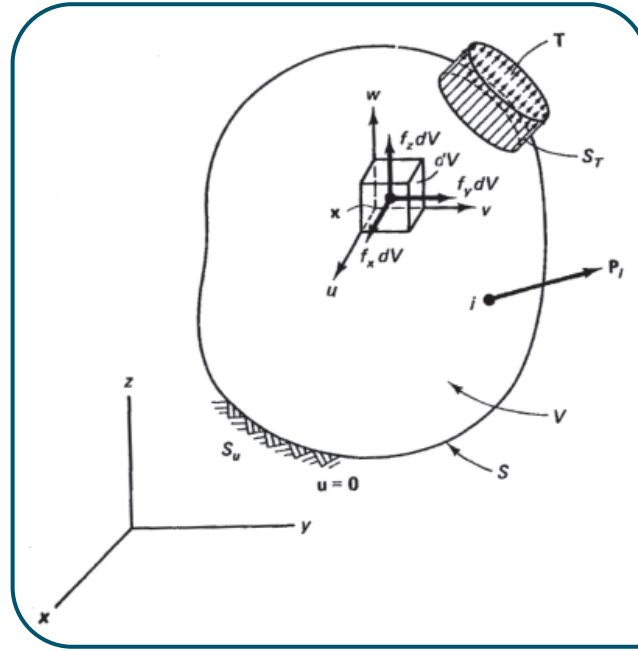


FIGURA 34. CUERPO TRIDIMENSIONAL (CHANDRUPATLA Y BELENGUNDU)

$$\mathbf{u} = [u, v, w]^T$$

EC. 2.1

Una fuerza distribuida por unidad de volumen, por ejemplo, el peso por unidad de volumen, es el vector $\mathbf{f}$ dado por:

$$\mathbf{f} = [f_x, f_y, f_z]^T$$

EC. 2.2

En la figura 34 se muestra la fuerza del cuerpo actuando sobre el volumen elemental dV . La tracción superficial $\mathbf{T}$ puede darse por el valor de sus componentes en puntos sobre la superficie:

$$\mathbf{T} = [T_x, T_y, T_z]^T$$

EC. 2.3

Ejemplos de tracción son las fuerzas de contacto distribuidas y la acción de la presión. Una carga $\mathbf{P}$ actuando en un punto i se representa por sus tres componentes:

$$\mathbf{P}_i = [P_x, P_y, P_z]^T_i$$

EC. 2.4

En la figura 35 se muestran los esfuerzos que actúan sobre el volumen elemental dV ; cuando “se contrae” en un punto, el tensor de esfuerzo se representa colocando sus componentes en una matriz simétrica de 3×3 . Sin embargo, se representan los esfuerzos por medio de sus seis componentes independientes como sigue:

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]^T \quad \text{EC. 2.5}$$

donde $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ son esfuerzos normales y $\tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$ son esfuerzos cortantes. Consideremos el equilibrio del volumen elemental mostrado en la figura 35. Primero obtenemos las fuerzas sobre las caras multiplicando los esfuerzos por las áreas correspondientes. Escribimos $\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$ y $\sum F_z = 0$, y recordando que $dV = dx \, dy \, dz$, obtenemos las ecuaciones de equilibrio:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z &= 0 \end{aligned} \quad \text{EC. 2.6}$$

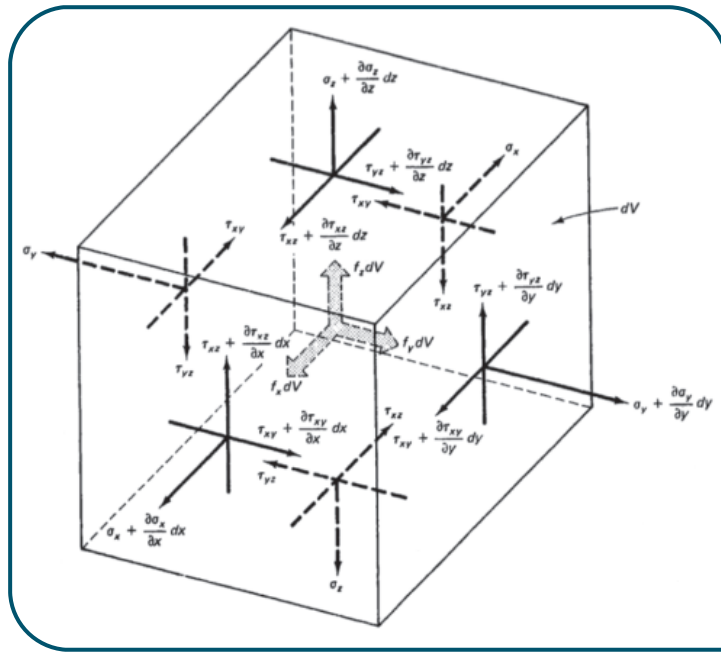


FIGURA 35. EQUILIBRIO DE UN VOLUMEN ELEMENTAL (CHANDRUPATLA Y BELENGUNDU)

3.1. Condiciones de frontera

Refiriéndonos a la figura 34, vemos que hay condiciones de desplazamiento en la frontera y condiciones de carga en la superficie. Si el desplazamiento $\mathbf{u}$ se especifica sobre parte de la frontera denotada por S_u , tenemos:

$$\mathbf{u} = \mathbf{0} \text{ sobre } S_u$$

EC. 2.7

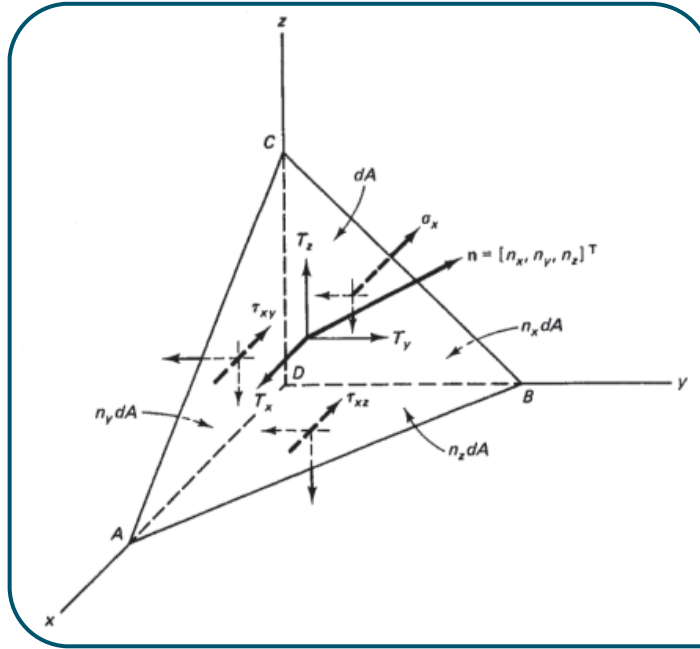


FIGURA 36. VOLUMEN ELEMENTAL EN LA SUPERFICIE (CHANDRUPATLA Y BELENGUNDU)

También se puede considerar condiciones de frontera tales como $\mathbf{u} = \mathbf{a}$, donde $\mathbf{a}$ es un valor conocido. Consideremos ahora el equilibrio del tetraedro elemental $ABCD$, mostrado en la figura 36, donde DA , DB y DC son paralelas a los ejes x , y , z , respectivamente, y dA es el área definida por los vértices ABC . Si $\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z]^T$ es la normal unitaria a dA , entonces el área $BCD = n_x dA$, el área $ADC = n_y dA$ y el área $ADB = n_z dA$. La consideración del equilibrio a lo largo de los tres ejes coordenados da:

$$\begin{aligned} \sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y + \tau_{xz} n_z &= T_x \\ \tau_{xy} n_x + \sigma_y n_y + \tau_{yz} n_z &= T_y \\ \tau_{xz} n_x + \tau_{yz} n_y + \sigma_z n_z &= T_z \end{aligned}$$

EC. 2.8

Esas condiciones deben satisfacerse sobre la frontera S_T , donde se aplican las tracciones. En esta descripción, las cargas puntuales deben tratarse como cargas distribuidas sobre áreas pequeñas pero finitas.

3.2. Relaciones deformación unitaria-desplazamiento

En la siguiente ecuación representamos las deformaciones unitarias en una forma vectorial que corresponde a los esfuerzos,

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}]^T \quad \text{EC. 2.9}$$

donde ε_x , ε_y y ε_z son las deformaciones unitarias normales; γ_{yz} , γ_{xz} y γ_{xy} son las deformaciones angulares unitarias cortantes.

La figura 37 da la deformación de la cara $dx-dy$ para pequeñas deformaciones, que serán las consideradas aquí. Tomando en cuenta también las otras caras, se puede escribir:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \left[\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^T \quad \text{EC. 2.10}$$

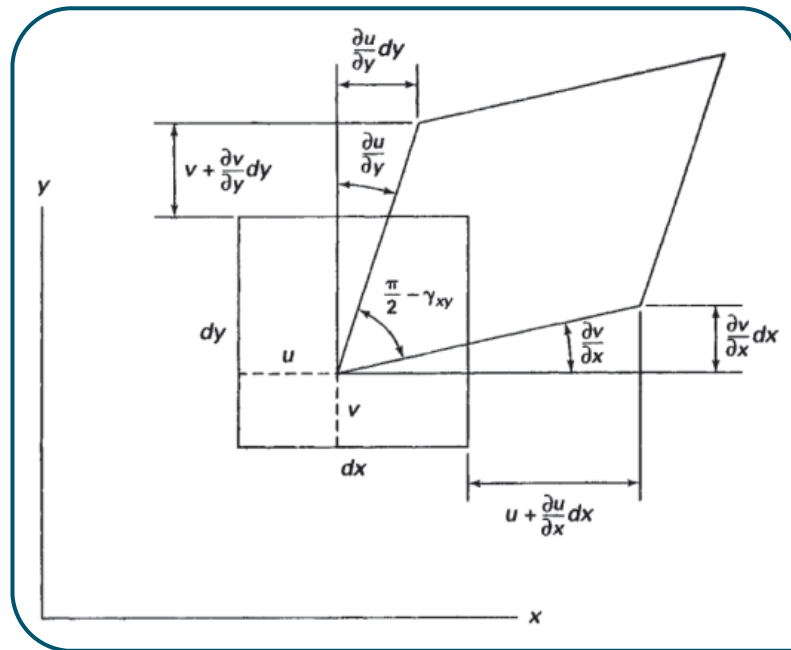


FIGURA 37. VOLUMEN ELEMENTAL EN LA SUPERFICIE (CHANDRUPATLA Y BELENGUNDU)

3.3. Relaciones esfuerzo-deformación unitaria

Para materiales elásticos lineales, las relaciones esfuerzo-deformación unitaria provienen de la Ley de Hooke generalizada. Para materiales isotrópicos, las dos propiedades del material son el módulo de Young (o módulo de elasticidad) E y la relación de Poisson ν . Si se considera un cubo elemental dentro del cuerpo, la Ley de Hooke da:

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\ \epsilon_y &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\ \epsilon_z &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G} \\ \gamma_{xz} &= \frac{\tau_{xz}}{G} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}\end{aligned}\tag{EC. 2.11}$$

El módulo de corte (o módulo de rigidez) G está dado por:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}\tag{EC. 2.12}$$

De las relaciones de la Ley de Hooke (ecuación 2.11), note que:

$$\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = \frac{(1-2\nu)}{E}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\tag{EC. 2.13}$$

Sustituyendo ecuaciones anteriores en la 2.11, obtenemos las relaciones inversas:

$$\sigma = D\epsilon\tag{EC. 2.14}$$

D es la matriz simétrica de (6x6) del material dado por:

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 0 & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu \end{bmatrix} \quad \text{EC. 2.15}$$

Casos especiales:

- a) Una dimensión: tenemos esfuerzos normales σ a lo largo de x , así como la deformación unitaria correspondiente ε . Las relaciones esfuerzo-deformación unitaria son:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{EC. 2.16}$$

- b) Dos dimensiones: se modela esfuerzo plano y deformación unitaria plana.

- Esfuerzo plano: Se dice que un cuerpo plano delgado sometido a carga plana sobre su borde está en esfuerzo plano. Un ejemplo de esto es un anillo ajustado a presión sobre una flecha. Aquí los esfuerzos σ_z , τ_{xz} , τ_{yz} se consideran iguales a cero. Entonces, las relaciones de la Ley de Hooke dan:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \\ \varepsilon_y &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \end{aligned} \quad \text{EC. 2.17}$$

Las relaciones inversas dadas por:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{EC. 2.18}$$

- Deformación unitaria plana: Si un cuerpo largo plano de sección transversal uniforme está sometido a una carga transversal a lo largo de su longitud, un espesor pequeño en el área cargada, puede tratarse como sometido a deformación unitaria plana. Aquí ϵ_z , γ_{zx} y γ_{yz} se consideran iguales a cero. El esfuerzo σ_z puede no ser cero en este caso. Las relaciones esfuerzo-deformación unitaria pueden obtenerse directamente de las ecuaciones 2.14 y 2.15:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{EC. 2.19}$$

aquí $\mathbf{D}$ es una matriz de 3×3 , que relaciona tres esfuerzos con tres deformaciones unitarias.

Los cuerpos anisotrópicos no tienen orientación uniforme y pueden considerarse usando la matriz $\mathbf{D}$ apropiada para el material.

4. PRINCIPIO DE HAMILTON

El principio de Hamilton es una herramienta simple pero potente que puede ser utilizada para obtener sistema de ecuaciones dinámicas discretizadas. Afirma que: “De todas las ecuaciones de desplazamiento admisible, la solución más precisa hace que la función Lagrange sea mínima”.

Un ecuación admisible debe cumplir las siguientes condiciones:

- a) las ecuaciones de compatibilidad,
- b) condiciones de contorno cinemáticas, y
- c) las condiciones en el momento inicial (t_1) y final (t_2).

La primera condición asegura que los desplazamientos sean compatibles en el dominio del problema; la segunda, que las restricciones de desplazamiento son representadas satisfactoriamente, y la última condición se requiere para satisfacer las limitaciones de desplazamiento en los tiempos inicial y final. Matemáticamente, el principio de Hamilton dice lo siguiente:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} L dt = 0 \quad \text{EC. 2.20}$$

La función de Lagrange L , se obtiene mediante un conjunto de desplazamiento:

$$L = T - \Pi + W_f \quad \text{EC. 2.21}$$

donde T es la energía cinética, Π es la energía potencial (para nuestros propósitos, es energía de deformación elástica), y W_f es el trabajo realizado por las fuerzas externas. La energía cinética del dominio del problema se define en de la siguiente forma:

$$T = \frac{1}{2} \int_V \rho \dot{\mathbf{U}}^T \dot{\mathbf{U}} dv \quad \text{EC. 2.22}$$

donde V representa todo el volumen del sólido, y $\mathbf{U}$ es el campo donde se evalúan los desplazamientos.

La energía de deformación en todo el dominio de sólidos elásticos y estructuras puede expresarse como:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dv = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{c} \boldsymbol{\varepsilon} dv \quad \text{EC. 2.23}$$

donde $\boldsymbol{\varepsilon}$ son las deformaciones obtenidas en el mismo campo donde se evalúan los desplazamientos. El trabajo realizado por las fuerzas externas puede obtenerse a través de:

$$W_f = \int_V \mathbf{U}^T \mathbf{f}_b dv + \int_{S_f} \mathbf{U}^T \mathbf{f}_s dS_f \quad \text{EC. 2.24}$$

donde S_f representa la superficie del sólido donde se aplican las fuerzas.

En los problemas prácticos de ingeniería, por lo general no se sigue la solución exacta —que en la mayoría de los casos son inalcanzable—, utilizando el principio de Hamilton se tiene una buena aproximación, por lo tanto este proporciona la base para el MEF.

Todas las herramientas matemáticas necesarias para obtener el sistema discreto de ecuaciones son: la integración de base, la diferenciación y la variación, las cuales son operaciones

lineales regulares. Otro punto a favor del principio de Hamilton es que el sistema de ecuaciones discretas producidas son generalmente un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales que pueden ser resueltos utilizando métodos convencionales y rutinas computacionales estándares (Liu y Quek, 2003).

Habiendo aclarado los anteriores conceptos, que son base fundamental en la creación del método de los elementos finitos, a continuación se presenta la metodología para generar y solucionar las ecuaciones discretas que representan las dimensiones geométricas y parámetros físicos la figura analizada.

5. PROBLEMAS DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES

En el análisis de un problema estructural de esfuerzos, se busca la determinación de esfuerzos y desplazamientos en la estructura estudiada, la cual se encuentra en equilibrio ya que es sometida a cargas determinadas. En la mayoría de los análisis es difícil determinar la distribución de deformaciones usando métodos convencionales, por lo que el método de elementos finitos se presenta como una alternativa (Chandrupatla y Belengundu, 1999).

A continuación estudiaremos un ejemplo de análisis de esfuerzo-deformación por el método de elementos finitos.

Existen básicamente cuatro diferentes formas de aproximarse a la solución y resolver con esta técnica (Huebner *et al.*, 2001). Ellas son:

- *Directa*: debe su nombre a que su origen está relacionado con el método de la rigidez del análisis estructural y sugiere la necesidad del álgebra matricial en conjunto con las ecuaciones de elementos finitos. Esta aproximación puede ser utilizada cuando sea posible seleccionar elementos de manera que representen de forma exacta al tipo de problema. A continuación se presenta un esquema simplificado de este método (ver figura 38).
- *Variacional*: recae en el cálculo de variaciones e involucra extremar una función. Para problemas de mecánica de sólidos, la función será la energía potencial, la energía complementaria o alguna variación de estas como el Principio Variacional de Reissner. El conocimiento de este método es necesario para así extender el método de los elementos finitos a una amplia variedad de problemas. Este método puede ser utilizado para casos tanto simples como otros que impliquen formas de elementos sofisticadas.

- *Residuos ponderados*: es el método más versátil para derivar las propiedades de los elementos y tiene bases puramente matemáticas. Comienza con las ecuaciones que gobiernan el sistema y procede sin el uso de funciones o variacionales. Estos métodos son más utilizados en transferencia de calor y fluido-dinámica.
- *Balance de energía*: se basa en el balance de la energía térmica y/o mecánica del sistema. No requiere de un formato variacional y por ende amplía considerablemente el rango de posibles aplicaciones del método de elementos finitos.

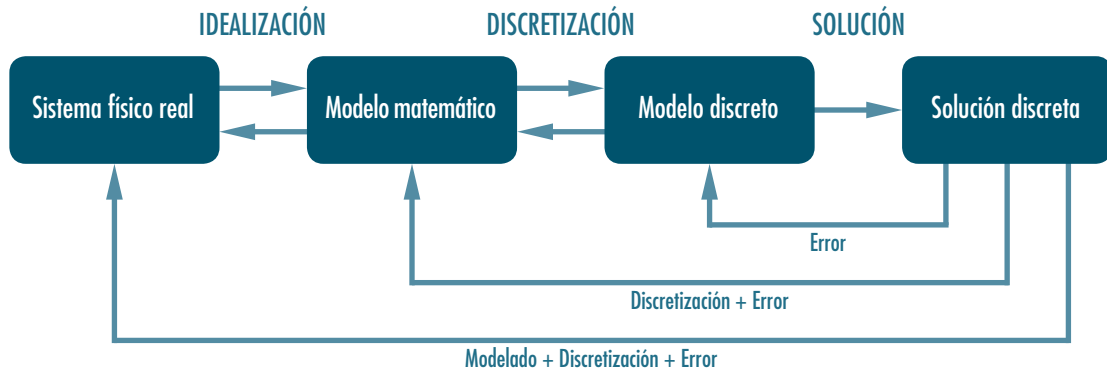


FIGURA 38. PROCEDIMIENTO DE MODELADO A TRAVÉS DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

5.1. Idealización

La idealización se realiza al modelo físico real debido a que el modelo matemático se genera bajo el principio de trabajos virtuales, el cual enuncia que: el esfuerzo, las fuerzas y las tensiones del cuerpo estarán en equilibrio si y solo si el trabajo virtual interno es igual al trabajo virtual externo para todo campo de desplazamiento virtual (Ciccola, 2008).

Suponiendo que la superficie de un cuerpo se divide en dos partes: S_u , donde los desplazamientos son prescritos, y S_p , donde las tensiones son prescritas. Sea $\delta \mathbf{u}$, el campo de desplazamientos virtuales en el cuerpo, que puede ser arbitrario, exceptuando que debe ser igual a cero en las partes donde los desplazamientos han sido prescritos, siendo $\delta \mathbf{u} = 0$ en S_u , por lo tanto el trabajo virtual interno (δW_I), el externo (δW_E) y las deformaciones virtuales ($\delta \epsilon_{ij}$) asociadas al campo de desplazamiento virtual se expresan de la siguiente forma:

$$\delta W_I = \int \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV \quad \text{EC. 2.25}$$

$$\delta W_E = \int b_i \delta u_i dV + \int t_i \delta u_i dA \quad \text{EC. 2.26}$$

$$\delta \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \delta u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{EC. 2.27}$$

El método de elementos finitos es una manera particular de construir una selección de campos de desplazamientos, y se ejecuta de la siguiente manera (Ciccola, 2008):

1. Dividir el cuerpo en elementos, tales como hexaedros (discretizar el continuo). Las variables básicas serán los vectores de desplazamiento en todos los nodos, o desplazamientos nodales.
2. Interpolarse el campo de desplazamientos por los desplazamientos nodales. También, interpolarse el campo virtual de desplazamientos por los desplazamientos nodales virtuales.
3. Utilizar las relaciones esfuerzo-desplazamiento para expresar el campo de desplazamiento en función de los desplazamientos nodales. Utilizar el mismo procedimiento para expresar el campo de deformaciones virtuales en términos de los desplazamientos nodales virtuales.
4. Utilizar las relaciones esfuerzo-deformación para expresar el campo de esfuerzos en función de los desplazamientos nodales.
5. Se requiere igualar $\delta W_E = \delta W_I$ para cada serie de desplazamientos nodales virtuales. Esto conlleva a un grupo de ecuaciones algebraicas para resolver los desplazamientos nodales.

5.2. Discretización del dominio

El cuerpo sólido es dividido en N elementos, este procedimiento es denominado mallado, el cual es usualmente desarrollado por los preprocesadores, lo que es especialmente necesario para geometrías complejas. La figura 39 muestra un ejemplo de una malla para un sólido en dos dimensiones.

Un elemento se forma debido a la conectividad entre sus nodos, y todos los elementos juntos conforman el dominio en estudio. Aumentar el número de elementos que conforman el dominio mejora la exactitud del análisis realizado, sin embargo, al densificar el mallado se incrementa el número de ecuaciones que definen el dominio, lo que conlleva a un mayor tiempo de procesamiento; debido a esto se recomienda realizar un mallado de densidad variable, una más fina en zonas de interés donde se esperan mayores desplazamientos y deformaciones, y otra menos densa en el resto del dominio.

