

**GENERACIÓN DE UN MODELO COMPUTACIONAL DE POZO EN
3D PARA ESTABLECER EL ESTADO DE ESFUERZOS Y
DEFORMACIONES MEDIANTE LA TÉCNICA DE ELEMENTOS
FINITOS**

DIANA MILENA OCHOA SUÁREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEÓS
BUCARAMANGA
2011**

**GENERACIÓN DE UN MODELO COMPUTACIONAL DE POZO EN
3D PARA ESTABLECER EL ESTADO DE ESFUERZOS Y
DEFORMACIONES MEDIANTE LA TÉCNICA DE ELEMENTOS
FINITOS**

DIANA MILENA OCHOA SUÁREZ

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERA DE PETRÓLEOS**

Director:

ELKIN RODOLFO SANTAFÉ RANGEL
Ingeniero de Petróleos
MSc. Ingeniería de Sistemas e informática

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS
ALTERNATIVAS PARA HIDROCARBUROS - GITAH**

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEÓS
BUCARAMANGA

2011

A Dios
que es el motor de mi alma,
a mi padre Cirilo
quien desde el cielo
a seguido guiando mi camino,
y a mi señora madre Luz Marina
que día y noche a luchado porque
este sueño se haga realidad.

 Mi hermano
 quien hoy en día
me hace sentir orgullosa de lo que hace ...

 A mi amigo,
 mi compañero,
 mi confidente,
 el dueño de mi corazón,
 mi mejor ejemplo ...
Elkin Rodolfo Santafé Rangel

Diana 8a

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander quien me acogió en sus aulas y brindó el espacio para desarrollarme como persona y como profesional.

Al Ingeniero ELKIN RODOLFO SANTAFÉ RANGEL por su valiosa orientación e incondicional apoyo en la elaboración de este trabajo.

A los calificadores, OLGA ORTIZ y NELSON QUINTERO, por toda la comprensión y paciencia brindadas en el cierre de este trabajo.

A mis compañeros, William, Hector, Patricia, Miguel, Omar, Eyberth, Juliana; con quienes compartí las experiencias de mi formación científica dentro del grupo de investigación.

A Rosa Paulina y Paola Margarita quienes siempre me brindaron palabras sabias en momentos precisos para concluir este trabajo.

Al Grupo de Investigación en Tecnologías Alternativas para Hidrocarburos por permitir el espacio para desarrollar este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE ROCAS	18
1.1 Mecánica de medios continuos	18
1.1.1 Mecánica del sólido rígido	19
1.1.2 Mecánica de Fluidos	19
1.1.3 Mecánica de sólidos deformables	19
1.2 Modelo matemático	20
1.3 Comportamiento elástico	21
1.4 Comportamiento plástico	22
1.5 Comportamiento Viscoelástico	25
1.6 Esfuerzos en el subsuelo	25
1.6.1 Cambios producidos en los esfuerzos	32
1.7 Modelado de las propiedades geomecánicas	34
2. MECÁNICA DE ROCAS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO	38
2.1 Propiedades mecánicas de la roca	39
2.1.1 Características de carga-descarga	39
2.2 Campo de esfuerzos cerca de la cara del pozo	49
2.3 Criterio de Falla	55
2.3.1 Criterio de falla de Mohr-Coulomb	56
2.3.2 Criterio de Hoek-Brown	58
2.3.3 Criterio de Drucker-Prager (Ampliado Von Mises)	58
3. APLICACIONES RELACIONADAS CON LA MECÁNICA CERCA DEL POZO	59
3.1 Estabilidad del pozo durante la perforación	59
3.1.1 Efectos químicos	61
3.1.2 Efectos mecánicos	62