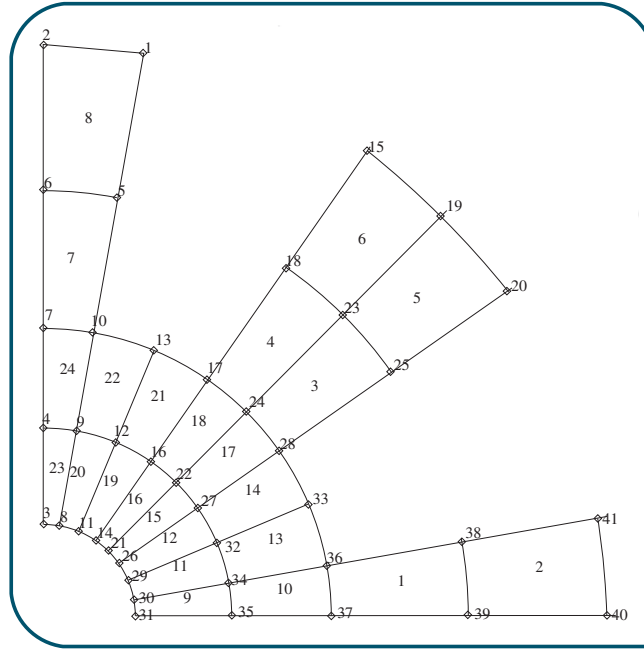


FIGURA 39. EJEMPLO DE UNA MALLA BIDIMENSIONAL CON ELEMENTOS Y NODOS NUMERADOS (LIU Y QUEK)

5.3. Solución

5.3.1. Formulación del elemento finito

Dividimos el volumen en tetraedros de cuatro nodos. A cada nodo se le asigna un número y se leen las coordenadas x, y, z . En la figura 40 se muestra un elemento típico e . La conectividad puede ser definida como se muestra en la tabla.

A cada nodo local i le asignamos los tres grupos de grados de libertad $q_{3i-2}, q_{3i-1}, q_{3i}$ y al correspondiente nodo global I le asignamos $Q_{3i-2}, Q_{3i-1}, Q_{3i}$. Los vectores de desplazamiento del elemento y de desplazamiento global son entonces:

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, \dots, q_{12}]^T \quad \text{EC. 2.28}$$

$$\mathbf{Q} = [Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_{12}]^T \quad \text{EC. 2.29}$$

Los grados de libertad N de la estructura se aplican a razón de tres por nodo. Posteriormente se definen las cuatro funciones de forma Lagrange N_1, N_2, N_3 y N_4 , donde la función de forma N_i tiene un valor de 1 en el nodo i y es cero en los otros tres nodos. Específicamente, N_1 es 0 en los nodos 2, 3 y 4, y crece linealmente hasta 1 en el nodo 1. Usando el elemento maestro mostrado en la figura 41, podemos definir las funciones de forma como:

$$N_1 = \xi \quad N_2 = \eta \quad N_3 = \zeta \quad N_4 = 1 - \xi - \eta - \zeta$$

EC. 2.30

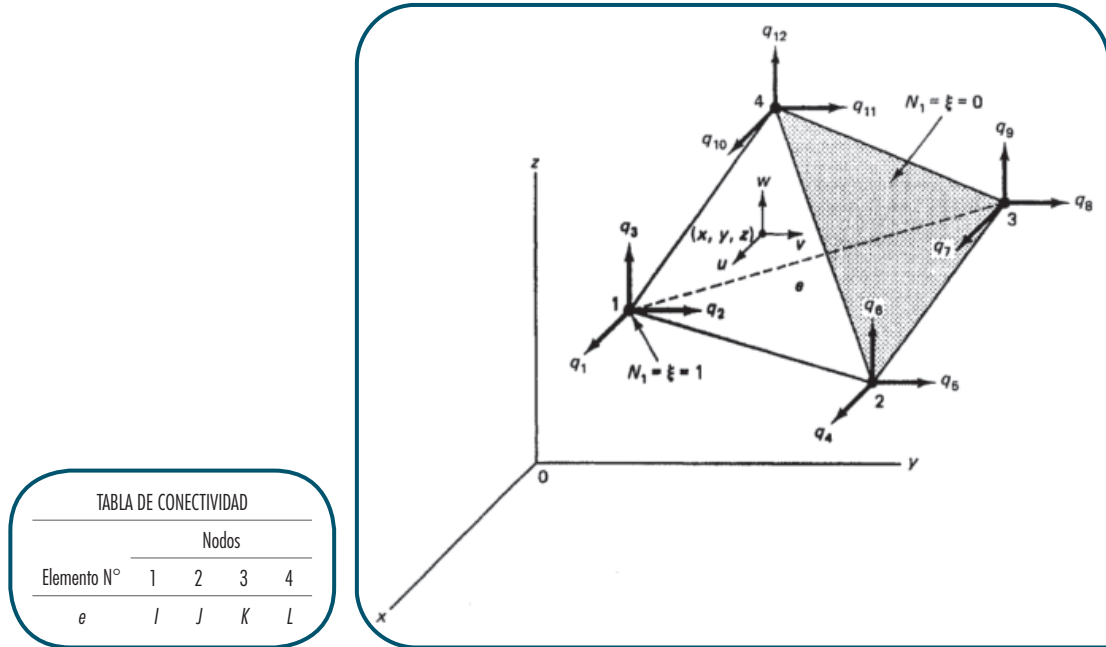


FIGURA 40. ELEMENTO TETRAÉDRICO (CHANDRUPATLA Y BELENGUNDU)

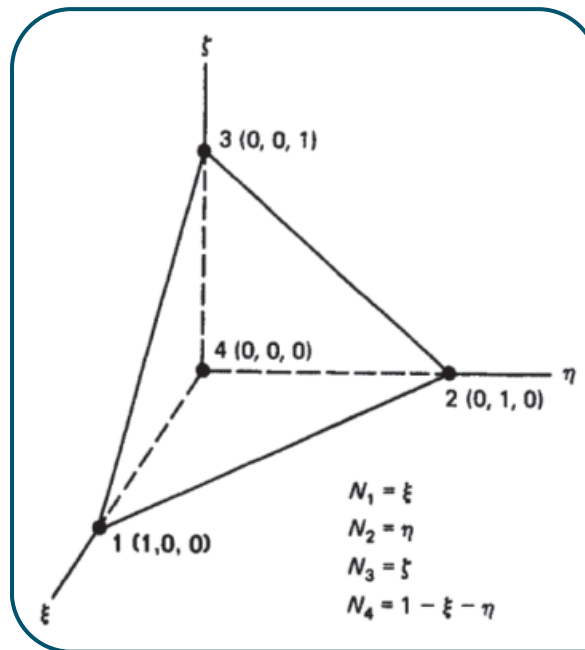


FIGURA 41. ELEMENTO MAESTRO PARA FUNCIONES DE FORMA (CHANDRUPATLA Y BELENGUNDU)

Los desplazamientos u , v , w en x pueden escribirse en términos de los valores nodales desconocidos como:

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}\mathbf{q} \quad \text{EC. 2.31}$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad \text{EC. 2.32}$$

Las funciones de forma dadas por la ecuación 2.30 pueden usarse para definir las coordenadas x , y , z del punto en el que se interpolan los desplazamientos u , v , w . La transformación isoparamétrica está dado por:

$$\begin{aligned} x &= N_1x_1 + N_2x_2 + N_3x_3 + N_4x_4 \\ y &= N_1y_1 + N_2y_2 + N_3y_3 + N_4y_4 \\ z &= N_1z_1 + N_2z_2 + N_3z_3 + N_4z_4 \end{aligned} \quad \text{EC. 2.33}$$

que, al sustituir los valores N_i dados por la ecuación 2.30 y usar la notación $x_{ij}=x_i-x_j$, $y_{ij}=y_i-y_j$, $z_{ij}=z_i-z_j$ conduce a:

$$\begin{aligned} x &= x_4 + x_{14}\xi + x_{24}\eta + x_{34}\zeta \\ y &= y_4 + y_{14}\xi + y_{24}\eta + y_{34}\zeta \\ z &= z_4 + z_{14}\xi + z_{24}\eta + z_{34}\zeta \end{aligned} \quad \text{EC. 2.34}$$

Usando la regla de la cadena para derivadas parciales, digamos de u , tenemos:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ \frac{\partial u}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} = \mathbf{J} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad \text{EC. 2.35}$$

Las derivadas parciales con respecto a ξ , η , ζ están relacionadas entonces con las derivadas x , y , z por medio de la relación anterior. El jacobiano $\mathbf{J}$ de la transformación está dado por:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{14} & y_{24} & z_{34} \\ x_{14} & y_{24} & z_{34} \\ x_{14} & y_{24} & z_{34} \end{bmatrix} \quad \text{EC. 2.36}$$

Notamos aquí que:

$$\det \mathbf{J} = x_{14} (y_{24} z_{34} - y_{34} z_{24}) + y_{14} (z_{34} x_{24} - z_{24} x_{34}) + z_{14} (x_{24} y_{34} - x_{34} y_{24}) \quad \text{EC. 2.37}$$

El $\det \mathbf{J}$ es constante, y el volumen del elemento es:

$$V_e = \left| \int_0^1 \int_0^{1-\xi} \int_0^{1-\xi-\eta} \det \mathbf{J} d\xi d\eta d\zeta \right| \quad \text{EC. 2.38}$$

$$V_e = |\det \mathbf{J}| \int_0^1 \int_0^{1-\xi} \int_0^{1-\xi-\eta} d\xi d\eta d\zeta \quad \text{EC. 2.39}$$

Usando la fórmula polinomial integral:

$$\int_0^1 \int_0^{1-\xi} \int_0^{1-\xi-\eta} \xi^m \eta^n \zeta^p d\xi d\eta d\zeta = \frac{m!n!p!}{(m+n+p+3)!} \quad \text{EC. 2.40}$$

obtenemos:

$$V_e = \frac{1}{6} |\det \mathbf{J}| \quad \text{EC. 2.41}$$

La relación inversa correspondiente a la ecuación 2.35 dada por:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} = \mathbf{A} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ \frac{\partial u}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} \quad \text{EC. 2.42}$$

donde $\mathbf{A}$ es la inversa de la matriz jacobiana $\mathbf{J}$ dada por la ecuación 2.36:

$$\mathbf{A} = \mathbf{J}^{-1} = \frac{1}{\det \mathbf{J}} \begin{bmatrix} y_{24}z_{34} - y_{34}z_{24} & y_{34}z_{14} - y_{14}z_{34} & y_{14}z_{24} - y_{24}z_{14} \\ y_{24}x_{34} - y_{34}x_{24} & z_{34}x_{14} - z_{14}x_{34} & z_{14}x_{24} - z_{24}x_{14} \\ x_{24}y_{34} - x_{34}y_{24} & x_{34}y_{14} - x_{14}y_{34} & x_{14}y_{24} - x_{24}y_{14} \end{bmatrix} \quad \text{EC. 2.43}$$

Usando la relaciones de deformación unitaria-desplazamiento de la ecuación 2.10, la relación entre las derivadas en x, y, z y ξ, η, ζ de la ecuación 2.42 y el campo supuesto de desplazamiento $\mathbf{u} = \mathbf{N}\mathbf{q}$ de la ecuación 2.31, obtenemos:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}\mathbf{q} \quad \text{EC. 2.44}$$

donde $\mathbf{B}$ es una matriz (6x12) dada por:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & A_{12} & 0 & 0 & A_{13} & 0 & 0 & -\tilde{A}_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_{21} & 0 & 0 & A_{22} & 0 & 0 & A_{23} & 0 & 0 & -\tilde{A}_2 & 0 \\ 0 & 0 & A_{31} & 0 & 0 & A_{32} & 0 & 0 & A_{33} & 0 & 0 & -\tilde{A}_3 \\ 0 & A_{31} & A_{21} & 0 & A_{32} & A_{22} & 0 & A_{33} & A_{23} & 0 & -\tilde{A}_3 & -\tilde{A}_2 \\ A_{31} & 0 & A_{11} & A_{32} & 0 & A_{12} & A_{33} & 0 & A_{13} & -\tilde{A}_3 & 0 & -\tilde{A}_1 \\ A_{21} & A_{11} & 0 & A_{22} & A_{12} & 0 & A_{23} & A_{13} & 0 & -\tilde{A}_2 & -\tilde{A}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{EC. 2.45}$$

donde $\tilde{A}_1 = A_{11} + A_{12} + A_{13}$, $\tilde{A}_2 = A_{21} + A_{22} + A_{23}$ y $\tilde{A}_3 = A_{31} + A_{32} + A_{33}$. Todos los términos de $\mathbf{B}$ son constantes. La ecuación 2.44 da entonces deformaciones unitarias constantes después de calcular los desplazamientos nodales.

5.3.2. Rigidez del elemento

La energía unitaria del elemento en el potencial total está dada por:

$$\begin{aligned} U_e &= \frac{1}{2} \int_e \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} dV \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{q} \int_e dV \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{q}^T V_e \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{q} \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{k}^e \mathbf{q} \end{aligned} \quad \text{EC. 2.46}$$

donde la matriz rigidez del elemento $\mathbf{k}^e$ está dada por:

$$\mathbf{k}^e = V_e \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \quad \text{EC. 2.47}$$

donde V_e es el volumen del elemento dado por $\frac{1}{6} |\det \mathbf{J}|$.

El trabajo virtual interno es:

$$\int_e \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{\phi}) dV = \boldsymbol{\Psi}^T V_e \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{q} \quad \text{EC. 2.48}$$

que da la rigidez del elemento en la ecuación 2.47.

5.3.3. Términos de fuerza

El término de “potencial” asociado con la fuerza de cuerpo es:

$$\begin{aligned} \int_e \mathbf{u}^T \mathbf{f} dV &= \mathbf{q}^T \iiint \mathbf{N}^T \mathbf{f} \det \mathbf{J} d\xi d\eta d\zeta \\ &= \mathbf{q}^T \mathbf{f}^e \end{aligned} \quad \text{EC. 2.49}$$

Usando la fórmula de integración en la ecuación 2.40, tenemos:

$$\mathbf{f}^e = \frac{V_e}{4} [f_x, f_y, f_z, f_x, f_y, f_z, \dots, f_z]^T \quad \text{EC. 2.50}$$

En la ecuación anterior, el vector de fuerza de cuerpo del elemento $\mathbf{f}^e$ es de dimensión (12x1). Note que $V_e f_x$ es la componente x de la fuerza que se distribuye a los grados de libertad q_1, q_4, q_7, q_{10} .

Consideremos ahora la tracción distribuida uniformemente sobre la superficie de frontera. La superficie de frontera de un tetraedro es un triángulo. Sin pérdida de generalidad, si A_e es la superficie de frontera sobre la que se aplica la tracción, formada por los nodos locales 1, 2 y 3, entonces:

$$\int_{A_e} \mathbf{u}^T \mathbf{T} dA = \mathbf{q}^T \int_{A_e} \mathbf{N}^T \mathbf{T} dA = \mathbf{q}^T \mathbf{T}^e \quad \text{EC. 2.51}$$

El vector de carga de tracción en el elemento $\mathbf{T}^e$ está dado por:

$$\mathbf{T}^e = \frac{A_e}{3} [T_x, T_y, T_z, T_x, T_y, T_z, T_x, T_y, T_z, 0, 0, 0] \quad \text{EC. 2.52}$$

Las rigideces y fuerzas se agrupan en posiciones globales usando la conectividad de los elementos. Las cargas puntuales se agregan en las posiciones apropiadas del vector de fuerza. Las condiciones de frontera se consideran usando el método de penalización y otros. Los métodos de energía dan el conjunto:

$$\mathbf{KQ} = \mathbf{F} \quad \text{EC. 2.53}$$

donde $\mathbf{K}$ es la matriz de rigidez, $\mathbf{Q}$ el vector de desplazamiento y $\mathbf{F}$ el vector de carga global.

5.3.4. Cálculos de los esfuerzos

Después de resolver las ecuaciones anteriores pueden obtenerse los desplazamientos $\mathbf{q}$ nodales del elemento. Como $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}$ y $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}\mathbf{q}$, los esfuerzos del elemento están dados por:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{DBq} \quad \text{EC. 2.54}$$

Los tres esfuerzos principales pueden calcularse usando las relaciones dadas abajo. Las tres invariantes del tensor esfuerzo (3x3) son:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ I_2 &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_x \sigma_z - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2 \\ I_3 &= \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{yz} \tau_{xz} \tau_{xy} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{xz}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 \end{aligned} \quad \text{EC. 2.55}$$

Definimos:

$$\begin{aligned} a &= \frac{I_1^2}{3} - I_2 \\ b &= -2 \left(\frac{I_1}{3} \right)^3 + \frac{I_1 I_2}{3} - I_3 \\ c &= 2 \sqrt{\frac{a}{3}} \\ \theta &= \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(-\frac{3b}{ac} \right) \end{aligned} \quad \text{EC. 2.56}$$

Los esfuerzos principales están dados por:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{I_1}{3} + c \cos \theta \\ \sigma_2 &= \frac{I_1}{3} + c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sigma_3 &= \frac{I_1}{3} + c \cos \left(\theta + \frac{4\pi}{3} \right)\end{aligned}\tag{EC. 2.57}$$

El ejemplo anterior se realizó con un elemento tetraédrico, los modelos del presente trabajo fueron mallados con elementos hexaédricos; a continuación se presentan las ecuaciones para calcular los valores de esfuerzos y deformaciones presentes en estos elementos.

5.3.5. Solución con elementos hexaédricos

Para definir la conectividad en un mallado con elementos hexaédricos debe seguirse un esquema consistente de numeración de los nodos. Para un hexaedro o elemento ladrillo de ocho nodos, consideramos el mapeo sobre un cubo con lados de 2 unidades colocado simétricamente con coordenadas ξ, η, ζ , como se muestra en la figura 42.

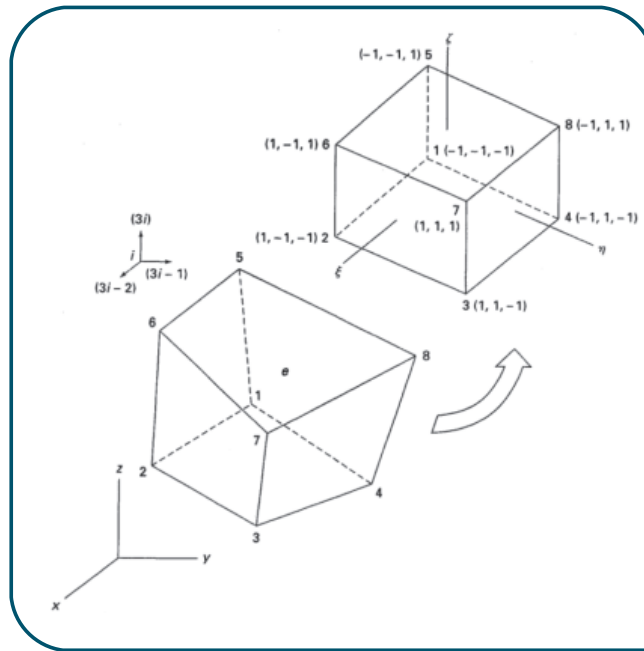


FIGURA 42. ELEMENTO HEXAÉDRICO (CHANDRUPATLA Y BELENGUNDU)

Sobre el cubo maestro, las funciones de forma de Lagrange pueden escribirse como:

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta) \quad \text{EC. 2.58}$$

donde (ξ_i, η_i, ζ_i) representa las coordenadas de nodo i del elemento en el sistema (ξ, η, ζ) . Los desplazamientos nodales del elemento están representados por el vector:

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{24}]^T \quad \text{EC. 2.59}$$

Usamos las funciones de forma N_i para definir los desplazamientos en cualquier punto dentro del elemento en términos de sus vectores nodales:

$$\begin{aligned} u &= N_1 q_1 + N_2 q_4 + \dots + N_8 q_{22} \\ v &= N_1 q_2 + N_2 q_5 + \dots + N_8 q_{23} \\ w &= N_1 q_3 + N_2 q_6 + \dots + N_8 q_{24} \end{aligned} \quad \text{EC. 2.60}$$

También,

$$\begin{aligned} x &= N_1 x_1 + N_2 x_2 + \dots + N_8 x_8 \\ y &= N_1 y_1 + N_2 y_2 + \dots + N_8 y_8 \\ z &= N_1 z_1 + N_2 z_2 + \dots + N_8 z_8 \end{aligned} \quad \text{EC. 2.61}$$

Podemos obtener las deformaciones unitarias en la forma:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}\mathbf{q} \quad \text{EC. 2.62}$$

6. ERRORES EN EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Siempre que se resuelve un problema de forma numérica se generan errores. En el método de los elementos finitos la magnitud del error cometido depende no sólo del grado de la interpolación de las funciones de forma, sino también del tamaño de los elementos utilizados. La solución exacta del problema puede desarrollarse en serie de Taylor en el entorno de cada nodo (ver ecuación 2.63).

$$u = d_i + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_i (x - x_i) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_i (y - y_i) + \dots \quad \text{EC. 2.63}$$

Si el elemento tiene un tamaño característico h_e , al utilizar un polinomio de orden cero “0” para aproximar, el error cometido en los desplazamientos es del orden “ h_e^{0+1} ”. Por otra parte, el error cometido en las deformaciones y tensiones, que son función de la primera derivada del desplazamiento será del orden “ h_e^0 ”. De este modo, el error de discretización cometido al emplear elementos lineales es del orden “ h_e^2 ” en los desplazamientos y “ h_e ” en tensiones y deformaciones. Por tanto, si se reduce a la mitad el tamaño de los elementos lineales, se reduce a $\frac{1}{4}$ el error en los desplazamientos calculados y a $\frac{1}{2}$ en las deformaciones y tensiones. La magnitud exacta del error depende de la suavidad con que varían las funciones a calcular, por ello, para minimizar los errores cometidos sin aumentar desmesuradamente el número de elementos, conviene emplear mallados irregulares, que sean más densos en las regiones donde los gradientes de tensión y deformación sean mayores (Miranda, 2003).

MÉTODO PARA VALIDAR UN MODELO NUMÉRICO ELASTOPLÁSTICO

Los modelos en donde sólo se evalúa las deformaciones elásticas, se validan comparando con otros modelos numéricos o analíticos que representen el mismo fenómeno que se propone estudiar. En la presente investigación, como se pretende evaluar la estabilidad mecánica de las perforaciones generadas mediante el proceso de cañoneo, la validación se realiza utilizando el modelo de Kirsch sobre la distribución de esfuerzos tridimensionales presente en una placa plana con un agujero en el centro (este agujero simula el pozo).

En el modelo a proponer también se aprecia la plasticidad de la formación, condición que permite evaluar las deformaciones permanentes, sin embargo, no hay modelos analíticos previos que representen las condiciones físicas reales del proceso de cañoneo de pozos, con los cuales se pueda comparar aproximaciones, por lo que luego de determinar las dimensiones geométricas con la aplicación de la Ley de Kirsch, la validación se realiza evaluando mediciones en diferentes corridas, en las cuales se varía el número de elementos que conforman el modelo, ésto se realiza mediante un estudio de convergencia del mallado.

1. APLICACIÓN DE LA LEY DE KIRSCH

El suelo es un medio semiinfinito y es imposible modelar dicho dominio con un número finito de elementos. Por lo tanto se introduce un borde artificial en el cual se deben formular adecuadas condiciones de borde para representar el suelo que no se considera en el modelo. Además de modelar su rigidez, se deben evitar las reflexiones de los esfuerzos que se propagan hacia afuera. El objetivo fundamental del análisis de interacción suelo-estructura es determinar la respuesta de una estructura y de una porción del suelo que la rodea (Jacinto, 2002).

Las condiciones de borde que se utilizan sobre el borde ficticio se pueden dividir en tres grupos que se explican a continuación:

- *Bordes locales:* consiste en aplicar amortiguadores viscosos en cada nodo y para cada grado de libertad, en el caso más general con una rigidez dinámica dependiente de la frecuencia, que se puede interpretar como un resorte y un amortiguador; el valor del

coeficiente de amortiguación depende del tipo de onda que se analiza y del ángulo de incidencia de la onda, razón por la cual este tipo de elementos no absorbe completamente las ondas incidentes.

- *Bordes consistentes*: todos los grados de libertad están acoplados sobre el borde artificial por lo que pueden absorber perfectamente todos los tipos de ondas y con diferentes ángulos de incidencia.
- *Bordes elementales*: en este caso se trunca la malla de suelo y se impone desplazamiento cero o fuerzas de superficies nulas; ellos actúan como reflectores perfectos para las ondas que alcanzan el borde artificial.

A principios del siglo XIX, Saint-Venant publicó un principio que lleva su mismo nombre, donde explica que: “A cierta distancia de la sección donde actúa un sistema de fuerzas, la distribución de tensiones es prácticamente independiente de la distribución del sistema de fuerzas, siempre que su resultante y momento resultante sean iguales” (García, 2006).

En 1898, Kirsch obtuvo por primera vez la solución al caso de una placa sujeta a tensión uniaxial con una perforación circular, supuso las restricciones comunes de homogeneidad e isotropía del material, además de que el diámetro del agujero es pequeño comparado con el ancho de la placa, y logró determinar que se produce una distribución tridimensional de esfuerzos (Cook, 1985).

La solución de la distribución de esfuerzos se expresa mejor en coordenadas cilíndricas, teniéndose el origen de coordenadas en el centro de la perforación. Los esfuerzos se representan de la siguiente manera:

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_x) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad \text{EC. 2.64}$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_x) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad \text{EC. 2.65}$$

$$\sigma_{r\theta} = -\frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \left(1 + 3\frac{a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \quad \text{EC. 2.66}$$

donde:

σ_r = esfuerzo radial

σ_θ = esfuerzo tangencial

$\sigma_{r\theta}$ = esfuerzo cortante

a = radio de perforación

r = variable radial

2. CONVERGENCIA DEL MALLADO

Consiste en evaluar valores de parámetros medidos en un modelo propuesto, hay dos métodos para realizar la convergencia del mallado: uno P, en donde los elementos que conforman el modelo mantienen constantes sus dimensiones geométricas, pero se varían el número de nodos dispuestos para cada elemento (por ejemplo: además de los nodos en los vértices, se pueden fijar otros en puntos intermedios de las aristas); el segundo método, el H, consiste en mantener constante el mismo número de nodos por elementos pero modificando sus dimensiones, lo que hace variar el número de elementos que conforman el modelado al momento de discretizarlo.

Cuando se utiliza un número bajo de elementos, se idealiza la geometría del continuo y los resultados pierden fidelidad, teniendo altas variaciones; aumentando el número de elementos utilizados se empieza a obtener valores similares de esfuerzo y deformación, hasta llegar a un punto donde éstos se aproximan a valores constantes, es en éste punto donde se define el número de elementos a utilizar, debido a que, si se sigue aumentando la densidad de la malla, sólo se incrementará el tiempo de procesamiento para obtener resultados aproximadamente iguales.

Cabe destacar que, para minimizar los grados de libertad, generalmente se crean mallas de densidad variable, una más fina en áreas de interés (zonas donde se esperan concentraciones de esfuerzos), tales como agujeros, ranuras y grietas; y otra más gruesa para el resto de las zonas; de esta manera se puede reducir el tiempo de procesamiento y seguir obteniendo resultados confiables de un modelo que represente satisfactoriamente el proceso real de cañoneo.

1. ESFUERZO VON-MISES (σ_{VM})

También es conocido como el criterio de la máxima energía de distorsión, y fue formulado primeramente por Maxwell en 1865 y más tarde mencionado por Huber (1904). Sin embargo, fue con el trabajo de Richard Edler von Mises en 1913 que el criterio alcanzó notoriedad; la expresión propuesta expresa que una pieza resistente o elemento estructural falla cuando en alguno de sus puntos la energía de distorsión por unidad de volumen rebasa un cierto umbral (Ford, 1963):

$$e_{dist} \geq \frac{\sigma_{max}}{2E} \quad \text{EC. 2.67}$$

donde:

e_{dist} es la energía de distorsión

σ_{max} es el esfuerzo máximo antes de deformar el material plásticamente

E es el módulo de Young

En términos de esfuerzos, este criterio se escribe de la siguiente manera:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \geq \sigma_{max} \quad \text{EC. 2.68}$$

donde $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ son los esfuerzos principales en el punto considerado.

2. DEFORMACIÓN PLÁSTICA EQUIVALENTE (ϵ_{eq}^{pl})

Para definir la plasticidad se utilizó el criterio de falla de Mohr-Coulomb, ingresando datos de esfuerzo de cohesión y ángulo de fricción. Para un material deformable con dureza isotrópica, la deformación plástica equivalente (PEEQ), se define como (Abaqus [A], 2010):

$$\epsilon_{eq}^{pl} = \int \frac{1}{c} \sigma : d\epsilon^{pl} \quad \text{EC. 2.69}$$

donde: c es el esfuerzo de cohesión y $d\epsilon^{pl}$ es la variación de las deformaciones plásticas.

La ley de flujo establece que la variación de la deformación plástica es proporcional a la derivada de la función de fluencia (F_Y) con respecto a las tensiones materiales, que se pueden expresar en función de las tensiones desviadoras (S_{ij}) y de la tensión equivalente (σ_{eq}) mediante (Lorenzana y Garrido, 1996):

$$d\epsilon^{pl} = \frac{\partial F_Y}{\partial S_{ij}} \quad \text{EC. 2.70}$$

$$F_Y = \sigma_{eq} - Y(\epsilon^{pl}) \quad \text{EC. 2.71}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \|S_{ij}\| \quad \text{EC. 2.72}$$

$$Y(\epsilon^{pl}) = K(\epsilon^{pl} + \epsilon^e)^n \quad \text{EC. 2.73}$$

$$S_{ij} = \Sigma_{ijkl} E_{kl} \quad \text{EC. 2.74}$$

donde:

$Y(\epsilon^{pl})$ define el endurecimiento isotrópico (K y n son coeficientes de endurecimiento),

ϵ^e son las deformaciones elásticas,

Σ es el tensor de rigidez, y

E es el tensor de deformación del material (se descompone en ϵ^e y ϵ^{pl})

En la industria petrolera, el éxito del cañoneo se mide en función del radio de productividad, y —como ha sido explicado anteriormente— éste es inversamente proporcional a la producción de arena que se genera en el pozo; sin embargo, del análisis por elementos finitos obtenemos valores de esfuerzos y deformaciones, que se relacionan directamente con el riesgo de arenamiento en el pozo.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

El marco metodológico de la presente investigación, donde se evalúa la estabilidad mecánica de las perforaciones generadas en el proceso de cañoneo de pozos petroleros, es la sección donde se detalla el conjunto de métodos que se emplean para cumplir los objetivos propuestos. En principio se desarrollan aspectos relativos al tipo y diseño de investigación, los cuales definen el grado de profundidad y la estrategia adoptada para responder al problema planteado; luego se explicarán las técnicas e instrumentos necesarios para la recolección de datos; por último se expone en detalle el esquema de trabajo.

1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación se realiza de forma cuantitativa, a un nivel evaluativo, ya que la intención era evaluar el comportamiento estructural de una o más configuraciones del sistema de cañoneo; este tipo de investigación busca obtener resultados específicos y se orienta hacia la solución de un problema determinado (Arias, 1999). La investigación evaluativa tiene semejanzas con la estrategia de otras investigaciones, sin embargo, acá se propone describir y comprender las relaciones significativas entre las variables; así como el establecimiento de la secuencia casual de un hecho estudiado (Balestrini, 2006).

La finalidad de esta investigación es determinar las variables que inciden en la estabilidad mecánica de las perforaciones generadas en el proceso de cañoneo. Por lo tanto, el objetivo es conocer las condiciones en las cuales se presentan deformaciones plásticas alrededor de las perforaciones, esto se logra analizando las relaciones existentes o, al menos, las condiciones en las cuales se producen. Comprendiendo el nexo entre los parámetros que definen la configuración del proceso de cañoneo con la concentración de esfuerzos y generación de deformaciones plásticas, se puede optimizar el proceso de cañoneo logrando disminuir el riesgo de arenamiento y alargando la vida productiva del pozo lo que permite extraer mayor cantidad de hidrocarburos.

2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de la presente investigación es de campo, el cual permite establecer una interacción entre los objetivos y la realidad de la situación, y proporciona al investigador un estudio más completo permitiendo plantear hipótesis para futuros trabajos.

En el estudio realizado, se tiene una serie de variables independientes que definen la configuración geométrica, cargas aplicadas y condiciones de borde de los modelos, el trabajo está enfocado en detectar los efectos de éstas sobre variables dependientes como esfuerzos y deformaciones. Dentro de las investigaciones de campo se puede tener diseños no experimentales, donde se observan los hechos estudiados tal como se manifiestan en su ambiente natural, por lo tanto no se manipulan las variables de manera intencional; y experimentales, a través de las cuales se hacen variar estas supuestas causas para detectar sus efectos sobre las variables dependientes, esto se realiza con la finalidad de determinar la relaciones causales. Esta última es la que se adecua a la presente investigación, ya que dentro de una situación controlada se varían entre otros tópicos: los valores de presiones hidrostáticas, propiedades mecánicas del cemento y parámetros técnicos que definen el proceso de cañoneo de pozos para detectar zonas de concentración de esfuerzos que presenten deformaciones plásticas, las cuales afectan directamente la integridad estructural del sistema revestidor-cemento-formación.

3. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población en estudio la conforman los cientos de pozos petroleros ubicados en la costa oriental del lago de Maracaibo, específicamente en el Campo Ceuta. Reducir nuestro universo de muestras a los ubicados en esta zona del occidente del país nos permite unificar valores de propiedades de la formación, como: los esfuerzos *in situ*, módulo de Young, coeficiente de Poisson, etc., que, a pesar de que varían dentro del mismo campo, son similares a igual profundidad. La muestra de trabajo es un pozo característico de la zona, que fue cañoneado a 4.746 metros (15.572 pies) de profundidad, con una configuración de 5,3 tiros por pie y ángulo de fase de 60°.

La primera etapa de esta investigación consiste en modelar la sección de pozo con estos parámetros, luego se modificaron para establecer relaciones entre las variables independientes con los valores de esfuerzo y deformación, y poder determinar cuál configuración es la que brinda mayor estabilidad a las perforaciones generadas en el proceso de cañoneo.

4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Con la finalidad de completar los objetivos definidos y lograr responder las interrogantes planteadas, se emplean técnicas experimentales que requieren la realización de fases previas de revisión bibliográfica, lo que es indispensable en el momento de definir valores de tópicos que conforman las configuraciones evaluadas. La revisión se realiza en libros especializados, artículos técnicos, trabajos previos relacionados con la investigación y guías técnicas, a través de los cuales se abarcan tópicos relacionados con el proceso de cañoneo de pozos petroleros y análisis de problemas mediante elementos finitos, entre ellos:

- Conceptos básicos, tanto teóricos como prácticos, relacionados con la perforación de pozos de petróleo y gas.
- Conceptos de geomecánica, aplicada en campos petroleros.
- Impacto sobre el yacimiento debido a los procesos de perforación y completación del pozo –enfocándose en parámetros que inciden en el riesgo de producción de arena.
- Fundamentos teóricos y consideraciones operacionales sobre el proceso de cañoneo.
- Fundamentos teóricos del método de elementos finitos (MEF).
- Modelos analíticos y numéricos a través de elementos finitos donde se haya simulado el proceso de cañoneo en pozos de petróleo y/o gas.
- Funcionamiento del programa Abaqus y aplicación a problemas reales.

Los datos necesarios para modelar el primer modelo se obtuvieron mediante entrevistas a los profesionales del área que están involucrados en la completación de pozos ubicados en el Campo Ceuta y a trabajadores de Pdvsa-Intevep. Apoyándose en valores de esfuerzos en la formación y conocimientos teóricos, los ingenieros logran determinar la configuración óptima para ejecutar el proceso de cañoneo de pozos; estos valores propios del yacimiento y del campo petrolero son obtenidos previamente mediante una serie de pruebas realizadas en el laboratorio o en campo, en éstas se evalúan las presiones de poro en la formación, registro de densidad en el suelo, el comportamiento mecánico del cemento, entre otros.

5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Propuesta del modelo numérico (MEF)

Una vez analizadas las consideraciones teóricas y operacionales asociadas al proceso de cañoneo de pozos, se procede a la elaboración del modelo numérico –basado en elemen-

tos finitos—, que logra representar el comportamiento físico involucrado. Éste se realiza empleando el programa Abaqus, versión 6.10, el mismo consta de varios subprogramas, de entre ellos cabe destacar los dos motores de simulación por el MEF: *Abaqus/Standard* donde se formula el problema de elementos finitos en forma implícita, y *Abaqus/Explicit* que está orientado a la resolución de problemas dinámicos formulados de forma explícita. Puesto que este trabajo se orienta al estudio de la estabilidad de las perforaciones en una formación sometida a cargas geostáticas, se utiliza el primero de ellos.

Para realizar el modelo propuesto se definieron las siguientes variables:

- *Dimensionalidad del modelo*: mediante datos suministrados por trabajadores de Pdvsa ubicados en el Campo Ceuta, se definieron las dimensiones del modelo base.

TABLA 1. DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL MODELO

REVESTIDOR	Diámetro exterior	17,78 cm (7 pulg.)
	Diámetro interior	15,25 cm (6,004 pulg.)
FORMACIÓN	Diámetro del pozo	22,23 cm (8,75 pulg.)
CAÑONEO	Diámetro de entrada	0,8636 (0,34 pulg.)
	Longitud de perforación	76,71 (30,2 pulg.)

- *Consideraciones geométricas*: basándose en las dimensiones anteriores se procede a generar las partes que conforman el modelo, estas son: el pozo (sección que será perforada), revestidor, sección de cemento y formación, esta última se divide en dos partes con las mismas propiedades del material pero distinta densidad del mallado con la finalidad de reducir el número de elementos y consecuentemente el tiempo de procesamiento. La unión de las partes se realiza con enlaces tipo *tie*.
- *Materiales involucrados y sus propiedades*: mediante entrevistas con trabajadores del Campo Ceuta se determinan las propiedades del acero utilizado en el revestidor, mientras las propiedades de la formación y el cemento se caracterizaron en los laboratorios de Pdvsa-Intevep (ver tabla 2).

TABLA 2. PROPIEDADES DE MATERIALES

MATERIAL	MÓDULO DE YOUNG	COEFICIENTE DE POISSON
Acero (P-110)	206.842 MPa (30e6 lppc)	0,3
Cemento	4.964 MPa (72e4 lppc)	0,22
Campo Ceuta 3 a 4.877 m (16.000 pies)	23.180 MPa (33,6e5 lppc)	0,2
	COHESIÓN	ÁNGULO DE FRICCIÓN
	10,34 MPa (1.500 lppc)	29°

- *Condiciones iniciales:* los modelos están sometidos a un estado geostático de esfuerzos con un régimen inverso (ver p. 38), en la siguiente tabla se especifican las cargas:

TABLA 3. CARGAS GEOSTÁTICAS (ESFUERZOS *IN SITU*)

ESFUERZO	GRADIENTE	CARGA A 4.746 M (15.572 PIES)
Vertical	22,62 kPa/m (1 lppc/pie)	107,35 MPa (15.572 lppc)
Horizontal mínimo	24,43 kPa/m (1,08 lppc/pie)	115,94 MPa (16.817 lppc)
Horizontal máximo	32,12kPa/m (1,42 lppc/pie)	152,44 MPa (22.112 lppc)

- *Tipos de elementos a ser usados:* todas las partes generadas se mallan utilizando elementos hexaédricos con ocho nodos donde cada uno tiene seis grados de libertad, el código de estos en Abaqus es C3D8R. La longitud de las aristas varía para adaptarse a la geometría del modelo, sin embargo, se debe realizar un estudio de proporcionalidad de la malla, donde se asegure que la longitud mayor no sobrepase 10 veces la menor, esto garantiza que los resultados no sean alterados por errores propios del mallado.
- *Condiciones de contorno:* en el modelo se utilizan bordes elementales (ver marco teórico), por ende la formación se debe truncar a cierta distancia del centro del pozo, en primera instancia esta se define arbitrariamente a 7,62 metros (300 pulg.), pero posteriormente se debe validar aplicando la Ley de Kirsch sobre distribución de esfuerzos en placas planas; en los bordes verticales se aplica una condición de empotramiento para fijar el modelo, de esta manera se restringe la traslación y rotación de estos nodos en los tres ejes coordenados. Como se modela una sección vertical de 10,97 metros (36 pies), en los planos horizontales superior e inferior se aplica una condición de simetría vertical (restringe movimiento en el eje z y rotación alrededor de los eje x y y); la última condición de contorno a aplicar se requirió porque sólo se trabaja con 180° del pozo, motivo por el cual se emplea simetría horizontal (restringe movimiento en el eje y y rotación alrededor de los eje x y z) al plano de corte vertical.
- *Tipos de cargas aplicadas:* además de las fuerzas geostáticas a las que está sometida la formación, los fluidos de perforación y completación (éstos son de igual densidad) y la lechada de cemento antes de fraguar ejercen presiones hidrostáticas en las paredes del revestidor y formación, dichas presiones se calcularon a través de la ecuación 1.1 (ver p. 26), en la siguiente tabla se especifican sus magnitudes a la profundidad donde se emplea el cañoneo.

TABLA 4. CARGAS APLICADAS

FLUIDO	DENSIDAD	CARGA A 4.746 M (15.572 PIES)
Lodos de perforación y completación	1,546 g/cm ³ (12,9 lpg)	72,02 MPa (10.446 lppc)
Cemento	1,917 g/cm ³ (16,5 lpg)	92,11 MPa (13.360 lppc)

- *Tipo de análisis:* los modelos se encuentran sometidos a cargas geostáticas e hidrostáticas, por lo que se generan pasos de análisis estáticos, que evalúan esfuerzos, rotaciones y desplazamientos en los nodos de los elementos acoplados en el modelo. El material que representa la formación tiene definido cohesión y ángulo de fricción, variables que permiten estudiar su plasticidad, por tal motivo, al realizar este tipo de análisis Abaqus calcula las deformaciones plásticas presentes en la formación Ceuta.

5.2. Definición de los casos de carga

Como se ha mencionado anteriormente, el cañoneo forma parte de la completación, que es una fase final en la construcción de pozos, y para proponer un correcto modelo se debe tomar en cuenta cada uno de los procesos previos que afectan el comportamiento de la formación, entre ellos se pueden definir:

- Fuerzas geostáticas aplicadas a la formación.
- Perforación de la formación virgen.
- Colocación de la tubería de revestimiento.
- Bombeo de la lechada hacia el espacio anular entre el revestidor y la formación.
- Fraguado del cemento.
- Perforación de hoyos en revestidor-cemento-formación (cañoneo).

Cada una de estas etapas mencionadas anteriormente está asociada a un caso de carga diferente, los cuales deben considerarse por modificar la distribución de esfuerzos en el modelo; estos casos son:

- Esfuerzos *in situ*, representación de la roca intacta.
- Remover ripios de la formación al perforar.
- Presión hidrostática del lodo de perforación en la superficie interna del revestidor.
- Presión hidrostática en las paredes del pozo y la superficie externa del revestidor debido a la lechada de cemento.
- Presión hidrostática en el revestidor por acción del lodo de completación.

5.3. Aplicación de la Ley de Kirsch

Debido a la ineficiencia de los bordes locales y la dificultad para modelar bordes consistentes, se emplean bordes elementales, por lo que se comparan valores del modelo propuesto (sin evaluar su plasticidad) con otros determinados analíticamente mediante la Ley de Kirsch sobre distribución de esfuerzos en placas planas con un agujero, de esta manera se puede definir la distancia mínima requerida para que se estabilicen los esfuerzos en la formación luego de los mencionados casos de cargas.

Motivado a que el pozo es paralelo al eje z y por ende perpendicular a los infinitos planos XY , la formación perforada genera un estado plano de deformaciones, y, a pesar de que el modelo es tridimensional, se puede evaluar la distribución de esfuerzos en cualquiera de estos planos aplicando la Ley de Kirsch.

6.5. Convergencia del mallado

Para determinar la densidad de malla adecuada que represente satisfactoriamente la geometría modelada y además nos asegure la obtención de valores correctos en esfuerzos y deformaciones se realizan nueve modelos, en cada uno se aumentó la cantidad de elementos hexaédricos que los conformaban (método tipo H).

Los modelos se realizan en una computadora con procesador de cuatro núcleos y una memoria RAM de ocho *gigabytes*—considerada apta por los profesionales de Pdvsa-Intevep para realizar estos análisis numéricos.

Una vez estudiado nuestro modelo base, se procede a modificarlo para lograr representar el proceso de cañoneo de pozos petroleros, haciendo variaciones en tópicos como: ángulo de fase, esfuerzos *in situ*, propiedades mecánicas del cemento, entre otros. Luego de obtener los resultados implementando el MEF, se grafican valores de esfuerzo y deformación, y de esta manera poder evaluar de forma veraz la influencia de cada uno de los tópicos en la estabilidad de las perforaciones generadas en el cañoneo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

RESULTADOS

1. APLICACIÓN DE LA LEY DE KIRSCH

En esta ley que define la distribución de esfuerzos en una placa con un agujero, no se toma en cuenta la plasticidad de los materiales, por lo que se propuso un modelo donde sólo se aprecian las deformaciones elásticas (retirando valores de coeficiente de fricción y ángulo de cohesión en el material que asignado a la formación).

Los esfuerzos se calcularon en un plano del modelo ubicado a 4.746 metros (15.572 pies) profundidad. Para reducir los cálculos necesarios, la evaluación se realizó en un ángulo “ θ ” de 90° para anular los valores de esfuerzos cortantes. En la siguiente gráfica se representan los esfuerzos radiales y tangenciales obtenidos: de manera teórica, por las fórmulas de Kirsch; y experimentales, tomadas directamente del modelo propuesto (ver figura 43).

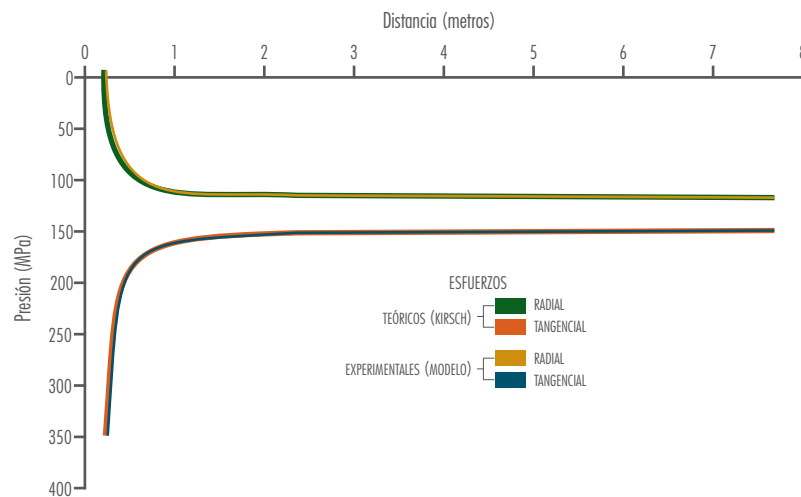


FIGURA 43. ESFUERZOS ALREDEDOR DEL HOYO PERFORADO

En la gráfica se aprecia que las curvas coinciden en toda su extensión, además de que se hacen asintóticas a partir de tres metros, lo que infiere que desde esa distancia los esfuerzos se estabilizan. En la tabla 3 se especifican las magnitudes de los esfuerzos horizontales presentes en la formación, el máximo de 152,44 MPa y el mínimo de 115,94 MPa; en la figura 43 las curvas tienden a estos, sin embargo, no se especifica el esfuerzo real en dichos puntos

por lo que a continuación se presentan los valores estimados de errores absoluto y relativo al truncar la formación a cierta distancia, según Kirsch (ver figura 44), y los experimentales medidos del modelo realizado (ver tabla 5).