3.2 Perforaciones	69
3.2.1 Perforaciones orientadas al fracturamiento hidráulico	70
3.2.2 Perforaciones orientadas para control de arena	73
3.3 Fracturamiento hidráulico	77
3.3.1 Iniciación de fractura y presión de ruptura	77
3.3.2 Doble presión de cierre después del cierre.....	79
3.3.3 Comportamiento no lineal de esfuerzo-deformación en fracturamiento.....	81
3.4 Producción de arena	82
3.4.1 Efectos mecánicos	83
3.5 Fracpacks	86
3.6 Efectos químicos	88
3.7 Mediciones de esfuerzos en sitio	89
3.7.1 Prueba Microfrac	89
3.7.2 Información geológica.....	89
3.7.3 Análisis de ruptura	91
3.7.4 Deformación de recuperación inelástica.....	92
4. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES ORIENTADOS A ANÁLISIS GEOMECÁNICO	94
4.1 ANALISIS PRELIMINAR DEL MODELO	95
4.2 ELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL.....	97
4.2.1 Software libre	98
4.2.2 Software Comercial.....	102
4.3 DISEÑO CONCEPTUAL DEL MODELO	104
4.4 IDENTIFICACIÓN DE LOS FLUJOS DE TRABAJO INTERNOS.....	105
4.4.1 Flujo de Trabajo en ABAQUS con soporte en GUI.....	106
4.4.2 Flujo de trabajo en ABAQUS con soporte en DATA.....	106
4.5 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	107
5. CASOS DE ESTUDIO.....	108
5.1 Modelo tridimensional completamente elástico	108
5.1.1 Análisis preliminar del modelo.....	108
5.1.2 Elección de la herramienta computacional	108

5.1.3	Diseño conceptual del modelo	108
5.1.4	Identificación de los flujos de trabajo internos.....	113
5.1.5	Simulación y análisis de resultados	115
5.2	Modelo Axisimétrico	119
5.2.1	Análisis preliminar del modelo.....	120
5.2.2	Elección de la herramienta computacional	120
5.2.3	Diseño conceptual del modelo	120
5.2.4	Identificación de los flujos de trabajo internos.....	122
5.2.5	Simulación y análisis de resultados	122
6.	CONCLUSIONES	126
7.	RECOMENDACIONES.....	128
8.	BIBLIOGRAFÍA	129
	ANEXOS.....	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de esfuerzo en función de la deformación relativa.	24
Figura 2. Diagrama de esfuerzos locales y esfuerzos principales.	27
Figura 3. Distorsión y falla. Diagrama P'-Q.....	30
Figura 4. Parámetros de entrada para un modelo mecánico del subsuelo	36
Figura 5. Determinación grafica de α . Utilizando los datos de muestras secas, se construye la envolvente de Mohr.....	44
Figura 6. Diferentes mecanismos de falla y sus localizaciones de campo de esfuerzos dentro de la envolvente de falla de Mohr Coulomb.	49
Figura 7. Las zonas plástica y elástica como se asume en la solución de Bray, después Goodman en 1980	53
Figura 8. Soluciones de Kirsch y Bray, de Goodman, 1980.....	55
Figura 9. Posibles problemas de inestabilidad de pozo durante la perforación.....	61
Figura 10. El efecto de diferentes sistemas de fluidos de perforación en las propiedades mecánicas en muestras de shale.	66
Figura 11. Evaluación gráfica de la estabilidad de pozo usando una envolvente de falla dada. Se observa un hueco estable, pero cerca de la frontera estable/ inestable	67
Figura 12. Evaluación gráfica de la estabilidad de pozo con una envolvente de falla dada. Se observa que el pozo muestra problemas de inestabilidad en todas las direcciones alrededor de la cara del pozo.....	69
Figura 13. Geometría de fractura cerca de la cara del pozo como función la orientación de la perforación relativa a la dirección de los esfuerzos en sitio.....	71
Figura 14. Representación del ancho de fractura y presión de iniciación de fractura como función de la orientación de la perforación relativa a la dirección de los esfuerzos en sitio.	72
Figura 15. Perforación orientada para control de arena, donde la región de ruptura está menos afectada	74
Figura 16. Demostración experimental de la perforación en la capa límite y el uso de la perforación orientada y la fractura al comunicarse con areniscas poco consolidadas	75
Figura 17. Propagación de fractura de dos flancos de una perforación.....	76
Figura 18. Resultados experimentales de fracturamiento de un bloque de roca en un pozo vertical.....	79
Figura 19. Doble cierre de presión observado en fracturamiento de pozos horizontales .	81