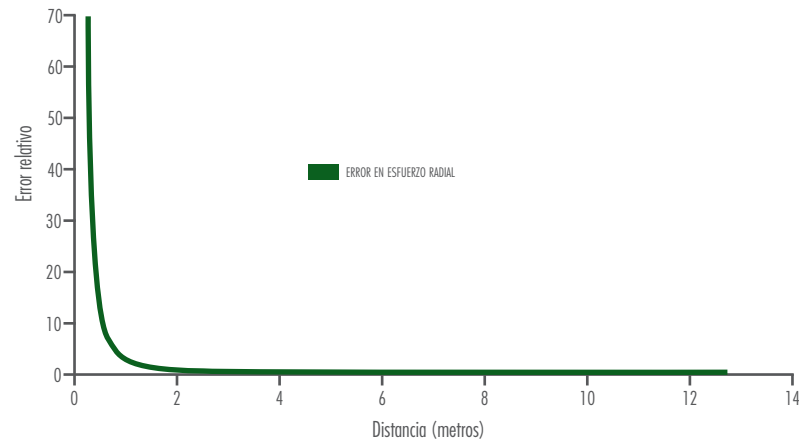


FIGURA 44. ERROR RELATIVO DE LA REPRESENTACIÓN DE ESFUERZOS EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA ALREDEDOR DEL HOYO

TABLA 5. ERRORES PRESENTES EN EL MODELO NUMÉRICO AL REPRESENTAR LOS ESFUERZOS

DISTANCIA RADIAL (METROS)	ESFUERZO RADIAL (MPa)	ERRORES		ESFUERZO TANGENCIAL (MPa)	ERRORES	
		ABSOLUTO (MPa)	RELATIVO (%)		ABSOLUTO (MPa)	RELATIVO (%)
0,255 (10,04 pulg.)	35,791	80,167	69,135	288,384	135,920	89,149
0,382 (15,04 pulg.)	88,612	27,347	23,583	204,333	51,869	34,021
0,509 (20,04 pulg.)	102,113	13,845	11,940	179,956	27,492	18,032
0,636 (25,04 pulg.)	107,523	8,435	7,274	169,520	17,056	11,187
0,763 (30,04 pulg.)	110,245	5,714	4,928	164,071	11,607	7,613
0,889 (35,00 pulg.)	111,801	4,157	3,585	160,870	8,407	5,514
1,017 (40,04 pulg.)	113,219	2,740	2,363	157,910	5,446	3,572
1,331 (52,40 pulg.)	114,079	1,879	1,620	156,103	3,639	2,387
1,506 (59,29 pulg.)	114,483	1,476	1,273	155,245	2,781	1,824
2,115 (83,26 pulg.)	115,171	0,788	0,679	153,769	1,305	0,856
2,602 (102,44 pulg.)	115,408	0,551	0,475	153,261	0,797	0,523
3,817 (150,28 pulg.)	115,652	0,306	0,264	152,741	0,277	0,182
4,991 (196,49 pulg.)	115,740	0,219	0,188	152,565	0,102	0,067
6,453 (254,05 pulg.)	115,785	0,173	0,150	152,482	0,018	0,012
7,620 (300 pulg.)	115,807	0,151	0,130	152,456	0,008	0,005
∞	115,94	0	0	152,44	0	0

En la tabla 5 se nota que al truncar la formación en un radio de dos metros, los errores agregados son menores al uno por ciento.

Luego de haber estimado las dimensiones necesarias por la Ley de Kirsch y comprobar su correcto funcionamiento por datos obtenidos del modelo propuesto, se continuó generando nuevos pasos en el mismo, en éstos se representaron los casos de carga expuestos en el marco metodológico que corresponden desde la representación de una condición geostática en la roca virgen, la cual es perforada posteriormente para construir el pozo aplicando procesos de cementación y finalmente ser completado mediante el cañoneo.

2. PRIMERA APROXIMACIÓN DEL MODELO ELASTOPLÁSTICO

El modelo base se realiza siguiendo los parámetros especificados en la metodología de la investigación (capítulo III). En el primer modelo propuesto sólo se aprecia la elasticidad de los materiales, este se utilizó para registrar las aproximaciones de esfuerzos en el sistema revestidor-cemento-formación y compararlas con la Ley de Kirsch, sin embargo, el modelo base si aprecia la plasticidad de la formación, a continuación se presentan los resultados de este análisis por el MEF. El primer caso de carga es la representación de la roca intacta, la cual está sometida a cargas geostáticas con un régimen inverso (ver figura 45).

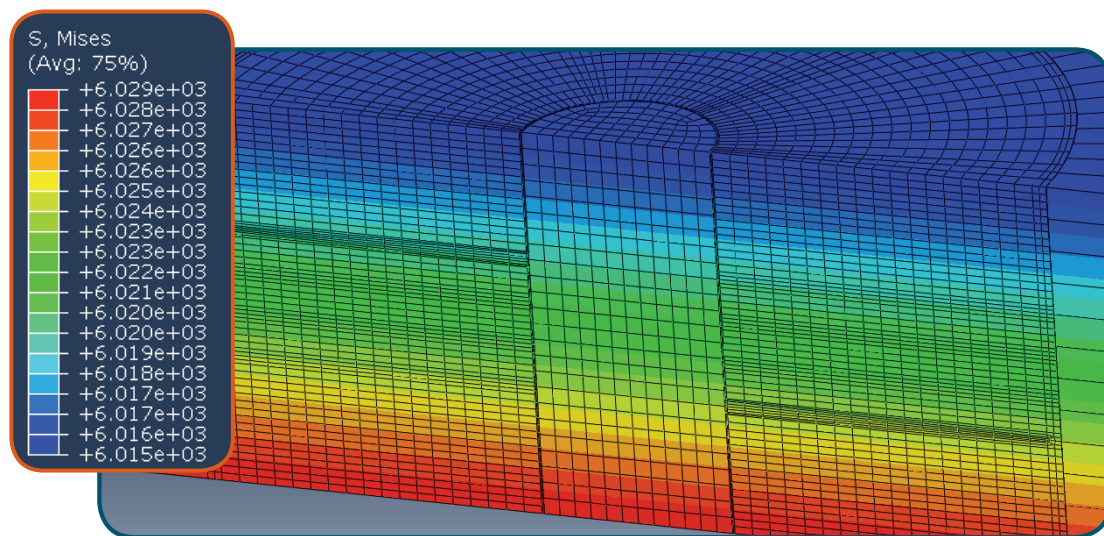


FIGURA 45. ESFUERZOS *IN SITU* APLICADOS A LA FORMACIÓN INTACTA (IGUAL PARA MODELO ELÁSTICO O ELASTOPLÁSTICO)

Luego de representar la roca virgen, se perfora la formación para generar el pozo (ver figura 46).

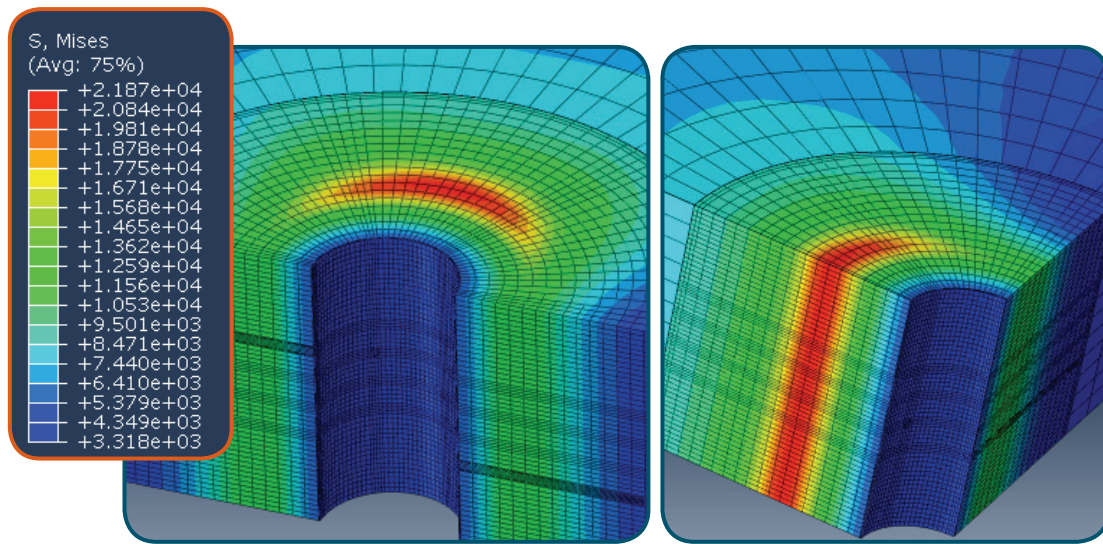


FIGURA 46. PERFORACIÓN DE LA FORMACIÓN VIRGEN

El esfuerzo máximo (150,79 MPa / 21.870 lppc) se ubica a 53 centímetros del borde del pozo. En la figura 47 se observa la distribución de deformaciones plásticas en la formación.

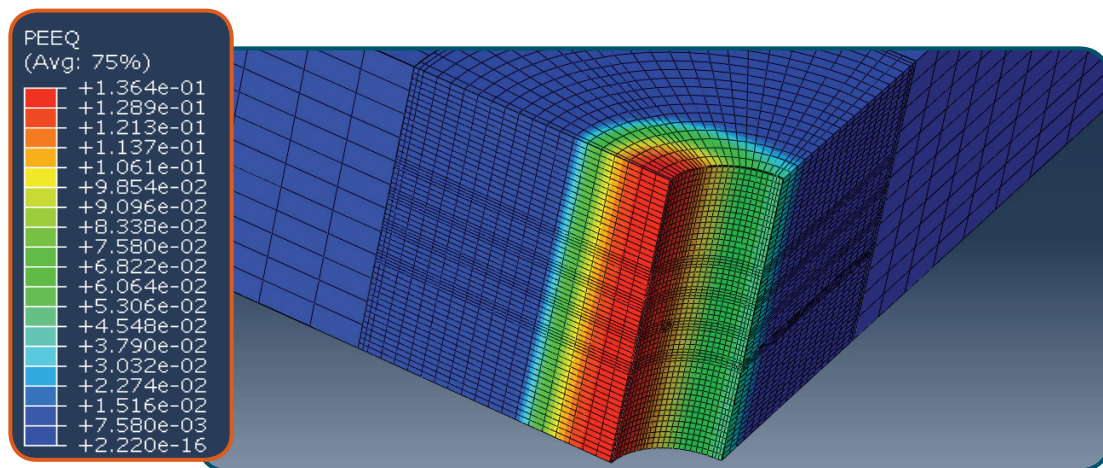


FIGURA 47. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EQUIVALENTES LUEGO DE LA PERFORACIÓN

El paso siguiente de la perforación, es el descenso de la tubería revestidora al pozo que esta lleno del fluido de perforación, lo que genera cargas hidrostáticas en la formación y el revestidor; como efecto de esto, el esfuerzo máximo sigue estando en el mismo punto pero disminuye 15 por ciento su valor, de 151 MPa (21.870 lppc) a 128 MPa (18.520 lppc). En la figura 48 se presenta la distribución de esfuerzos medida en esta fase.

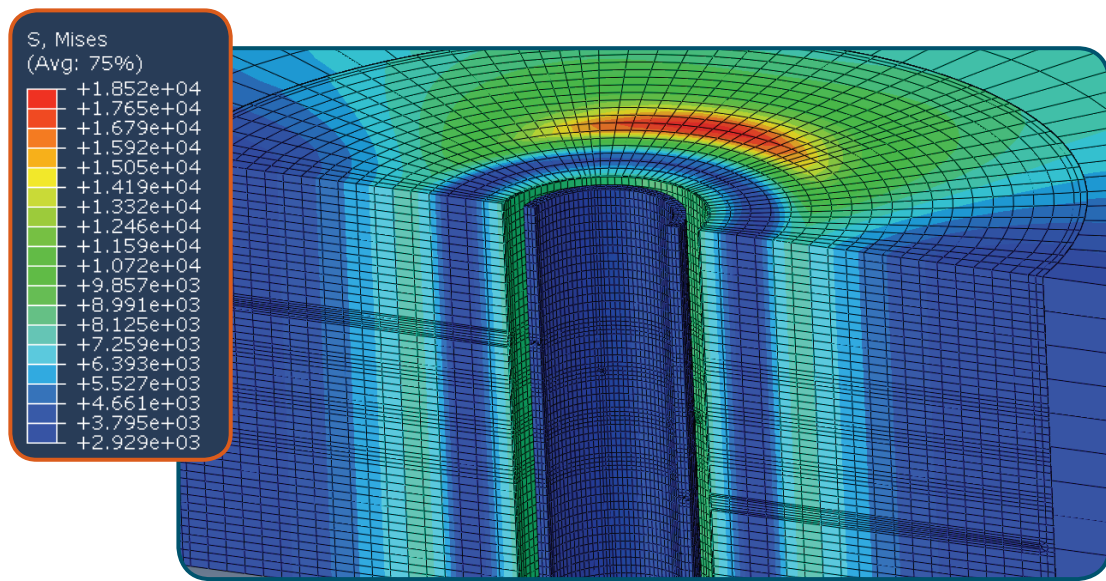


FIGURA 48. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS AL DESCENDER EL REVESTIDOR

El lodo que se utilizó tiene una densidad de $1,546 \text{ g/cm}^3$ (12,9 lpg), mientras que el cemento de $1,977 \text{ g/cm}^3$ (16,5 lpg), debido a esto la presión hidrostática aumenta 27 por ciento en el intervalo de tiempo que la lechada es bombeada hacia el espacio anular entre la pared del pozo y la superficie externa del revestidor (ver figura 49).

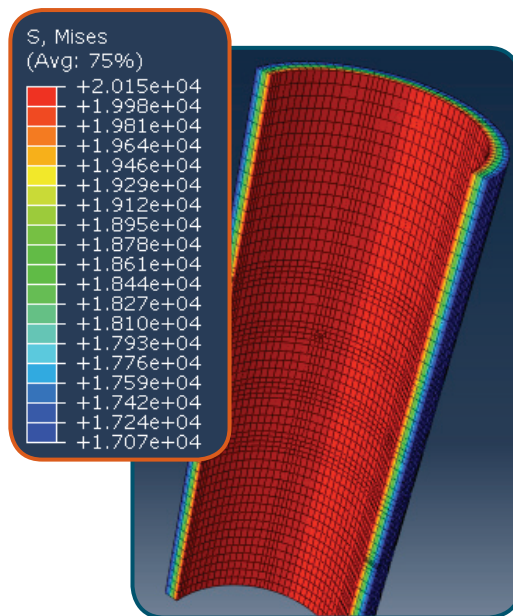


FIGURA 49. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN EL REVESTIDOR AL BOMBLEAR LA LECHADA

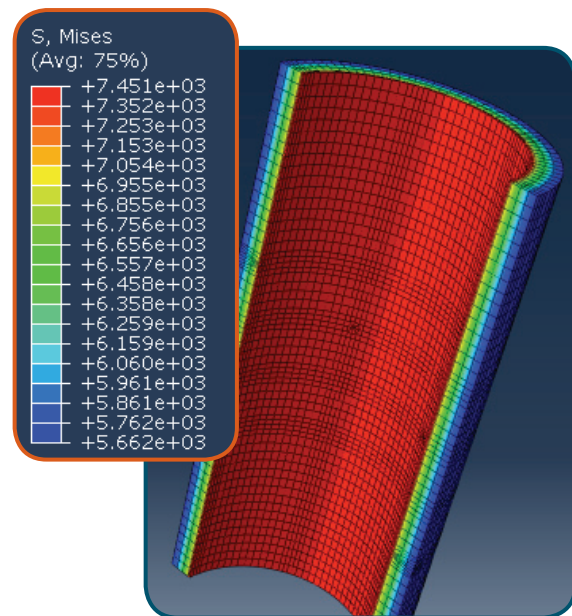


FIGURA 50. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN EL CEMENTO SÓLIDO (FRAGUADO COMPLETAMENTE)

En la figura 50 se presenta la distribución de esfuerzos en el cemento en el momento que el mismo fragua, y en todo el modelado (ver figura 51). El esfuerzo máximo medido en la formación es solo 2 por ciento menor al registrado en el paso donde se descendió el revestidor.

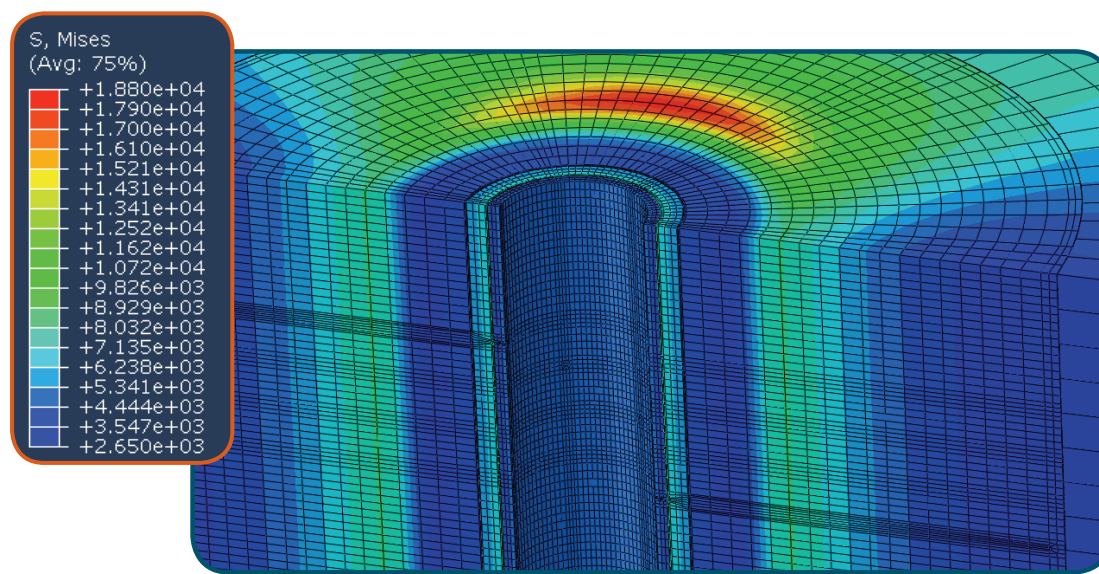


FIGURA 51. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS AL FRAGUAR EL CEMENTO

Al terminar el proceso de cementación se procede a completar el pozo, generalmente en esta fase se cambia el lodo con el cual se realizó la perforación por otro con propiedades distintas (que faciliten el proceso de cañoneo y extracción de los hidrocarburos), entre estas propiedades se encuentra la densidad, sin embargo, esta variación puede ser mínima por lo que a los efectos de este estudio, donde se mide la presión hidrostática y no la composición química de los fluidos, la presión hidrostática aplicada en la superficie interna del revestidor se mantiene constante en 72,02 MPa (10.446 lppc).

Luego se hace descender el cañón y se activan sus cargas explosivas generando trayectorias de comunicación entre el pozo y el yacimiento; la figura 52 representa la distribución de esfuerzos luego de ejecutar el proceso de cañoneo.

Al aplicar el cañoneo se registra un incremento en el esfuerzo máximo de 19 por ciento, de 129,62 MPa (18.800 lppc) a 153,68 MPa (22.290 lppc), pero lo primero que se puede observar es que ya no se ubica a varias decenas de centímetros del pozo, como se había mantenido en los estados de carga anteriores; es decir, luego de realizar las perforaciones en el modelado, se produce una mayor concentración de esfuerzos en los alrededores de éstas.

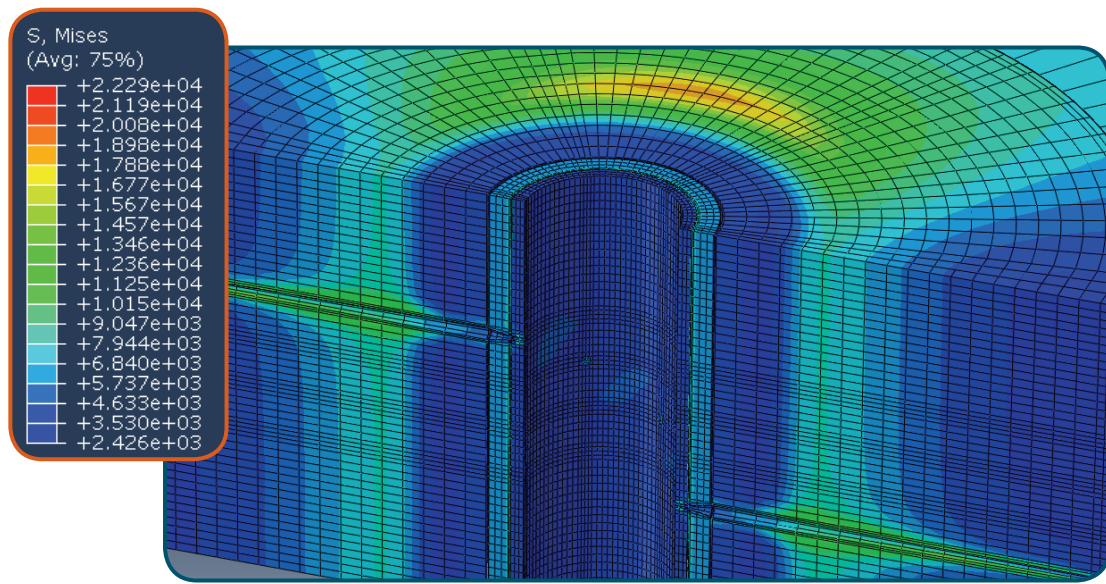


FIGURA 52. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS LUEGO DE EJECUTAR EL CAÑONEO

En la siguiente imagen se realiza un corte a 60° de la formación, así se puede apreciar fácilmente la zona donde se concentran los esfuerzos.

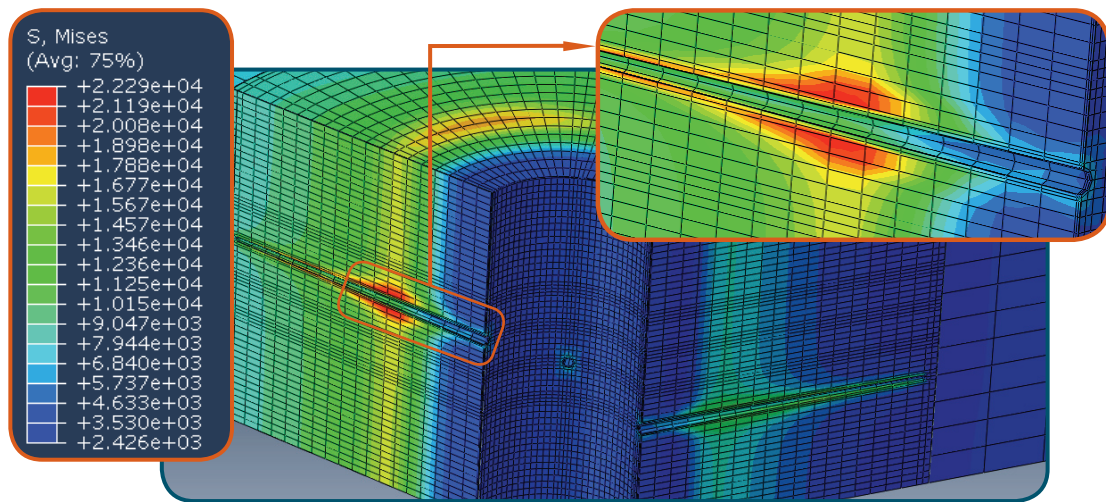


FIGURA 53. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LA FORMACIÓN (CORTE EN PERFORACIÓN A 60°)

En la figura 54 se representan las deformaciones plásticas equivalentes con la simbología de colores que se ha venido usando.

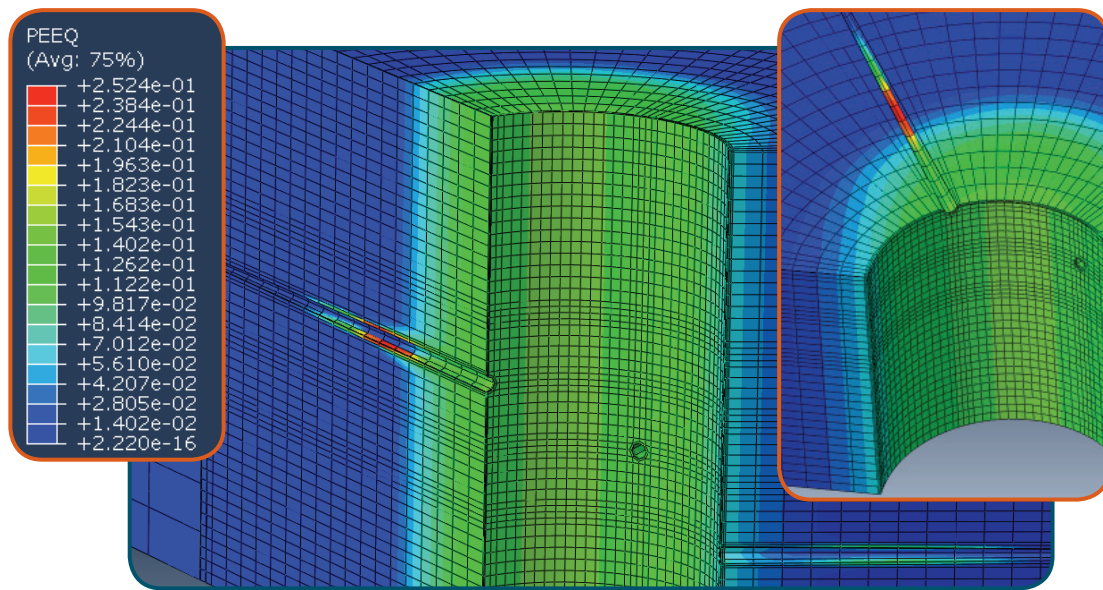


FIGURA 54. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EQUIVALENTES LUEGO DEL CAÑONEO (CORTE EN PERFORACIÓN A 60° Y CORTE HORIZONTAL)

Comparando las deformaciones plásticas equivalentes registradas en la pared del pozo al perforar con las medidas en las paredes de las perforaciones, se nota un aumento de 85 por ciento, de 0,1364 a 0,2524.

La figura 55 representa los esfuerzos generados en la formación para cada uno de los casos de carga, propios de los procesos para la construcción y completación del pozo; los mismos fueron tomados en el plano superior de modelo, radialmente y en dirección del esfuerzo horizontal mínimo.

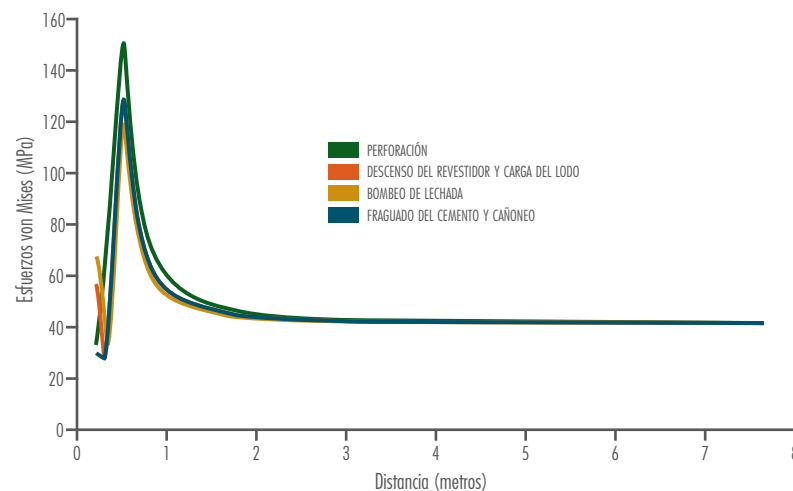


FIGURA 55. ESFUERZOS EN DIRECCIÓN RADIAL DE LA FORMACIÓN APROCIANDO LA PLASTIFICACIÓN DEL MATERIAL

En los esfuerzos para cada uno de los casos de carga, se registran los valores máximos a 60 centímetros del centro del pozo, cada uno disminuye para estabilizarse aproximadamente a tres metros del centro del pozo. De la misma manera en que los esfuerzos se estabilizan en el modelo elástico empleado para la validación del modelo, estos también lo hacen aproximadamente a tres metros de distancia del pozo, con la diferencia que al apreciar la plastificación, el esfuerzo máximo se desplaza adentro de la formación.

En la línea donde se midió el esfuerzo, el mayor de ellos se consigue en la perforación, mientras que para los otros tres casos de carga las variaciones son despreciables, se evidencia porque las curvas coinciden en casi toda su extensión, sin embargo, éste es sólo un plano del modelo, con el análisis de las figuras 53 y 54 se determinó que los máximos de esfuerzos y deformaciones se desplazan hacia las paredes de las perforaciones y su alrededores.

Luego de proponer el primer modelo, se debe hacer un estudio de convergencia del mallado, para verificar si se obtienen correctos valores en las aproximaciones que presenta el programa Abaqus mediante el análisis por elementos finitos.

3. CONVERGENCIA DEL MALLADO

En la siguiente tabla se expresan los valores de esfuerzos y deformaciones obtenidos de los nueve modelos propuestos para realizar estudio de convergencia del mallado.

TABLA 6. VARIACIÓN DE TÓPICOS MODIFICANDO LA DENSIDAD DEL MALLADO

DENSIDAD DE MALLA			TIEMPO DE PROCESAMIENTO (MINUTOS)	FORMACIÓN			CEMENTO	
ELEMENTOS	NODOS	NODOS/ELEM. (%)		ESF. MÍN (MPa)	ESF. MÁX (MPa)	DEF. PLÁST. (%)	ESF. MÍN (MPa)	ESF. MÁX (MPa)
17.290	21.043	21,7	9	16,02	106,39	0,0926	19,27	94,67
26.647	31.578	18,5	21	13,16	96,94	0,0805	18,62	94,25
42.469	49.048	15,5	51	16,76	100,53	0,0976	18,67	85,71
64.677	75.744	17,1	99	15,06	119,01	0,1739	22,47	70,81
84.606	95.954	13,4	201	15,47	135,21	0,1943	22,54	71,02
102.816	117.541	14,3	329	16,73	153,68	0,2524	26,71	67,83
175.480	194.683	10,9	735	16,75	154,99	0,2546	26,60	65,68
206.600	228.138	10,4	1098	16,69	157,34	0,2652	26,31	67,73
236.436	261.536	10,6	1524	16,79	152,31	0,2546	27,26	69,02

En la figura 56 se gráfica el tiempo de procesamiento, y desde la 57 a la 60, los esfuerzos y deformaciones en el cemento y la formación en función del número de elementos.

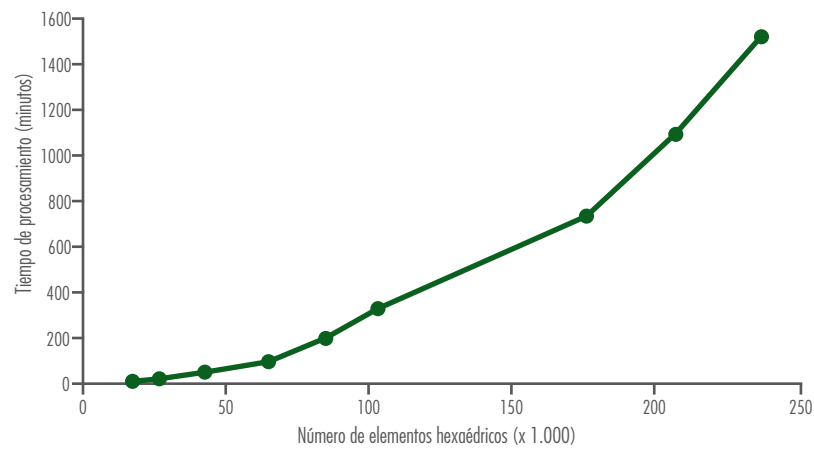


FIGURA 56. TIEMPO DE PROCESAMIENTO MODIFICANDO LA DENSIDAD DEL MALLADO

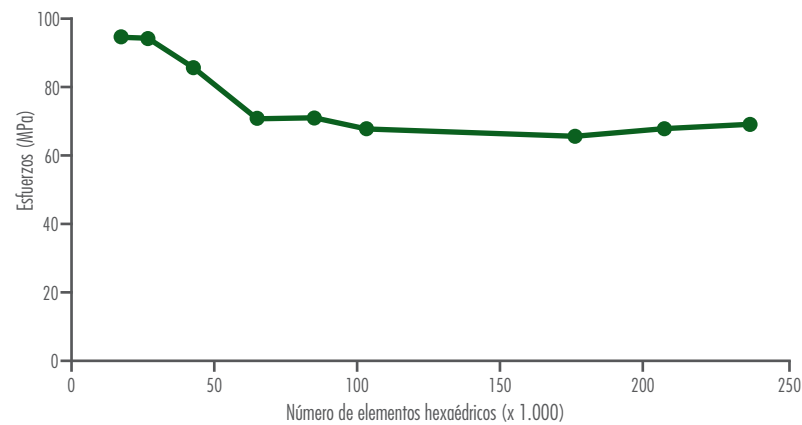


FIGURA 57. ESFUERZOS MÁXIMOS EN EL CEMENTO MODIFICANDO LA DENSIDAD DEL MALLADO

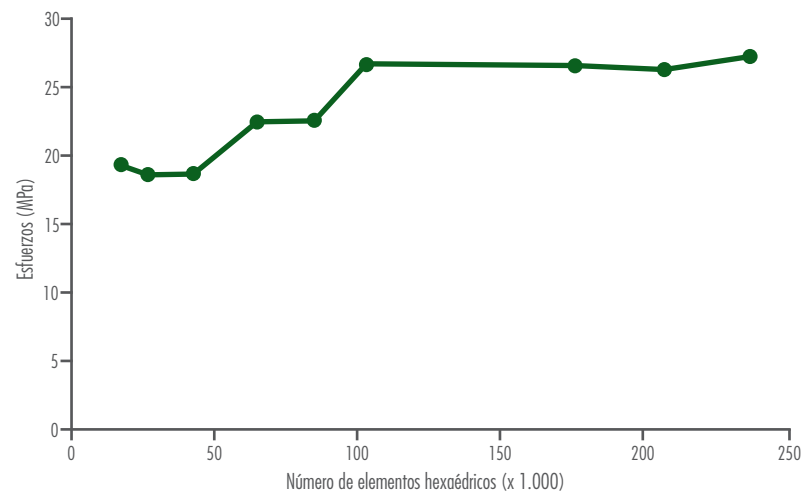


FIGURA 58. ESFUERZOS MÍNIMOS EN EL CEMENTO MODIFICANDO LA DENSIDAD DEL MALLADO

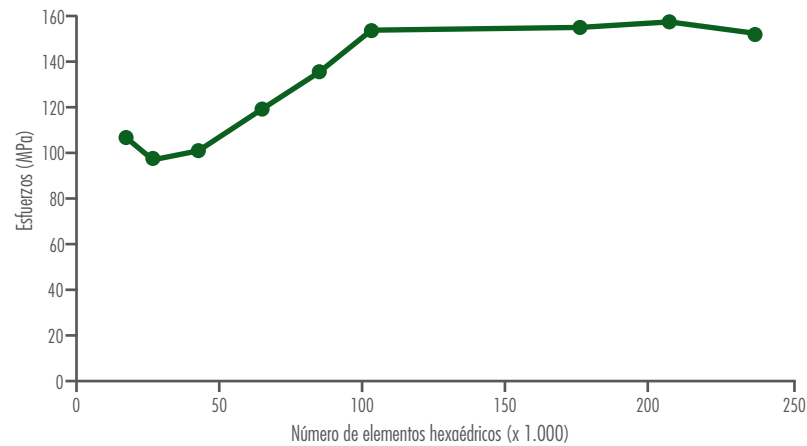


FIGURA 59. ESFUERZOS MÁXIMOS EN LA FORMACIÓN MODIFICANDO LA DENSIDAD DEL MALLADO

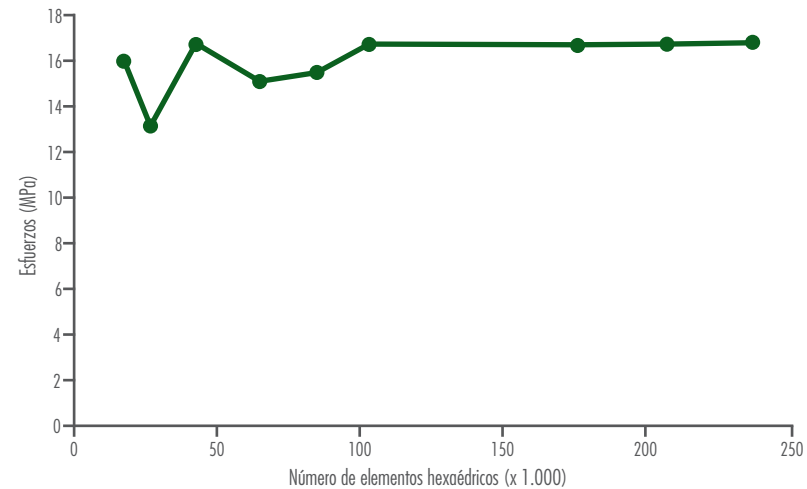


FIGURA 60. ESFUERZO MÍNIMO EN LA FORMACIÓN MODIFICANDO LA DENSIDAD DEL MALLADO

En la figura 61 se presenta una gráfica de las deformaciones plásticas equivalentes medidas en la formación, la cual termina de fortalecer el criterio para escoger un modelo con la densidad de malla apropiada. Se determinó que debía ser uno de la segunda zona, donde los valores empiezan a estabilizarse.

Los esfuerzos máximos en el cemento se estabilizan aproximadamente en 67 MPa, los mínimos en 26 MPa; en la formación, los máximos y mínimos en 154 MPa y 16,7 MPa respectivamente, tanto en la tabla 5 como en las cinco gráficas es apreciable cómo el modelo conformado por 102.816, que tiene un tiempo de procesamiento aproximado de 329 minutos, es el primero donde se empiezan a obtener estos valores los cuales se mantienen

en los siguientes con una mayor densidad del mallado; por este motivo se determinó que era el más eficiente para seguir realizando las corridas.

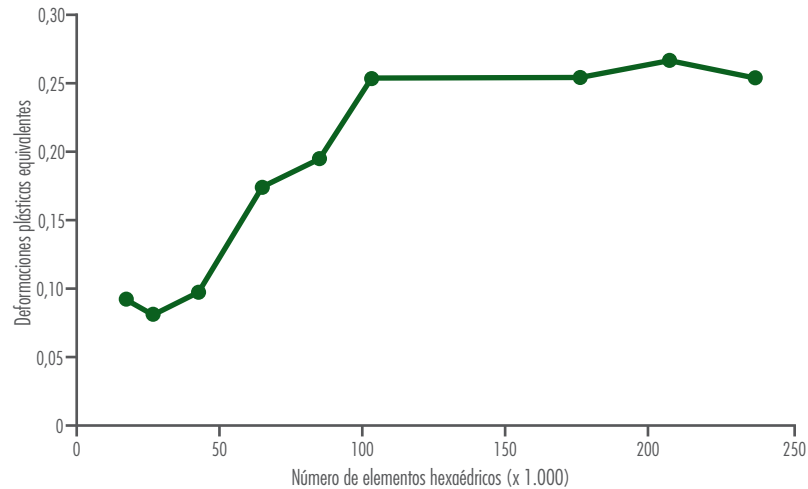


FIGURA 61. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EQUIVALENTES EN LA FORMACIÓN MODIFICANDO LA DENSIDAD DEL MALLADO

En la primera aproximación del modelo, se empleó el modelo conformado por 175.480 elementos, en el cual las mediciones ya están estabilizadas. Sin embargo, las corridas se siguieron realizando con el modelo conformado por 102.816 elementos, ya que el primero tiene un tiempo de procesamiento que es 223 por ciento mayor y apenas un aumento de 71 por ciento en la densidad de malla, lo que además no es requerido porque con el de menor densidad ya se validan los registros de esfuerzos y deformaciones, por tal motivo se determinó que era modelo óptimo para realizar el análisis mediante el MEF.

4. EVALUACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES

En el modelo propuesto no se aprecia: la porosidad, la densidad del fluido productor y la velocidad o presión con el cual éste sale del yacimiento, sólo se logra determinar la presencia de deformaciones plásticas y sus magnitudes, debido a esto se presentan los resultados en función del riesgo de arenamiento y no de la tasa de arena producida hacia el pozo.

Como se determinó anteriormente, las concentraciones de esfuerzos y deformaciones se ubican en las cercanías de las perforaciones generadas al cañonear; a continuación se presenta una gráfica de los valores de esfuerzos en los nodos que conforman el agujero.

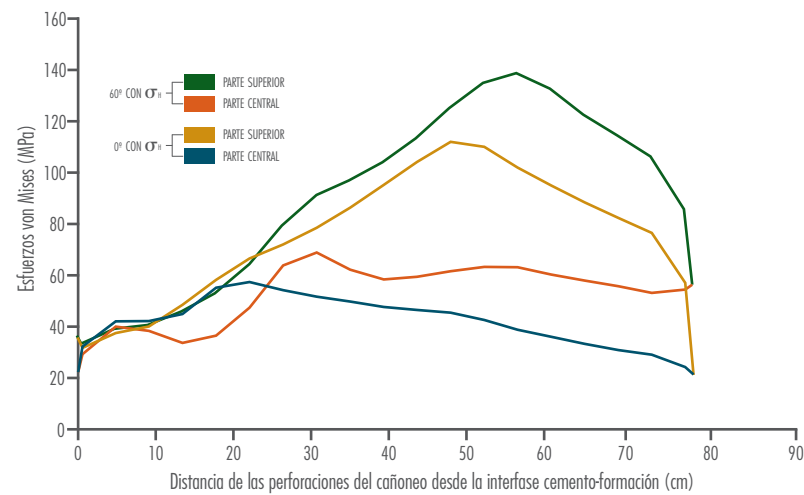


FIGURA 62. ESFUERZOS EN SECCIONES DE LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES

En cada superficie de la perforación se tomaron dos medidas, una en la línea superior y otra en el medio de la misma (ver imagen 63), es notable que en la línea superior es donde se presentan los esfuerzos máximos, es decir, los esfuerzos en las paredes de los orificios generados al cañonear no son constantes para cada corte transversal.

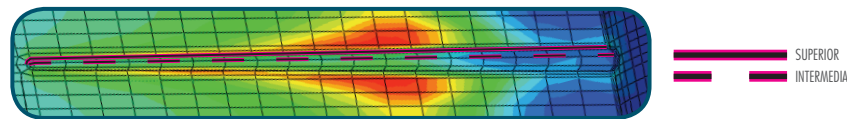


FIGURA 63. LÍNEAS DE LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES

El esfuerzo máximo se registra a 21,86 centímetros de la interfase cemento-formación, y es de 138,85 MPa, 10 por ciento menor a la máxima medida en el modelo por completo (153,68 MPa), de igual manera como se evidenció en la perforación del pozo, donde la zona de mayor esfuerzo es desplazada del borde, aquí también se presenta el mismo fenómeno debido a las deformaciones plásticas en las paredes de los orificios (ver figura 64).

La diferencia de esfuerzos en una misma perforación es tan apreciable que, en la línea intermedia del orificio alineado a 60° con el esfuerzo horizontal máximo, el mayor esfuerzo es 68,55 MPa, aproximadamente la mitad del medido en la línea superior; tal es la diferencia que los esfuerzos en la línea superior del orificio alineado a 0° son mayores a los de 60° en su sección intermedia.

Sin embargo, no se puede desligar la variación de esfuerzos en las paredes de los orificios, lo que si se determina es que los cañones que se alinean con el esfuerzo horizontal

máximo registran un esfuerzo máximo de 111,92 MPa, 20 por ciento menor a los que se apuntaron a 60°.

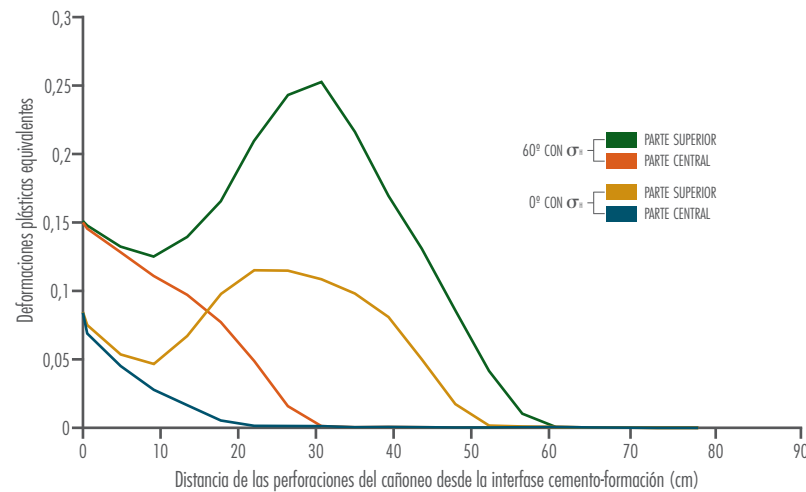


FIGURA 64. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EQUIVALENES EN SECCIONES LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES

Las deformaciones plásticas se distribuyen de manera similar a los esfuerzos, siendo mayores en la línea superior. En la perforación alineada con el esfuerzo máximo horizontal la mayor deformación plástica equivalente es 0,1154, mientras que en la alineada a 60° se registró 0,2524 (218 por ciento mayor).

5. INFLUENCIA DE LA ANISOTROPÍA EN LOS ESFUERZOS *IN SITU*

5.1. En modelos ensamblados

Esta evaluación se realizó en ocho configuraciones de esfuerzos *in situ*, cuatro de ellas con un régimen normal, y el resto con uno inverso, en ambos casos se fijó el esfuerzo mínimo; para el primero en 50 por ciento, y para el segundo en 108 por ciento del esfuerzo vertical (107,35 MPa / 15.572 lppc), la tabla 7 detalla las magnitudes de dichas cargas geostáticas.