Figura 20. Representación mecánica de la caída de presión crítica que desencadena producción de arena	86
Figura 21. Demostración de laboratorio de de fracturamiento de formaciones de areniscas poco consolidadas	87
Figura 22. Interpretación del campo de esfuerzos para diferentes estructuras geológicas	90
Figura 23. Demostración experimental del fenómeno de ruptura.	91
Figura 24. Deformaciones principales observadas de una prueba de deformación de recuperación inelástica.....	93
Figura 25. Condiciones de frontera instaladas en el modelo (vista de planta).....	110
Figura 26. Distribución general del modelo.	110
Figura 27. Distribución general del modelo.	112
Figura 28. Malla general y detalle de la zona de interés en el modelo.	113
Figura 29. Detalle de la sección transversal de la malla.	114
Figura 30. Detalle en transparencia de la malla construida con el eje axial del pozo a la vista.	114
Figura 31. Detalle de la malla en corte paralelo al eje axial.....	115
Figura 32. Campo de deformaciones resultante con peso de lodo 14 ppg.	116
Figura 33. Campo de deformaciones resultante con peso de lodo 9,5 ppg.	117
Figura 34. Zonas de desplazamiento máximo para peso de lodo de 14 ppg.....	118
Figura 35. Variación de esfuerzos para peso de lodo de 14 ppg (A) y para peso de lodo de 9 ppg (B). El campo de esfuerzos se encuentra graficado sobre la malla deformada.	119
Figura 36. Detalle de la malla del modelo. Dado que es axisimétrico, el modelo en 3D se genera por rotación sobre el eje axial.....	123
Figura 37. Resultado de la variación de los esfuerzos y la presión de poro. Se puede observar que el mapeo que se tiene de esta variable hace que no sea un valor constante como en el modelo planteado por Terán A. (14).....	124
Figura 38. Perfil de esfuerzos en profundidad y variación de la presión de poro antes y después de la inicialización.	125
Figura A1. Diagrama que asocia las etapas básicas de un proyecto de mecánica computacional con la suite ABAQUS.....	134
Figura A2. Elementos lineales y cuadráticos.....	139
Figura B1. Sistema coordenado	149

Figura B2. Mensajes e instrucciones desplegadas en el área de aviso.....	151
Figura B3. Caja de dialogo para crear la parte.....	152
Figura B4. Caja de dialogo de crear un nuevo material.....	153
Figura B5. Caja de diálogo para crear la sección	155
Figura B6. Caja de diálogo para ensamblar el modelo	156
Figura B7. Caja de diálogo para crear los pasos de tiempo	158
Figura B8. Caja de diálogo para crear las condiciones de borde.....	160
Figura B9. Caja de diálogo para crear una carga	161
Figura B10. Caja de dialogo para asignar los controles de mallado.....	163
Figura B11. Caja de dialoga para asignar el tipo de elemento.....	164
Figura B12. Caja de diálogo para crear el trabajo (job)	166
Figura B13. Caja de diálogo para editar el trabajo	167
Figura B14. Caja de diálogo del Job Manager o administrador del trabajo.....	168

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 – Tipos de residuos de perforación. Su forma es un indicador del tipo preferencial de material (modelo) que se encuentra en el subsuelo.	40
Tabla 2. Valores seleccionados de resistencia a la fractura	47
Tabla 3. Herramientas de preproceso, proceso y postproceso disponibles	98
Tabla 4. Valoración del Software disponible (ítems 1 al 8)	99
Tabla 5. Valoración del Software disponible (ítems 9 al 16)	100
Tabla 6. Disponibilidad de asesoría y recursos de consulta	100
Tabla 7. Plataforma (S.O) disponible para cada programa	102
Tabla 8. Geometría	111
Tabla 9. Propiedades.....	111
Tabla 10. Peso de lodo utilizado.....	112
Tabla A1. Caracterización de los tipos de archivos en ABAQUS	137
Tabla A2. Orden de interpolación de los elementos.....	140
Tabla A3. Comparación entre los tipos de integración asociada a los elementos	141

LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Descripción general de ABAQUS	123
Anexo B: Flujos de trabajo en ABAQUS	140

RESUMEN

TITULO:

GENERACIÓN DE UN MODELO COMPUTACIONAL DE POZO EN 3D PARA ESTABLECER EL ESTADO DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES MEDIANTE LA TÉCNICA DE ELEMENTOS FINITOS*

AUTOR: DIANA MILENA OCHOA SUÁREZ**

PALABRAS CLAVES: Elementos finitos, geomecánica, control de pozos, estabilidad de pozos.