El gradiente está representado porcentualmente en relación con el esfuerzo vertical, cabe destacar que este esfuerzo tiene un gradiente propio de 22,62 MPa/m (1 lppc/pie), referenciado con la distancia medida desde la superficie (profundidad cero), donde la única presión es generada por el aire y el esfuerzo de sobrecarga es nulo.

La relación de anisotropía representa el incremento porcentual que tiene el esfuerzo máximo horizontal en relación con el mínimo, por ejemplo: el segundo modelo tiene un

esfuerzo máximo que es 60 por ciento del vertical y una anisotropía de 20 por ciento, dado por el incremento en relación con el primer modelo donde se aplica un estado isotrópico de esfuerzos.

TABLA 7. ESFUERZOS HORIZONTALES A 4.746 M (15.572 PIES)

MÍNIMO (MPa)	MÁXIMO (MPa)	GRADIENTE (%)	RELACIÓN DE ANISOTROPÍA (%)
	53,68	50 (isotrópico)	0
RÉGIMEN Normal	64,42	60	20
53,68 MPa (0,5 σ_v)	75,15	70	40
	85,88	80	60
	115,94	108 (isotrópico)	0
RÉGIMEN INVERSO	128,82	120	11
115,94 MPa (1,08 σ_v)	140,63	131	21
	152,44	142	31

En las figura 65 y 66 se grafican los esfuerzos máximos y mínimos, medidos en la formación de cada uno de los modelos donde se variaron los esfuerzos *in situ*.

Para un régimen inverso, en la configuración isotrópica de esfuerzos horizontales, el valor máximo medido fue 118,8 MPa; cuando se fija una anisotropía de 11 por ciento, el esfuerzo se incrementa el doble del porcentaje, un 22 por ciento (hasta 145,21 MPa), sin embargo, esta varianza no se mantiene igual a medida que se sigue aumentando el esfuerzo *in situ*, dicha afirmación se evidencia ya que, cuando la diferencia de esfuerzos horizontales es 21 por ciento, el máximo se incrementa 25 por ciento, y en el último modelado, donde se tenía una anisotropía de 31 por ciento, el esfuerzo alcanzó a 153,68 MPa (29 por ciento de incremento).

En el régimen normal de esfuerzos *in situ*, la curva tiene un comportamiento más estable a la anterior; cuando la anisotropía se incrementa 20 por ciento, el esfuerzo máximo en la formación sólo aumenta 1,8 por ciento en relación con el estado isotrópico (de 84,81 MPa a 86,33 MPa), estos aumentos mínimos se mantienen aún en incrementos mayores del esfuerzo máximo horizontal; el caso más crítico, donde se estableció 60 por ciento de anisotropía en los esfuerzos horizontales, el valor máximo medido fue de 95,63 MPa, sólo un 12,8 por ciento mayor de la configuración isotrópica.

En la figura 66, donde se grafican las esfuerzos mínimos medidos en la formación, la primera diferencia fácilmente apreciable, es que en el régimen normal de esfuerzos, las mediciones son mayores a las del régimen inverso, con la diferencia que el estado isotrópico es donde se presentan los mayores esfuerzos y luego decrecen.

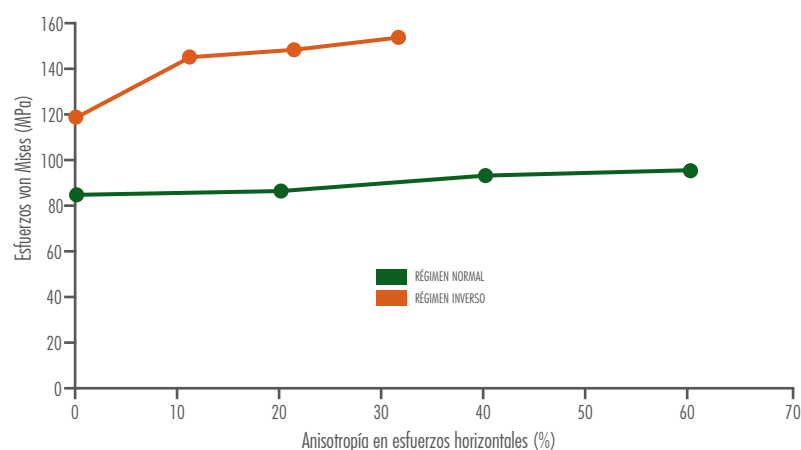


FIGURA 65. ESFUERZOS MÁXIMOS EN LA FORMACIÓN VARIANDO LA ANISOTROPÍA DE ESFUERZOS HORIZONTALES

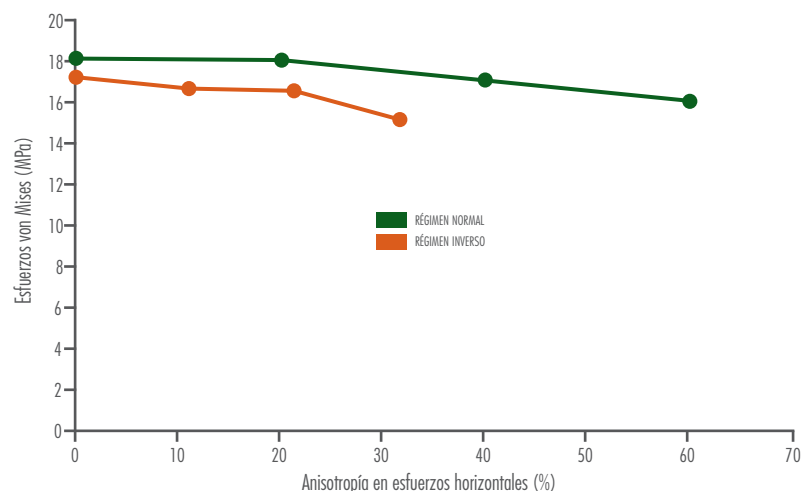


FIGURA 66. ESFUERZOS MÍNIMOS EN LA FORMACIÓN VARIANDO LA ANISOTROPÍA DE ESFUERZOS HORIZONTALES

En el régimen inverso, al fijar la anisotropía en 31 por ciento, el esfuerzo disminuye de 17,2 MPa a 15,1 MPa (14 por ciento); mientras en el régimen normal, donde el caso extremo de diferencia entre los esfuerzos horizontales *in situ* es de 60 por ciento –aproximadamente el doble del régimen anterior–, el esfuerzo solo disminuyó 13 por ciento.

La distribución de esfuerzos nos determina las zonas críticas donde los mismos se concentran, sin embargo, más importante que determinar las magnitudes y los puntos donde se ejercen, es cuantificar sus efectos, siendo el tópico más relevante las deformaciones plásticas (ver figura 67), ya que generan las fallas y posterior arenamiento en la formación.

De la misma manera como se registraron los esfuerzos máximos, son los modelos con un régimen inverso donde se presentan las mayores deformaciones plásticas, además con alta pendiente en función del grado de anisotropía.

La isotrópica se presenta como la configuración más estable para cada uno de los regímenes de esfuerzos, en el inverso, se registró 0,1547 en las deformaciones plásticas equivalentes, dicho valor se incrementa gradualmente según se hace más crítica la relación de esfuerzos horizontales, cuando estos esfuerzos máximos tienen una diferencia de 31 por ciento, las deformaciones se incrementan a 0,2524 (63 por ciento mayor).

El estado isotópico en un régimen normal registra 0,0569 de deformaciones plásticas equivalentes, lo que representa 35 por ciento de las medidas en el régimen inverso. De igual manera, en el régimen normal las deformaciones aumentan acorde se incrementa la anisotropía, pero lo hacen con una pendiente menor; por ejemplo, cuando los esfuerzos horizontales se diferencian en 20 por ciento, las deformaciones aumentan 16 por ciento (de 0,0569 a 0,0661), cuando la diferencia es 40 y 60 por ciento, estas deformaciones se incrementan en 39 y 58 por ciento respectivamente.

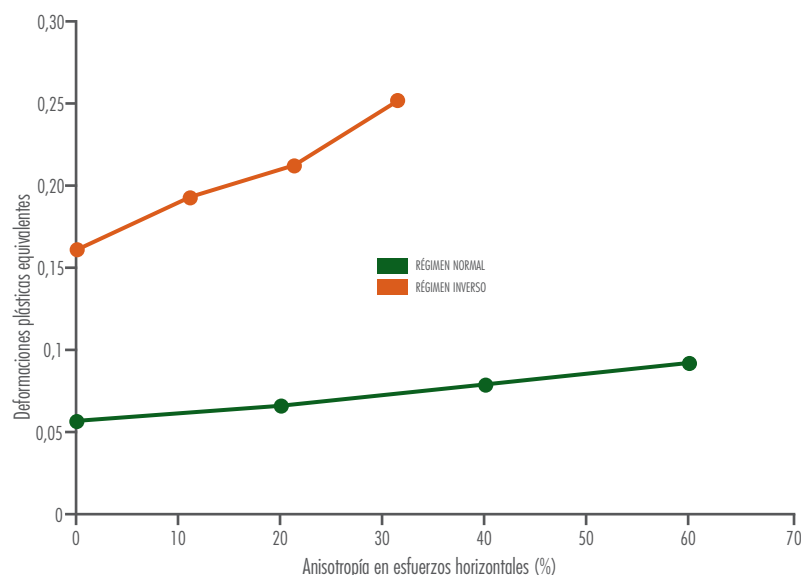


FIGURA 67. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EQUIVALENTES EN LA FORMACIÓN VARIANDO LA ANISOTROPÍA DE ESFUERZOS HORIZONTALES

En un régimen normal, son similares los porcentajes de incremento de deformaciones en función de los de la anisotropía —podría aproximarse a una relación uno a uno—, en cambio en el inverso las deformaciones aumentan aproximadamente un 50 por ciento más al incremento que se aplica en los esfuerzos *in situ*.

Estos valores de esfuerzos y deformaciones se determinaron evaluando el modelo como un solo conjunto, sin embargo, el riesgo de producir arena en el pozo es consecuencia de la falla en las rocas en los alrededores de las perforaciones generadas al cañonear, por lo tanto, a continuación evaluaremos las concentraciones de los mencionados tópicos en las paredes de los agujeros.

5.2. En las adyacencias de las perforaciones

La siguiente evaluación tiene dos variables relevantes: la primera es la anisotropía de esfuerzos *in situ*, la cual se estudió de manera generalizada en el punto anterior, pero, como ahora las medidas se tomarán específicamente en las paredes de los agujeros, se considerará el ángulo relativo de éstos con los esfuerzos máximos horizontales.

En el ítem 4 del actual capítulo, se logró determinar que los valores máximos de esfuerzos y deformaciones se ubicaban en la sección más alta de las perforaciones y no en el medio de éstas, por lo que las medidas se tomaron en estas líneas superiores. Los análisis se dividen en dos partes: la primera con regímenes normales de esfuerzos *in situ*, y la segunda para regímenes inversos.

5.2.1. Para régimen normal de esfuerzos

En las siguientes dos imágenes se grafican los esfuerzos en las perforaciones alineadas con el esfuerzo horizontal máximo y las apuntadas a 60°.

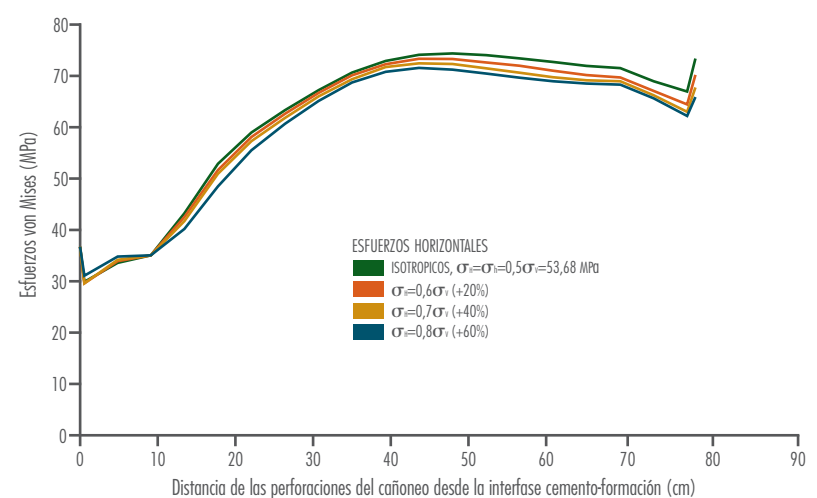


FIGURA 68. ESFUERZOS EN LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES ALINEADAS CON EL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO (RÉGIMEN NORMAL)

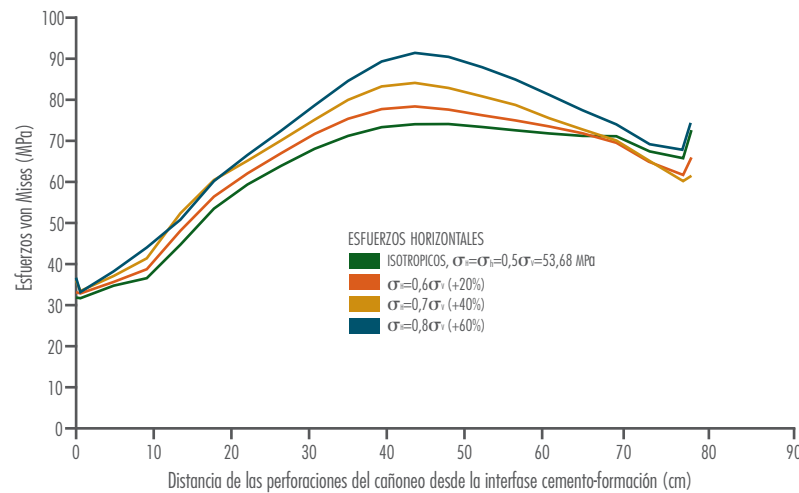


FIGURA 69. ESFUERZOS EN LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES ALINEADAS A 60° CON EL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO (RÉGIMEN NORMAL)

En la configuración isotrópica, se registró un valor máximo de 74,27 MPa, mientras que el modelo que presentaba la mayor anisotropía —diferencia de 60 por ciento entre esfuerzos horizontales—, se midió 71,48 MPa, únicamente un 4 por ciento menos.

En la configuración isotrópica, los esfuerzos se mantienen igual a la medida en los cañones alineados con el esfuerzo máximo, registrando 74,24 MPa (diferencia menor a 1 por ciento), dicha similitud sirve para validar el modelo donde se aplica la condición isotrópica, ya que los esfuerzos se deben mantener igual en las perforaciones porque los esfuerzos *in situ* son iguales para cualquier ángulo.

Proporcionalmente se incrementa la anisotropía, también lo hacen los esfuerzos en las paredes de las perforaciones, en la configuración más crítica ($\sigma_H = 1,6\sigma_v$), el esfuerzo máximo medido fue de 91,32 MPa, 23 por ciento mayor en la registrada para la configuración más estable (isotropía).

Para ambas direcciones donde se apuntaron los cañones, los esfuerzos máximos se concentraban a 43 centímetros de la interfase cemento-formación, que es aproximadamente la mitad de la longitud total del agujero (77 cm). En los cañones a cero grados del esfuerzo máximo, a pesar de que las variaciones son mínimas, cabe destacar que la condición menos estable es la isotrópica, a diferencia de las perforaciones a 60° que es la que presenta los menores esfuerzos. En las figuras 70 y 71 se presentan las deformaciones plásticas para determinar con certeza la influencia de los esfuerzos *in situ* y la dirección de los cañones en la estabilidad mecánica de las perforaciones.

En las gráficas de deformaciones plásticas equivalentes se nota que, a diferencia de los esfuerzos, los valores máximos se concentran en zonas más cercanas a la interfase cemento-

revestidor –aproximadamente a 22 centímetros–, en las perforaciones alineadas con el esfuerzo horizontal máximo, las mayores deformaciones se ubican en dos zonas, la primera de ellas es la especificada anteriormente (22 cm), y la segunda es la entrada a la formación, donde las magnitudes son muy altas y similares para todos los casos de anisotropía de esfuerzos, lo que infiere que esta zona es la más propensa a fallar, generando la erosión de la roca.

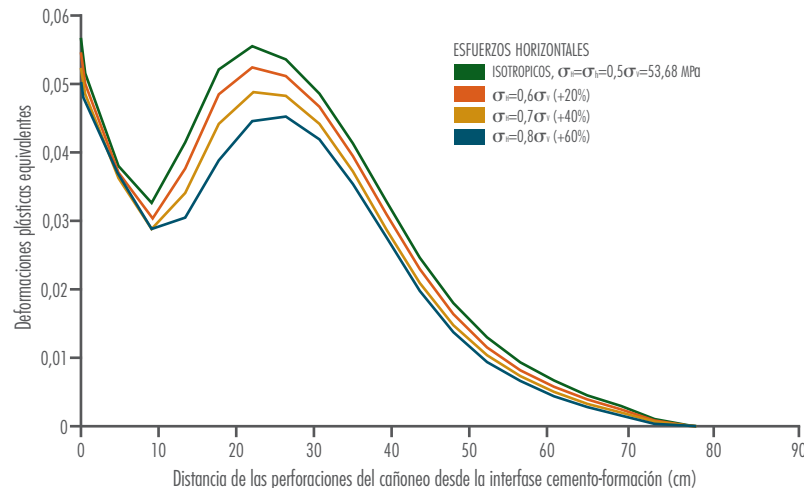


FIGURA 70. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EQUIVALENTES EN LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES ALINEADAS CON EL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO (RÉGIMEN NORMAL)

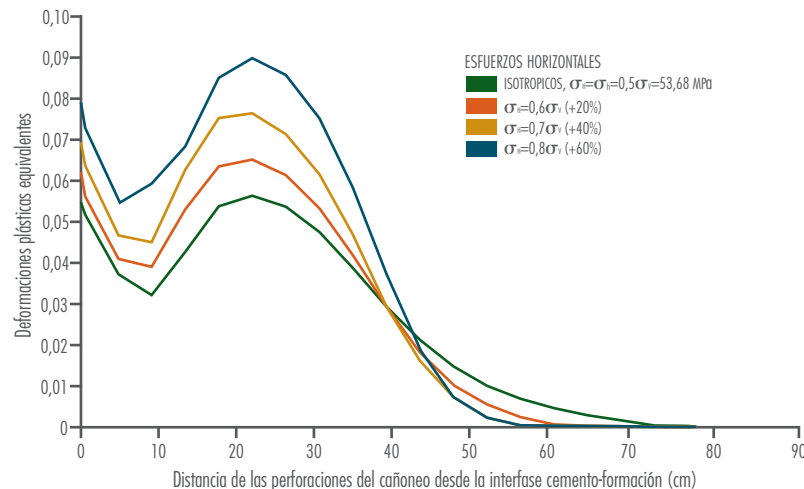


FIGURA 71. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EQUIVALENTES EN LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES ALINEADAS A 60° CON EL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO (RÉGIMEN NORMAL)

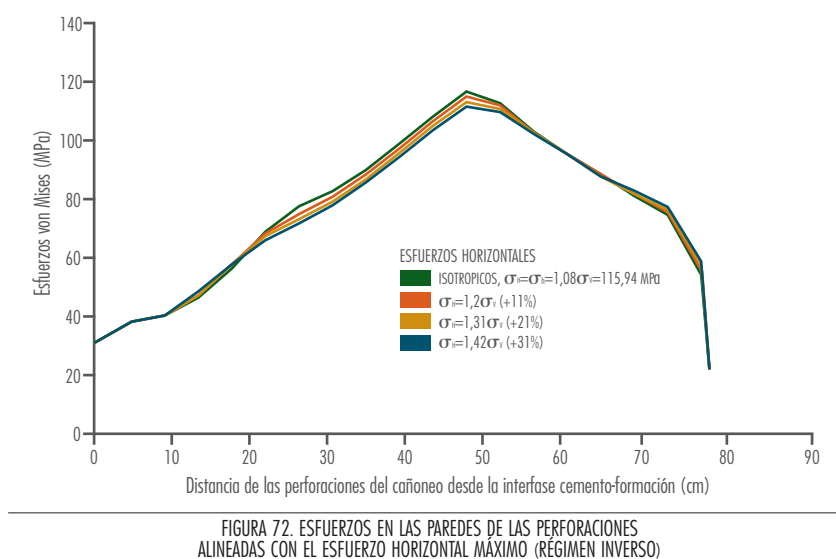
En las perforaciones alineadas con el esfuerzo horizontal máximo, la configuración menos estable sigue siendo la isotrópica, mientras que en el modelo con la anisotropía más elevada

($\sigma_H = 1,6 \sigma_h$) la deformación plástica disminuye 20 por ciento —de 0,0569 a 0,0454—. Luego de alcanzar su valor máximo a 22 centímetros, las deformaciones disminuyen drásticamente hasta igualarse a cero al final de las perforaciones (77 cm).

En la curva de isotropía de la figura 71, la deformación máxima medida es 0,0569, cuando éstas se evalúan en el modelo con la mayor anisotropía de esfuerzos, se incrementan 60 por ciento, a 0,0898. Para los modelos anisotrópicos, las deformaciones se hacen cero (0) antes del final de las perforaciones, aproximadamente en una profundidad de 57 cm (20 cm antes del fondo de los agujeros).

5.2.2. Para régimen inverso de esfuerzos

En los cuatro modelos que se realizaron con este régimen, el valor de esfuerzo horizontal mínimo se fijó 8 por ciento mayor que el esfuerzo de sobrecarga, en 115,94 MPa. La siguiente gráfica simboliza las mediciones de los esfuerzos presentes en la pared de las perforaciones alineadas con el esfuerzo máximo.



Los valores máximos se ubican a 47 centímetros de la perforación, medidos a partir de la interfase cemento-revestidor; se aprecia que en estas perforaciones alineadas con el esfuerzo máximo horizontal, las curvas no tienen variación significativa en relación con las modificaciones de los esfuerzos *in situ*, con una diferencia máxima de 3 por ciento. Entre las cuatro configuraciones, es en la isotrópica donde se obtiene el valor máximo, que es de 116,41 MPa.

En la distribución de esfuerzos de las perforaciones distanciadas 60° con el esfuerzo horizontal máximo (ver figura 73), el modelo isotrópico presenta los menores valores, siendo su máximo 116,38 MPa, lo que representa 84 por ciento del máximo total (138,85 MPa), registrado en el modelo con mayor anisotropía (modelo piloto).

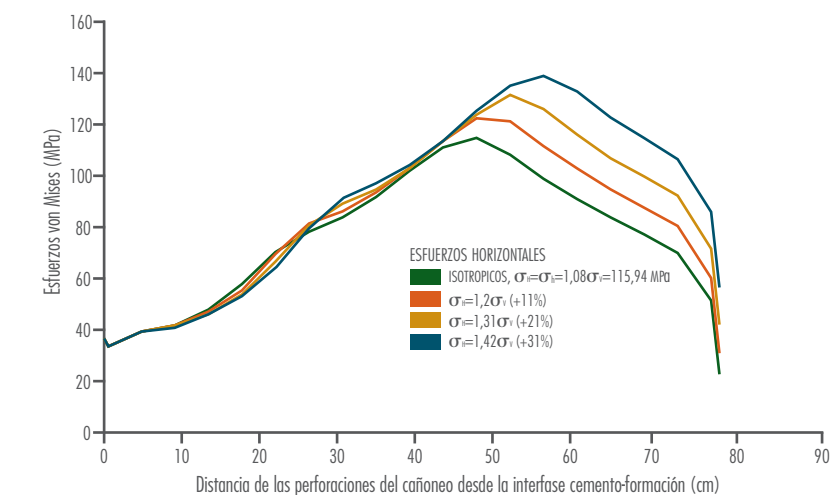


FIGURA 73. ESFUERZOS EN LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES ALINEADAS A 60° CON EL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO (RÉGIMEN INVERSO)

Se presentan curvas similares para cada una de las configuraciones, sin embargo, no se define una profundidad en donde se concentren los valores máximos, sino que esta zona se ubica más al fondo del agujero según se incrementa la anisotropía de esfuerzos; esta variación está relacionada con la liberación de esfuerzos que presenta la formación cuando se deforma.

Las deformaciones plásticas equivalentes en los agujeros alineados con el esfuerzo horizontal máximo (ver figura 74) son mayores en la configuración isotrópica, registrando 0,1547, mientras que en la configuración con mayor anisotropía es 25 por ciento menor (0,1154). Para todas las configuraciones, estas magnitudes son cero (0) a 55 centímetros de profundidad en la perforación.

En los agujeros alineados 60° con el esfuerzo horizontal máximo (ver figura 75), las deformaciones aumentan según lo hace la anisotropía, en la configuración con iguales esfuerzos horizontales la magnitud medida fue 0,1544, mientras que, cuando el horizontal máximo es 31 por ciento mayor del mínimo (anisotropía), se registra 0,2524 (63 por ciento mayor).

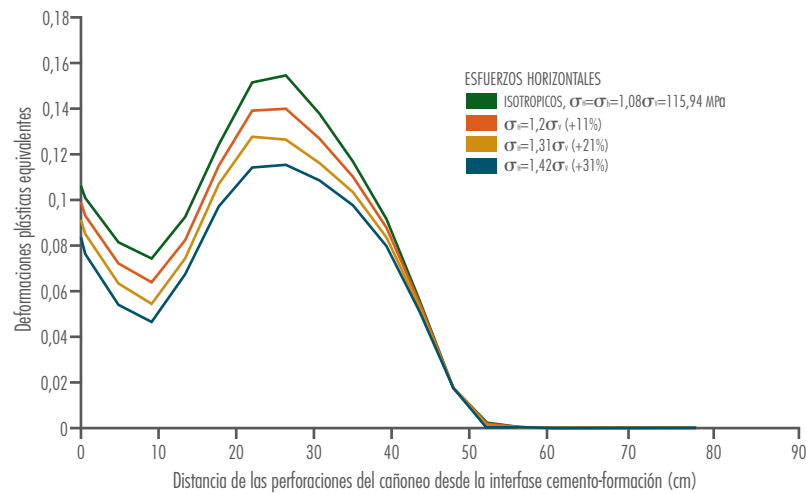


FIGURA 74. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EQUIVALENTES EN LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES ALINEADAS CON EL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO (RÉGIMEN INVERSO)

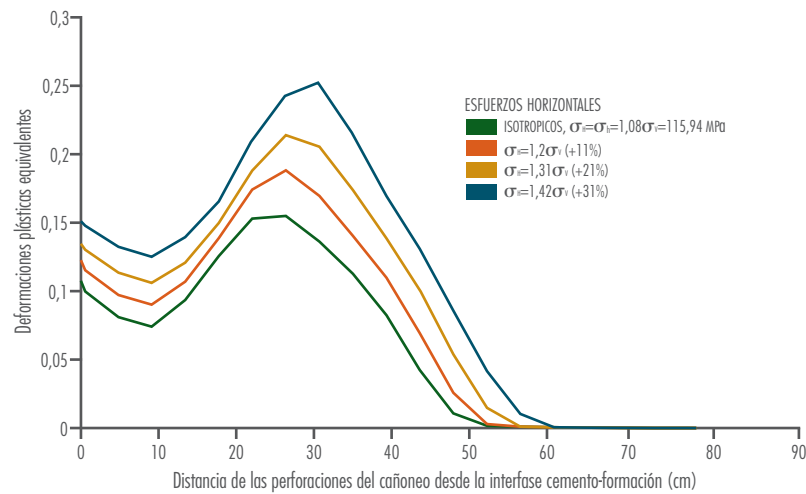


FIGURA 75. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EQUIVALENTES EN LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES ALINEADAS A 60° CON EL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO (RÉGIMEN INVERSO)

Habiendo analizado la estabilidad mecánica de las perforaciones al variar los esfuerzos *in situ* y ángulo de fase; ahora se evaluará si las propiedades elásticas del cemento afectan la estabilidad en el sistema revestidor-cemento-formación.

6. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS DEL CEMENTO

Para esta evaluación se emplearon tres lechadas, en las cuales se mantuvo constante la densidad, es decir, la presión hidrostática que ejercían al ser líquidas era igual, lo que sí se

modificó, para cada una, fue el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν), en la siguiente tabla se especifican las magnitudes de dichas propiedades.

TABLA 8. PROPIEDADES ELÁSTICAS DEL CEMENTO

Nº	MÓDULO DE YOUNG	COEFICIENTE DE POISSON
1	372.319 MPa (54e4 lppc)	0,163
2	496.425 MPa (72e4 lppc)	0,22
3	944.587 MPa (137e4 lppc)	0,123

La lechada número dos ha sido empleada en todos los modelos anteriores, por lo tanto se tomará como el modelo base. Respecto al módulo de Young, la primera lechada tiene una disminución de 15 por ciento y la tercera un aumento de 90 por ciento, por lo que se cubre un amplio dominio en lo que a propiedades elásticas del cemento se refiere.

En la figura 76 se representan los esfuerzos máximos y mínimos medidos en la formación y sección del cemento cuando se hacen variar las propiedades elásticas de este último.

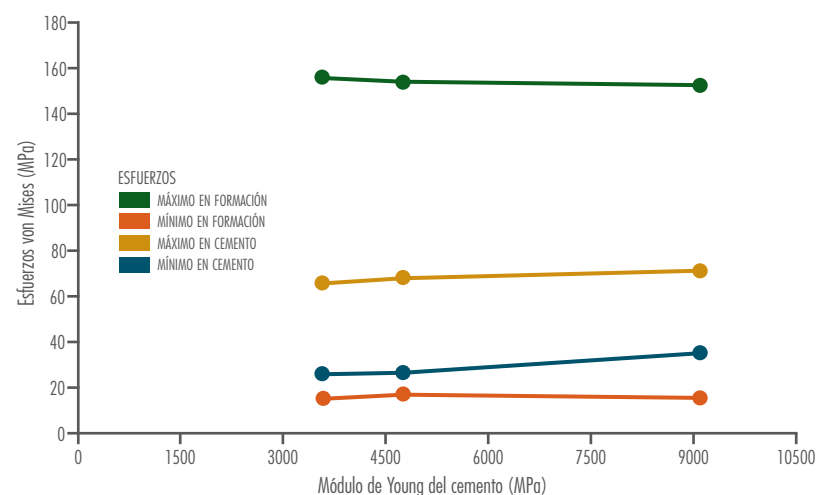


FIGURA 76. ESFUERZOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS VARIANDO LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS DEL CEMENTO

Los esfuerzos máximos se presentan en la formación, sin embargo, los mínimos también se ubican en ella, esto último a consecuencia de su liberación de esfuerzos al deformarse plásticamente, la sección de cemento no sufre este fenómeno debido a que no se aprecia su plasticidad. En las cuatro mediciones realizadas, se observa que las variaciones son mínimas; en los esfuerzos máximos de la formación, la diferencia entre la configuración con la lechada de menor módulo de Young y la del más alto –que es dos veces y media mayor–, es sólo de

3 por ciento (de 155,21 MPa a 151,97 MPa). De manera similar, los esfuerzos máximos ejercidos sobre el cemento sólo se incrementan 7 por ciento (de 66,47 MPa a 71,12 MPa).

7. EVALUACIÓN VARIANDO LA CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA

Las pruebas anteriores se realizaron en modelos con una densidad de tiro de 5,3 por pie y ángulo de fase de 60°, lo cual permitió evaluar los esfuerzos tanto alineados como no alineados al esfuerzo horizontal máximo. Sin embargo, a continuación se realiza la evaluación en un modelo donde todas sus perforaciones están alineadas con dicho esfuerzo horizontal (180° como ángulo de fase), además con una menor densidad de tiro (3 tpp). Ver la figura 77 que representa la distribución de esfuerzos registrada para esta configuración, a la imagen se le realizó un corte vertical por el centro del pozo.

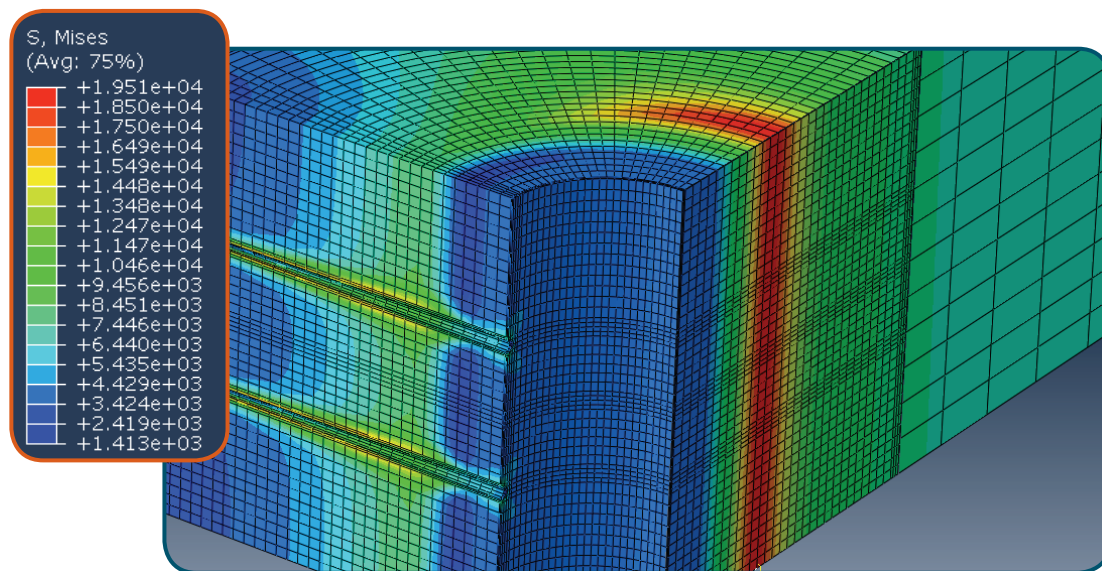


FIGURA 77. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS LUEGO DE EJECUTAR EL CAÑONEO (3 TPP Y ÁNGULO DE FASE 180°)

En este modelo se mantuvo el régimen inverso de esfuerzos *in situ*, con la misma anisotropía entre sus esfuerzos horizontales ($\sigma_h = 1,08 \sigma_v$, y $\sigma_H = 1,42 \sigma_v$), sin embargo, el esfuerzo máximo medido luego de ejecutar el cañoneo es de 134,52 MPa (19.510 lppc), 13 por ciento menos a la registrada en el modelo que tenía cañones apuntados a 60 grados del esfuerzo horizontal máximo (153,68 MPa).

Más importante que esta disminución del esfuerzo máximo es la zona donde se concentran; en la figura 76, se logra apreciar que se ubican en dirección del esfuerzo mínimo horizontal, varios centímetros adentro del pozo; es en este mismo lugar donde se vienen concentrando los esfuerzos desde que se realizó la perforación para generar el pozo.

Sin embargo, es en la evaluación de deformaciones plásticas donde se evidencia que la configuración con ángulo de fase 180° (alineadas las perforaciones con el esfuerzo máximo) es la más estable. Se registró una disminución de 36 por ciento en relación con las medidas en el modelo piloto (de 0,2524 a 0,1607), a pesar de esto tienen más relevancia las variaciones presentes en las cercanías de las perforaciones; en las figuras 78 y 79, se grafican los esfuerzos y deformaciones plásticas equivalentes en las paredes de dichos orificios.

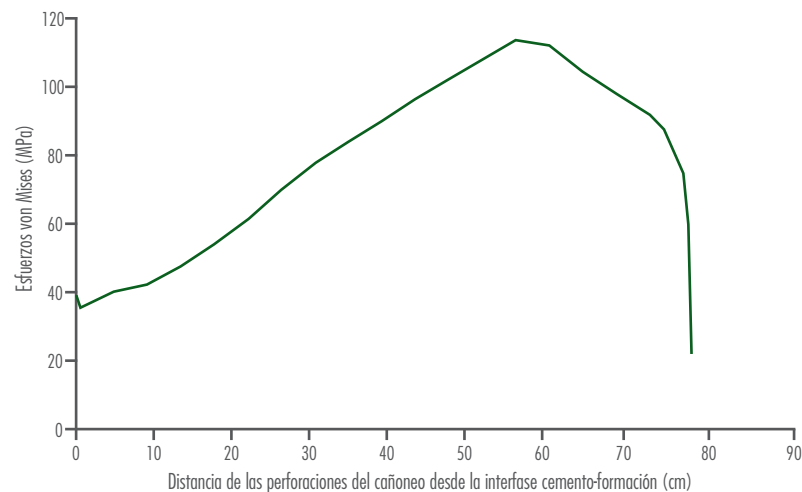


FIGURA 78. ESFUERZOS EN LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES (3 TPP Y ÁNGULO DE FASE 180°)

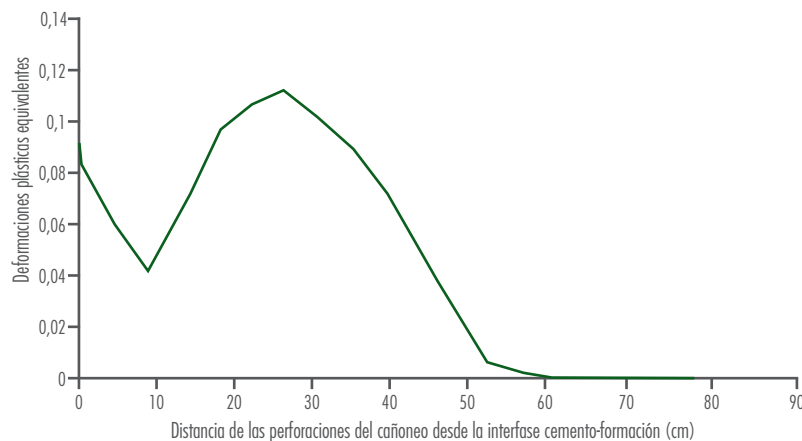


FIGURA 79. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EQUIVALENTES EN LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES (3 TPP Y ÁNGULO DE FASE 180°)

El esfuerzo máximo se midió a 54 centímetros de la interfase cemento-formación, y fue de 115,04 MPa, mientras el valor mayor para deformaciones plásticas se ubica a 26 centímetros y es de 0,1131. Comparando estas mediciones con las tomadas en las perforaciones igualmente alineadas al esfuerzo máximo horizontal pero del modelo piloto que tenía 60 grados como ángulo de fase, hay una variación de 2 por ciento tanto para los esfuerzos como para las deformaciones.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

1. APLICACIÓN DE LA LEY DE KIRSCH

Las corridas se siguieron realizando en el modelo que tiene 7,62 metros (300 pulg.) de distancia entre el centro de perforación del pozo y el extremo de la formación, propiedad que lo aproxima a la condición física real porque se presentan errores de 0,13 por ciento en los esfuerzos radiales y 0,005 por ciento en la representación de esfuerzos tangenciales, además que en los bordes de la formación del modelo propuesto se empleó un mallado con menor densidad a la cercana al pozo –con la finalidad de reducir el tiempo de procesamiento.

2. PRIMERA APROXIMACIÓN DEL MODELO ELASTOPLÁSTICO

En los modelos elastoplásticos la zona de concentración de esfuerzos se desplaza hacia dentro de la formación, a diferencia de los elásticos que permanecen en la pared del pozo, esto corresponde a los resultados estimados porque el material al elongarse y deformarse plásticamente, libera esfuerzos generando una zona de concentración en la zona no deformada –se comprueba al notar que en el modelo plástico el esfuerzo máximo es aproximadamente la mitad del medido en el modelo elástico. Además hace evidente la importancia de evaluar la plasticidad de la formación, porque aunque el estudio sea únicamente de concentración de fuerzas y no de deformaciones, los modelos elásticos concentran y alteran drásticamente los esfuerzos aproximados que son calculados a través del MEF.

Cuando se hace descender la tubería de revestimiento, ésta no se ve afectada por las presión hidrostática producto del fluido de perforación, debido a que los esfuerzos se contrarrestan por aplicarse tanto en su superficie externa como en la interna, sin embargo, ésta presión cumple una función de suma importancia al ser aplicada sobre las paredes del pozo que se acaba de perforar, evitar derrumbes antes de llenar el espacio anular con cemento.

Cuando se ejecutan los procesos de cementación se bombea la lechada líquida hacia el espacio anular entre la tubería y el revestidor, en la formación se brinda mayor soporte pero en el revestidor deja de existir equilibrio en las cargas de sus dos superficies, por lo que se presenta una distribución de esfuerzos, sin embargo, en el pozo estudiado, la tubería está

diseñada con acero P-110 (esfuerzo a la fluencia de 110.000 lppc / 758 MPa), y le permite soportar estas fuerzas sin presentar deformaciones relevantes.

Al fraguar el cemento, el esfuerzo máximo medido es muy similar al presente en el momento de hacer descender la tubería revestidora, con una diferencia menor de 2 por ciento, sin embargo, a pesar que los esfuerzos se mantienen iguales, esta sección de cemento soporta la formación evitando posibles derrumbes, además que brindará estabilidad en el momento de ejecutar el cañoneo, asegurando que se mantenga la integridad del sistema tubería-cemento-formación.

El cemento tarda al menos 24 horas para cambiar de fase líquida a sólida, aumentando su dureza en la misma proporción que disminuye la presión hidrostática, sin embargo, el fraguado se extiende por varios años y el cemento se sigue endureciendo. En el modelo propuesto se consideró un endurecimiento instantáneo, que es la representación más crítica, esto debido a que la presión hidrostática que se ejerce sobre la formación cumple la función de soportar la presión de poro en las paredes del pozo, fuerza que deja de existir al solidificarse la lechada. Hay dos formas aparte de la empleada para representar el fraguado: una es suponer que la presión hidrostática se mantiene constante a pesar que el cemento se solidificó –caso muy alejado del fenómeno real ya que esta presión debe reducirse–, la otra es disminuir gradualmente la presión hidrostática hasta que se iguale con la presión de poro logrando contrarrestarla, de esta manera se supone un estado de balance en el pozo, caso más ideal ya que el cemento ejerce precisamente la presión necesaria para soportar la formación, evitando posibles derrumbes en el pozo. En la siguiente gráfica se representan las variaciones de presión hidrostática para cada uno de los tres casos.

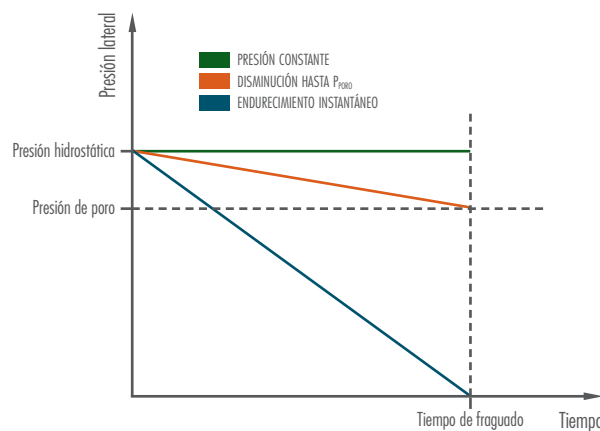


FIGURA 80. PRESIONES LATERALES EN LAS PAREDES DEL POZO MIENTRAS FRAGUA EL CEMENTO

Los esfuerzos de von Mises tomados en una línea con dirección al esfuerzo mínimo y en el plano superior del modelo propuesto, logran estabilizarse para cada uno de los casos de carga a tres metros del centro del pozo, también es notable cómo los valores máximos no se hayan en las paredes —como si se registró en el modelo elástico evaluado mediante la Ley de Kirsch—, sino que se desplazaron aproximadamente 60 centímetros dentro de la formación, esta medida representa el radio de plasticidad que se presenta en los alrededores del pozo, ya que son las deformaciones plásticas las que originan dicho desplazamiento, y la zona donde se anulan dichas deformaciones es el punto de concentración de los máximos esfuerzos.

3. CONVERGENCIA DEL MALLADO

El estudio de un modelo, cuando se toma en cuenta la plasticidad del material, es un análisis no-lineal y se deben realizar múltiples iteraciones para que converjan las ecuaciones que lo representan. La curva del tiempo de procesamiento en función de la densidad del mallado describe un comportamiento similar a una curva exponencial, tal motivo evidencia la importancia de realizar el estudio de convergencia de malla, ya que si se duplica el número de elementos, a pesar de tener una mejor discretización y aproximación a la correcta representación del estado físico real, se puede aumentar en exceso el tiempo de procesamiento o inclusive que el programa no obtenga convergencia en los resultados.

Cuando se realiza el estudio de convergencia de malla, las gráficas de esfuerzo y deformación en función del número de elementos que conforman el modelo, se dividen en tres zonas características, delimitarlas correctamente es de suma importancia para determinar la densidad de malla a emplear, ya que utilizar un modelo de la primera zona daría resultados poco confiables por la inestabilidad de los valores medidos; si por el contrario se empleara un modelo de la tercera zona se aseguraría una mayor precisión pero con un aumento excesivo del tiempo de procesamiento, por lo que el equilibrio entre obtener resultados exactos sin requerir altos tiempos de procesamiento se obtiene empleando modelos ubicados en la segunda zona.

En las gráficas de esfuerzos y deformaciones en el cemento y la formación, se pueden apreciar tres zonas características; la primera de ellas en los valores de los modelos con menos de 60 mil elementos, donde hay una variación constante, inclusive en la gráfica del esfuerzo mínimo en la formación (figura 60, p. 100) no existe una línea de tendencia, es

decir, el esfuerzo medido fluctúa entre valores máximos y mínimos antes de estabilizarse; la segunda zona se ubica en los modelos con más de 60 mil elementos y menores a 175 mil, se aprecia que los esfuerzos se estabilizan y que las curvas se vuelven asintóticas; la tercera y última zona está representada por los modelos conformados con más de 175 mil elementos, en esta los valores medidos en la segunda zona se terminan de estabilizar, lo que nos sirve para comprobar la exactitud de las aproximaciones.

4. EVALUACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES

En el primer modelo, la configuración del cañoneo tiene una densidad de tiro de 5,3 tiros por pie, con un ángulo de fase de 60°, debido a esto los esfuerzos máximos no se distribuyen por igual en los alrededores de todas las perforaciones, sino que, debido a la anisotropía de los esfuerzos *in situ*, es en los agujeros direccionados a 30° de la dirección de esfuerzo mínimo donde se maximizan los valores.

De la misma manera como se deformaban plásticamente las adyacencias del pozo al perforar el suelo, también lo hacen luego de ejecutar el cañoneo pero en las paredes de las perforaciones, son estas deformaciones las que originan la erosión de la roca y futura producción de arena hacia el pozo, el modelo propuesto registra que las deformaciones plásticas en las paredes de las perforaciones generadas al cañonear son 85 por ciento mayores a las medidas en la pared del pozo al perforar, por tal motivo se debe tomar en cuenta el efecto de cada una de las variables al completar el pozo, ya que se podrían generar excesivas deformaciones plásticas, aumentando la producción de arena hacia el pozo hasta tapanlo por completo.

Debido a la relación existente entre dichas deformaciones con la erosión de la roca, se determina que alinear los cañones a 30° con el esfuerzo horizontal mínimo, al menos duplica el riesgo de arenamiento en relación con los alineados con el esfuerzo horizontal máximo.