DESCRIPCIÓN

Los procesos de producción y perforación de un pozo pueden verse comprometidos debido a al estado de tensiones y esfuerzos presentes, que en la mayoría de los casos puede conducir a la inestabilidad en el mismo. Teniendo en cuenta las condiciones y características del pozo que se desea analizar, es posible crear un modelo que reproduzca el estado geomecánico orientado a posibilitar la reducción de la incertidumbre cuando se perfora. Para ello, en este trabajo se utiliza un software basado en el método de elementos finitos como herramienta de diseño y construcción de un modelo computacional, el cual permite el análisis de esfuerzos y de tensiones.

Para el diseño de este modelo se planteó una metodología que permite dirigir el proceso de delimitación del problema según sea el objetivo del estudio y a su vez, se expusieron dos flujos de trabajo que permiten la construcción y simulación de dicho modelo tomando como base el nivel de interacción con el usuario final. Como soporte teórico, el modelo planteado se soporta en poroelasticidad usando la relación propuesta por Drucker – Prager y ajustando sus variables (*conocida como Modelo de Drucker – Prager extendido*).

Este soporte permitió realizar una comparación cualitativa entre lo que un modelo elástico general puede ofrecer frente a un modelo que logra incluir fluidos en los poros. A su vez, se logra mejorar la construcción del modelo usando el criterio de construcción axisimétrico basado en la distribución de propiedades. Como resultado se consigue obtener un perfil de presión de poro, de esfuerzos y de deformaciones que claramente no es viable de obtener mediante el modelo elástico planteado.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías FísicoQuímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Elkin Rodolfo Santafé Rangel.

ABSTRACT

TITLE:

GENERATION OF A 3D COMPUTATIONAL MODEL OF WELL TO ESTABLISH THE STRESS AND STRAINS STATEBY MEANS OF THE FINITE ELEMENT METHOD TECHNIQUE.*

AUTHOR: DIANA MILENA OCHOA SUÁREZ**

KEY WORDS: Finite elements, geomechanics, well control, wellbore stability.

DESCRIPTION

The production and drilling processes of a well can be altered due to the present state of tensions and stresses, which in most cases can lead to the instability in it. Having into account the conditions and characteristics of the well to be analyzed, it is possible to create a model that reproduces the geomechanical state oriented to enable the reduction of uncertainty when drilling. To do so, in this work software based on the finite element method is used as a design tool and to build a computational model, which allows the analysis of stresses and tensions.

For the design of this model a methodology which enables to manage the process of delimitation of the problem was proposed. This is done depending on the objective of the study and at the same time, two workflows were exposed which allow the construction and simulation of that model taking into account, as a basis, the interaction level with the final user. As a theoretical background, the proposed model is based on poroelasticity using the Drucker –Prager relation and adjusting its variables (*known as the extended Drucker-Prager model*).

This support enables us to make a qualitative comparison between what a general elastic model can offer against a model which accomplishes to include fluids in the pores. At the same time, it is possible to improve the construction of the model using the axisymmetric construction criterion based on the distribution of the properties. As a result a profile of the pore pressure, stresses and strains that is not clearly viable to obtain by means of the proposed elastic model is obtained.

* Work Degree

** Faculty of PhysicoChemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Directress: Elkin Rodolfo Santafé Rangel.

INTRODUCCIÓN

Una de las actividades más comunes en la industria de los hidrocarburos es la perforación de pozos ya sea con el fin de explorar una zona de interés o para el desarrollo de un campo ya descubierto. Uno de los inconvenientes más riesgosos que se pueden presentar en medio de dicha actividad tiene que ver con el derrumbe y colapso del pozo, lo cual puede ocasionar incluso la pérdida del mismo, conllevando a un desfaldo económico bastante significativo para la compañía involucrada en esta operación. Por esto, se hace necesario desarrollar un plan adecuado para el proceso de perforación y zona de interés a la cual se quiere llegar teniendo en cuenta las propiedades de las rocas que se van a atravesar.

Debido a lo mencionado anteriormente, se hace necesario realizar un estudio del estado de esfuerzos y deformaciones presente en los diferentes materiales contenidos en el trayecto que se va a atravesar hasta la zona de interés con el objetivo de conocer su comportamiento y poder prever su respuesta ante diferentes acciones que puedan ser ocasionadas por las actividades de perforación. En este trabajo se busca generar un modelo computacional capaz de apoyar dicho estudio con la ayuda de la técnica de elementos finitos lo que permite un mejor acople con la geometría característica para este tipo de análisis, convirtiéndose así en una herramienta bastante útil al momento de caracterizar el comportamiento geomecánico de las rocas presentes en determinado activo.

1. INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE ROCAS

1.1 Mecánica de medios continuos

La mecánica de medios continuos es una rama de la física (específicamente de la mecánica) que propone un modelo unificado para sólidos deformables, sólidos rígidos y fluidos. El término *medio continuo* se usa tanto para designar un modelo matemático, como cualquier porción de material cuyo comportamiento se puede describir adecuadamente por ese modelo.

Un medio continuo se concibe como una porción de materia formada por un conjunto infinito de partículas (que forman parte, por ejemplo, de un sólido, de un fluido o de un gas) que va a ser estudiado macroscópicamente, es decir, sin considerar las posibles discontinuidades existentes en el nivel microscópico (nivel atómico o molecular). En consecuencia, en el tratamiento matemático ideal de un medio continuo se admite usualmente que no hay discontinuidades entre las partículas y que la descripción matemática de este medio y de sus propiedades se puede realizar mediante funciones continuas.

Existen tres grandes marcos de referencia a la hora de estudiar medios continuos:

- Mecánica del sólido rígido.
- Mecánica de sólidos deformables.
- Mecánica de fluidos, que distingue a su vez entre *Fluidos Compresibles* y *Fluidos Incompresibles*.

1.1.1 Mecánica del sólido rígido

La mecánica de un sólido rígido es aquella que estudia el movimiento y equilibrio de sólidos materiales ignorando sus deformaciones. Se trata, por tanto, de un modelo matemático útil para estudiar una parte de la mecánica de sólidos, ya que todos los sólidos reales son deformables. Se entiende por sólido rígido un conjunto de puntos del espacio que se mueven de tal manera que no se alteran las distancias entre ellos, sea cual sea la fuerza actuante (matemáticamente, el movimiento de un sólido rígido viene dado por un grupo uniparamétrico de isometrías).

1.1.2 Mecánica de Fluidos

La mecánica de fluidos es la rama de la mecánica de medios continuos (que a su vez es una rama de la física) que estudia el movimiento de los fluidos (gases y líquidos) así como las fuerzas que los provocan. La característica fundamental que define a los fluidos es su incapacidad para resistir esfuerzos cortantes (lo que provoca que carezcan de forma definida). También estudia las interacciones entre el fluido y el contorno que lo limita. En particular, en la mecánica de fluidos se asume que los fluidos verifican las siguientes leyes:

- Conservación de la masa y de la cantidad de movimiento.
- Primera y segunda ley de la termodinámica.

1.1.3 Mecánica de sólidos deformables

La mecánica de los sólidos deformables estudia el comportamiento de los cuerpos sólidos deformables ante diferentes tipos de situaciones como la aplicación de cargas o efectos térmicos. Estos comportamientos, más complejos que el de

los sólidos rígidos, se estudian en mecánica de sólidos deformables introduciendo los conceptos de deformación y de tensión.

Una aplicación típica de la mecánica de sólidos deformables es determinar a partir de una cierta geometría original de sólido y unas fuerzas aplicadas sobre el mismo, si el cuerpo cumple ciertos requisitos de resistencia y rigidez. Para resolver ese problema, en general es necesario determinar el campo de tensiones y el campo de deformaciones del sólido.

Las ecuaciones necesarias para ello son:

- Ecuaciones de equilibrio, que relacionan tensiones internas del sólido con las cargas aplicadas. Las ecuaciones de la estática son deducibles de las ecuaciones de equilibrio.
- Ecuaciones constitutivas, que relacionan tensión y deformación, y en las que pueden intervenir también otras magnitudes como temperatura, velocidad de deformación, deformaciones plásticas acumuladas, variables de endurecimiento, etc.
- Ecuaciones de compatibilidad, a partir de la cual pueden calcularse los desplazamientos en función de las deformaciones y las condiciones de contorno o enlace con el exterior.

1.2 Modelo matemático

En el modelo planteado por la mecánica de medios continuos las magnitudes físicas como la energía o la cantidad de movimiento pueden ser manejadas en el límite infinitesimal. Por esa razón las relaciones básicas en mecánica de medios continuos toman la forma de ecuaciones diferenciales. Los tipos básicos de ecuaciones usadas en mecánica de medios continuos son:

- Ecuaciones Constitutivas que caracterizan las propiedades del material que trata de modelarse como medio continuo.
- Leyes de conservación que son leyes física fundamentales como:
 - Conservación de la cantidad de movimiento.
 - Conservación de la energía.