El régimen geostático del modelo base es de tipo inverso (ambos esfuerzos horizontales son mayores al vertical), y en la configuración inicial tiene un aumento respecto al esfuerzo de sobrecarga de 8 y 42 por ciento para el mínimo y el máximo respectivamente; lo que representa un estado crítico de esfuerzos, y dificulta la toma de decisiones en el momento de determinar la configuración más apropiada del sistema de cañoneo, convencionalmente, para formaciones con esfuerzos muy elevados, los cañones se dirigen en la dirección del

esfuerzo máximo horizontal, con ángulo de fase de 0° o 180° , dichas configuraciones son las más estables en lo que a estabilidad mecánica se refiere, sin embargo, como los cañones están apuntados en una misma línea vertical, se debe reducir la densidad de tiro para que no colapsen las secciones de cemento y revestidor, dicha reducción afecta directamente el radio de productividad del pozo, que es uno de los tópicos más importantes cuando se extraen hidrocarburos.

Por estos motivos se hace evidente la necesidad de evaluar la influencia de la anisotropía de esfuerzos y sus magnitudes, para determinar el efecto en la generación de deformaciones plásticas.

5. INFLUENCIA DE LA ANISOTROPÍA EN LOS ESFUERZOS *IN SITU*

5.1. En las adyacencias de las perforaciones

Cuando los cañones se apuntan al esfuerzo horizontal máximo, los esfuerzos no se ven afectados por el grado de anisotropía al que esté sometida la formación, mientras que los apuntados a 60° sí se ven afectados por el grado de anisotropía.

Para altas anisotropías, las deformaciones se incrementan drásticamente; cuando el esfuerzo horizontal máximo es 60 por ciento mayor al mínimo, las deformaciones plásticas equivalentes en las perforaciones aumentan 98 por ciento cuando se apuntan 60 grados del esfuerzo máximo en vez de ser dirigidas directamente a éste; esto se puede extrapolar a que se duplica el riesgo de producir arena hacia el pozo.

Se logró determinar que, en las perforaciones alineadas con el esfuerzo máximo horizontal, mientras mayor sea el nivel de anisotropía, mayor estabilidad mecánica tendrán estos agujeros, sin embargo, las máximas deformaciones plásticas se registraron en las perforaciones alineadas 60° con el esfuerzo horizontal máximo, y son éstas las que podrían dar cabida a la falla de la roca, haciendo que ésta se erosione y produzca arena hacia el pozo, debido a esto, en la siguiente gráfica se comparan las deformaciones plásticas equivalentes para ambos regímenes de esfuerzos (normal e inverso), en la pared de las perforaciones no alineadas al esfuerzo máximo.

A pesar de que en el ejemplo tomado para representar el régimen normal de esfuerzos es empleada la condición anisotrópica más crítica –con una diferencia de 60 por ciento entre sus esfuerzos horizontales–, aun así las magnitudes de deformaciones plásticas equivalentes se incrementan 281 por ciento (de 0,0898 a 0,2524) en el modelo con el régimen inverso de esfuerzos. Inclusive, al evaluar las deformaciones en las configuraciones isotró-

picas, las cuales se han presentado como las más estables para los agujeros no alineados con el esfuerzo máximo horizontal, se registra un incremento de 271 por ciento entre los medidos en el régimen inverso en comparación con el normal (de 0,0569 a 0,1544). Es decir, si se mantienen los parámetros geométricos que definen el sistema de cañoneo, aplicar este método en un régimen inverso, en lugar de uno normal, aumenta hasta tres veces el riesgo de producir arena en las perforaciones alineadas 60° con el esfuerzo máximo horizontal.

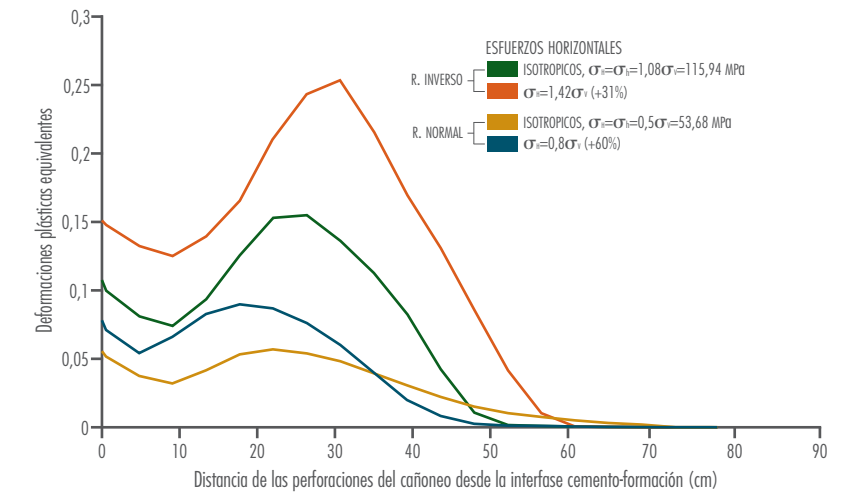


FIGURA 81. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EQUIVALENTES EN LAS PAREDES DE LAS PERFORACIONES ALINEADAS A 60° CON EL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO (AMBOS RÉGIMENES)

6. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS DEL CEMENTO

Con las aproximaciones obtenidas del modelo propuesto, se evidencia que el módulo de Young del cemento no tiene influencia en la concentración de esfuerzos; además, la lechada número dos, tiene un coeficiente de Poisson 50 por ciento mayor a las otras dos y aun eso no afectó, incrementando o disminuyendo los esfuerzos medidos tanto en el cemento como en la formación, por lo que se descarta que las propiedades elásticas del cemento tengan alguna relación significativa con la estabilidad mecánica de las perforaciones generadas mediante el proceso de cañoneo.

7. EVALUACIÓN VARIANDO LA CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA

Mientras todas las perforaciones estén alineadas al esfuerzo máximo horizontal la aplicación del cañoneo no generará alteraciones en los esfuerzos en relación a los causados previamente por la perforación y presiones hidrostáticas.

En la figura 82 se grafica la distribución de deformaciones plásticas equivalentes presente en el modelo luego de ejecutar el cañoneo.

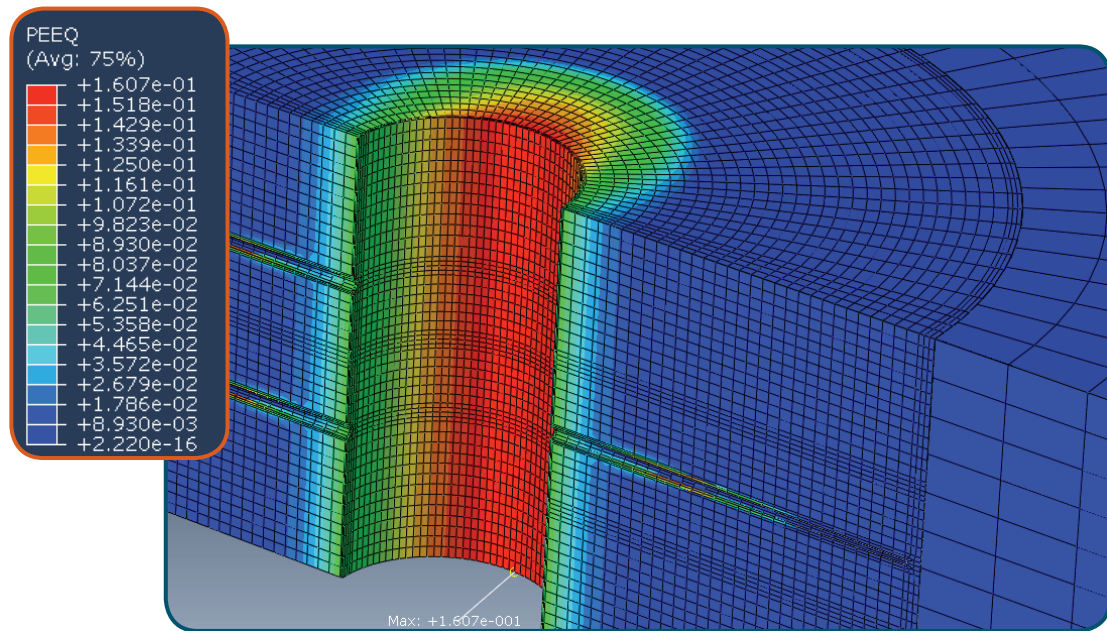


FIGURA 82. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EQUIVALENTES LUEGO DEL CAÑONEO (3TPP Y ÁNGULO DE FASE 180°)

Las perforaciones siempre concentrarán los mismos esfuerzos y presentarán las mismas deformaciones sin importar que se realicen otros orificios en sus cercanías, es decir, la redistribución de esfuerzos generada al emplear el proceso de cañoneo afecta a cada perforación por separado, esto al menos para configuraciones con 60 grados como ángulo de fase.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Basados en los resultados obtenidos en el presente trabajo y la interpretación de los mismos, a continuación se expresan las siguientes conclusiones.

- Evaluar correctamente los modelos numéricos, con la Ley de Kirsch sobre distribución de esfuerzos en placas planas, permite emplear bordes elementales –los más sencillos, porque sólo se trunca la malla a una distancia determinada–, y aun así registrar resultados que representan fielmente los generados en el sistema real, agregando errores menores al uno por ciento.
- Alinear los cañones a 60 grados con el esfuerzo horizontal máximo al menos duplica la probabilidad de producir arena en el pozo, esto en relación con las perforaciones alineadas a cero grados con dicho esfuerzo.
- Sin importar el régimen de falla, la configuración más estable (menores esfuerzos y deformaciones plásticas) para todo el sistema revestidor-cemento-formación es la que presenta igualdad en sus esfuerzos horizontales, mientras que al aplicar un estado de esfuerzos, en las formaciones con regímenes inversos hay, una mayor incidencia que en las que presentan un régimen normal.
- El nivel de anisotropía no influye en la concentración de esfuerzos en las paredes de las perforaciones, siempre y cuando éstos estén alineados con el esfuerzo máximo horizontal.
- A diferencia de la mediciones en todo el modelo, en las paredes de las perforaciones la configuración isotrópica de esfuerzos horizontales presenta las mayores deformaciones plásticas (menos estable) cuando los cañones están alineados con el esfuerzo máximo horizontal, sin embargo, cuando están a 60 grados, la menos estable sigue siendo la de mayor anisotropía.
- Para ambos regímenes de esfuerzo, apuntar las perforaciones a 60 grados con el esfuerzo horizontal máximo, en vez de ser alineadas directamente, puede hasta duplicar el riesgo de producir arena. Las probabilidades disminuyen cuando lo hace el nivel de anisotropía en los esfuerzos principales de la roca.
- En las perforaciones alineadas con el esfuerzo horizontal máximo, las deformaciones son menores a las presentes en las que no lo están, pero se presentan hasta el final de los orificios, mientras que las alineadas a 60 grados, a pesar de ser mayores, se hacen

cero antes de llegar al final del agujero, dejando un 30 por ciento –para esta geometría del cañón eran 20 centímetros– del agujero en condiciones intactas, lo que permite una mayor extracción de hidrocarburos desde el yacimiento.

- En las perforaciones alineadas a 60 grados con el esfuerzo máximo horizontal, aproximadamente se podría triplicar el riesgo de producir arena si se emplea la misma configuración del sistema de cañoneo pero pasando de una formación con régimen normal de esfuerzos a otra con un régimen inverso.
- Las propiedades elásticas del cemento no afectan la concentración de esfuerzos y generación de deformaciones plásticas en la formación; por lo que los tópicos que definan la escogencia de la lechada óptima deberían estar relacionados con la adherencia a la formación y tubería de acero, además de la capacidad de generar un aislamiento zonal para el pozo, impidiendo la filtración de fluidos indeseados presentes en la formación.
- Aplicar el método de los elementos finitos a problemas geostáticos es una técnica muy eficiente, debido a que se puede evaluar una amplia gama de configuraciones de manera relativamente rápida y a un costo mínimo, y de esta manera lograr definir los parámetros que aseguran el correcto funcionamiento de cualquier proceso a ejecutar.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Para seguir aproximando los modelos propuestos a las condiciones físicas reales, se podría dar ejecución a las siguientes recomendaciones:

- Evaluar la influencia del flujo en medio poroso, tomando en consideración la permeabilidad de la formación y sus variaciones producto de la absorción del fluido de perforación.
- Aplicar presión en las paredes de las perforaciones, modificando el diferencial entre la presión de poro del yacimiento y la presión hidrostática del fluido de completación, variando esta relación se logra evaluar el nivel de bajobalance o sobrebalance con la cual se ejecuta el proceso de cañoneo de pozos.
- Debido a la dificultad de mantener la verticalidad en una perforación con más de cuatro kilómetros de profundidad, todos los pozos petroleros presentan inclinación, por lo que sería de gran interés proponer modelos donde se aprecie este ángulo para determinar la influencia sobre la distribución de esfuerzos alrededor de las perforaciones generadas al cañonear.
- Representar defectos comunes generados en el proceso de cementación, tales como: filtración de agua hacia la lechada, lo que varía sus propiedades mecánicas; y la descentralización de la tubería, que genera variación en el diámetro de entrada y profundidad de cada perforación generada al cañonear.
- Proponer una mayor diversidad de modelos, donde se evalúen varias configuraciones geométricas del sistema de cañoneo, variando tópicos como: ángulo de fase, densidad de disparos, diámetro de entrada y profundidad de las perforaciones.
- Proponer modelos numéricos que permitan representar la velocidad, presión y densidad del fluido producido (petróleo o gas), implementando técnicas donde la erosión de la roca arrastre elementos que conformen la formación, y de esta manera evaluar el proceso de producción de arena hacia el pozo, pudiendo cuantificar la cantidad generada en determinados intervalos de tiempo o para toda la vida productiva del pozo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abaqus (A). "Output", *Analysis User's Manual (Volumen II)*. Simulia, 2010.
- _____. (B). "Erosion of Material (Sand Production) in an Oil Wellbore", *Example Problems Manual*. Simulia, 2010.
- ALI, S., R. DICKERSON, C. BENNETT *et al.* *Empaques de grava en pozos horizontales de alta productividad*. Oilfield Review, publicación de Schlumberger, 2001.
- ALMEIDA, J. *Evaluación de la estabilidad mecánica de hoyos verticales e inclinados del campo Moporo, a través de seis criterios de resistencia aplicados a mecánica de rocas*. Tesis de maestría, UCV, 2007.
- ANDREWS, J.S., H. BJØRKESETT, J. DJURHUUS, I.C. WALTON *et al.* *Determination of Optimum Perforation Design and Sanding Propensity in Long Horizontal Wells Based on Modified RP 19B Section IV Test and Numerical Sand Prediction*. SPE, 2008.
- ANSAH, J., M. PROETT y M. SOLIMAN. *Advances in Well Completion Design: A New 3D Finite-Element Wellbore Inflow Model for Optimizing Performance of Perforated Completions*. SPE, 2002.
- ARIAS, F. *El proyecto de investigación. Guía para su elaboración*. Editorial Episteme, Caracas, 1999.
- BALESTRINI, M. *Cómo se elabora el proyecto de investigación*. Editorial BL Consultores Asociados, 7ª ed., Caracas, 2006.
- BARBERII, E. *El pozo ilustrado*. Lagoven S.A., 4ª ed., Caracas, Venezuela, 1998.
- BEHIE, A. y A. SETTARI. *Perforation Design Models for Heterogeneous, Multiphase Flow*. SPE, 1991.
- BELL, W., R. SUKUP y S. TARIQ. *Perforating*. SPE Monografía 16, Texas, 1995.
- CBHE (Cámara Boliviana de Hidrocarburos Energía). *Perforación y terminación de pozos*, Boletín semanal, 2006.
- CAMPOS, H., S. MARTÍNEZ, H. PIZARRO, C. KESSLER y J. TORNE. *Geomechanical Applications for Near-Balance and Dynamic Underbalance Perforating Technique in Overpressured Gas Zones in Burgos Basin*. SPE, 2007.
- CHANDRUPATLA, T. y A. BELENGUNDU. *Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería*. Pearson Prentice Hall, 2ª ed., México, 1999.

- CICCOLA, V. *Desarrollo de un procedimiento de evaluación y diseño de sistemas cementantes para su uso en pozos petroleros*. Tesis de maestría, UCV, 2008.
- COOK, R. y W. YOUNG. *Advanced Mechanics of Materials*. Editorial Macmillan, 1985.
- ECONOMIDES M., L. WATERS y S. DUNN-NORMAN (Comp.). *Petroleum Well Construction*. John Wiley & Sons Ltd. Inglaterra, 1998.
- FINKBEINER, T., D. MOOS, W. DEROSE y D. SHIFLETT. *Wellbore Stability Evaluation for Horizontal Hole Completion - A Case Study*. SPE, 2000.
- FJAER, E., R. HOLT, P. HORSRUD, A. RAAEN y R. RISNES. *Petroleum Related Rock Mechanics*. Editorial Elsevier, Holanda, 1996.
- FURUI, K., D. ZHU, A. HILL, E. DAVIS y B. BUCK. *Optimization of Horizontal Well Completion Design*. SPE, 2004.
- FORD. *Advanced Mechanics of Materials*. Longmans, Londres, 1963.
- GARCÍA, E. *Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras*. Universidad de Sevilla, España, 2006.
- GATLIN, C. *Petroleum Engineering. Drilling and well Completions*. Prentice-Hall, Inc., Texas, EEUU, 1960.
- GHALAMBOR, A., M. ASADI y M. AZARI. *Performance Evaluation of Extreme Overbalance Perforating*. SPE, 1998.
- GUERRA, J. *Pruebas de pozo con herramientas de fondo, TCP*, SPE, 2004.
- Halliburton. *Perforating Solutions*, EEUU, 2004.
- HRENNIKOFF, A., "Solution of Problems by the Framework Method", *Journal of Applied Mechanics*, American Society of Mechanical Engineers, Vol. 68, 1941.
- HILCHIE, D. *Wireline. A History of the Well Logging and Perforating Business in the Oilfield*. Douglas W. Hilchie Inc., 1990.
- HUEBNER K., D. DEWHIRST, D. SMITH y T. BYROM. *The Finite Element Method for Engineers*. John Wiley & Sons, Canada, 2001.
- ICHARA, M. *The Performance of Perforated Completions in Gas Reservoirs*. SPE, 1990.
- Innovative Engineering Systems Limited (IESL). *Diseño de cañoneo y aplicaciones*. Curso de adiestramiento, 2007.
- JACINTO, A., R. AMBROSINI y R. DANESI. *Influencia de la condición de borde en el análisis dinámico de interacción suelo-estructura*. Universidad de Tucumán, Argentina, 2002.
- KANG, Y., M. YU, S. MISHA y N. TAKACH. *Wellbore Stability: A Critical Review and Introduction to DEM*. SPE, 2009.
- KESSLER, N., Y. WANG y F. SANTARELLI. *A Simplified Pseudo 3D Model to Evaluate Sand*

- Production Risk in Deviated Cased Holes*. SPE, 1993.
- KING, G. *An Introduction to the Basic of Well Completions, Simulations and Workovers*, Universidad de Tulsa, 1995.
- LIU, G. y S. QUEK. *The Finite Element Method: A Practical Course*. Butterworth-Heinemann, Departamento de Ingenieros Mecánicos de la Universidad Nacional de Singapur, 2003.
- LORENZANA, A. y J. GARRIDO. “Estudio del problema elastoplástico con deformaciones finitas mediante ecuaciones integrales de contorno y de dominio”. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculos y diseño en ingeniería*, Vol. 12-3. Universidad de Valladolid, España, 1996.
- MCCRAY, A. y F. COLE. *Tecnología de la perforación de pozos petroleros*. Editorial Continental, 1^{ra} ed., México, 1970.
- MIRANDA, G. *El método de los elementos finitos aplicado a mecánica de sólidos*, Universidad de Extremadura, Badajoz, España, 2003.
- MUÑOZ, D. *Técnicas en predicción y monitoreo de geopresiones durante la perforación*. Knowledge Systems Inc., Texas.
- PINO, F. *Curso de gasotécnia*. UDO, Escuela de Ingeniería de Petróleo, Venezuela, 2009.
- PRIETO, A. *Tecnología aplicada a fluidos de perforación*. Curso CIED, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 1997.
- REMPU, W. *Advanced Well Completion Engineering*. Elsevier Inc., Inglaterra, 2011.
- SABINO, C. *El proceso de investigación*. Editorial Panapo, Caracas, 1992.
- SANTARELLI, F., H. OUADFEL y J. ZUNDEL. *Optimizing the Completion Procedure to Minimize Sand Production Risk*. SPE, 1991.
- SMITH, R. “Cement Job Planning”, *Worldwide Cementing Practices*. American Petroleum Institute (API), 1^{ra} ed., Washington, 1991.
- SOMERVILLE, J. y A. BIN SAMSURI. “Perforation Stability. Physical and Numerical Modeling”, *Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science*. 1991.
- SULBARAN A., R. CARBONELL y J. LÓPEZ-DE-CÁRDENAS. *Oriented Perforating for Sand Prevention*. SPE, 1999.
- SULLAWAY, B. “Casing Equipment”, *Worldwide Cementing Practices*. American Petroleum Institute (API), 1^{ra} ed., Washington, 1991.
- TANG, Y., Y. PAN y Y. WANG. *Optimal Design of Perforating Completion for Gas Well*. SPE, 1995.

TRONVOLL, J., N. MORITA y F. SANTARELLI. *Perforation Cavity Stability: Comprehensive Laboratory Experiments and Numerical Analysis*. SPE, 1992.

TWYFORD, L. y T. TYLER. *Impact of Perforation Variables on Well Productivity at Prudhoe Bay*. SPE-AIME, 1984.

YILDIZ, T. *Productivity of Selectively Perforated Vertical Wells*. SPE-University of Tulsa, 2002.

ZHANG, J., W. STANDIFIRD y X. SHEN. *Optimized Perforation Tunnel Geometry, Density and Orientation to Control Sand Production*. SPE, 2007.

UNIDADES Y ABREVIATURAS

- *bbl. Oil Barrels*, barriles de petróleo (42 galones / 159 litros)
- *BH. Big Hole*, tipo de perforaciones generadas al cañonear poco profundas pero con grandes diámetros de entrada
- *BOPD. Barrels of Oil Per Day*, barriles de petróleo diarios
- *cm. Centímetros* (longitud)
- *DP. Deep Penetrating*, tipo de perforaciones generadas al cañonear con grandes profundidades pero con pequeños diámetros de entrada
- *g/cm³. Gramos por centímetros cúbicos* (densidad)
- *Lp. Longitud de perforación*
- *lbm. Libras masa* (masa)
- *lpg. Libras por galón* [$8,43 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ lpg}$] (densidad)
- *lppc. Libras por pulgada cuadrada* (fuerza - presión)
- *m/s. Metros por segundo* (rapidez)
- *MEF. Método de los elementos finitos*
- *mD. Milidarcy* (permeabilidad)
- *mm. Milímetros* (longitud)
- *Pa. Pascal* (fuerza - presión)
- *pies/s. Pies por segundo* [$1 \text{ m/s} = 3,3 \text{ pies/s}$] (rapidez)
- *pulg. Pulgadas* [$1 \text{ pulg.} = 2,54 \text{ cm}$] (longitud)
- *RP. Radio de productividad*
- *tpp. Tiros por pie* (densidad de disparos para cañonear)