1.3 Comportamiento elástico

En física e ingeniería, el término elasticidad designa la propiedad mecánica de ciertos materiales de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan.

La elasticidad es estudiada por la *teoría de la elasticidad*, que a su vez es parte de la mecánica de sólidos deformables. La teoría de la elasticidad (TE) como la mecánica de sólidos (MS) deformables describe cómo un sólido (o fluido totalmente confinado) se mueve y deforma como respuesta a fuerzas exteriores. La diferencia entre la TE y la MS es que la primera sólo trata sólidos en que las deformaciones son termodinámicamente reversibles.

La propiedad elástica de los materiales está relacionada, como se ha mencionado, con la capacidad de un sólido de sufrir transformaciones termodinámicas reversibles. Cuando sobre un sólido deformable actúan fuerzas exteriores y éste se deforma se produce un trabajo de estas fuerzas que se almacena en el cuerpo en forma de energía potencial elástica y por tanto se producirá un aumento de la energía interna. El sólido se comportará elásticamente si este incremento de energía puede realizarse de forma reversible, en este caso decimos que el sólido es elástico. La tensión o esfuerzo a partir del cual el material pierde su elasticidad se conoce con el nombre de *límite elástico*. Los materiales sometidos a tensiones superiores a su límite de elasticidad tienen un comportamiento plástico.

1.4 Comportamiento plástico

La plasticidad es la propiedad mecánica de un material anelástico, natural, artificial, biológico o de otro tipo, de deformarse permanentemente e irreversiblemente cuando se encuentra sometido a tensiones por encima de su rango elástico, es decir, por encima de su límite elástico.

En los metales, la plasticidad se explica en términos de desplazamientos irreversibles de dislocaciones.

En los materiales elásticos, en particular en muchos metales dúctiles, un esfuerzo de tracción pequeño lleva aparejado un comportamiento elástico. Eso significa que pequeños incrementos en la tensión de tracción comporta pequeños incrementos en la deformación, si la carga se vuelve cero de nuevo el cuerpo recupera exactamente su forma original, es decir, se tiene una deformación completamente reversible. Sin embargo, se ha comprobado experimentalmente que existe un límite, llamado límite elástico, tal que si cierta función homogénea de las tensiones supera dicho límite entonces al desaparecer la carga quedan deformaciones remanentes y el cuerpo no vuelve exactamente a su forma. Es decir, aparecen deformaciones no-reversibles.

Este tipo de comportamiento elasto-plástico descrito más arriba es el que se encuentra en la mayoría de metales conocidos, y también en muchos otros materiales. El comportamiento perfectamente plástico es algo menos frecuente, e implica la aparición de deformaciones irreversibles por pequeña que sea la tensión, la arcilla de modelar y la plastilina se aproximan mucho a un comportamiento perfectamente plástico. Otros materiales además presentan plasticidad con endurecimiento y necesitan esfuerzos progresivamente más grandes para aumentar su deformación plástica total. E incluso los comportamientos anteriores pueden ir acompañados de efectos viscosos, que hacen que las tensiones sean mayores en casos de velocidades de deformación altas, dicho comportamiento se conoce con el nombre de visco-plasticidad.

La plasticidad de los materiales está relacionada con cambios irreversibles en esos materiales. A diferencia del comportamiento elástico que es termodinámicamente reversible, un cuerpo que se deforma plásticamente experimenta cambios de entropía, como desplazamientos de las dislocaciones. En el comportamiento plástico parte de la energía mecánica se disipa internamente, en lugar de transformarse en energía potencial elástica.

Microscópicamente, en la escala de la red cristalina de los metales, la plasticidad es una consecuencia de la existencia de ciertas imperfecciones en la red llamadas dislocaciones.

En 1934, Egon Orowan, Michael Polanyi y Geoffrey Ingram Taylor, más o menos simultáneamente llegaron a la conclusión de que la deformación plástica de materiales dúctiles podía ser explicada en términos de la teoría de dislocaciones. Para describir la plasticidad usualmente se usa un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales y no integrables que describen los cambios en las componentes del tensor deformación y el tensor tensión con respecto al estado de deformación-tensión previo y el incremento de deformación en cada instante.

Los diagramas de esfuerzo-deformación permiten estudiar el comportamiento de un determinado material cuando se somete a la acción de una carga estática.

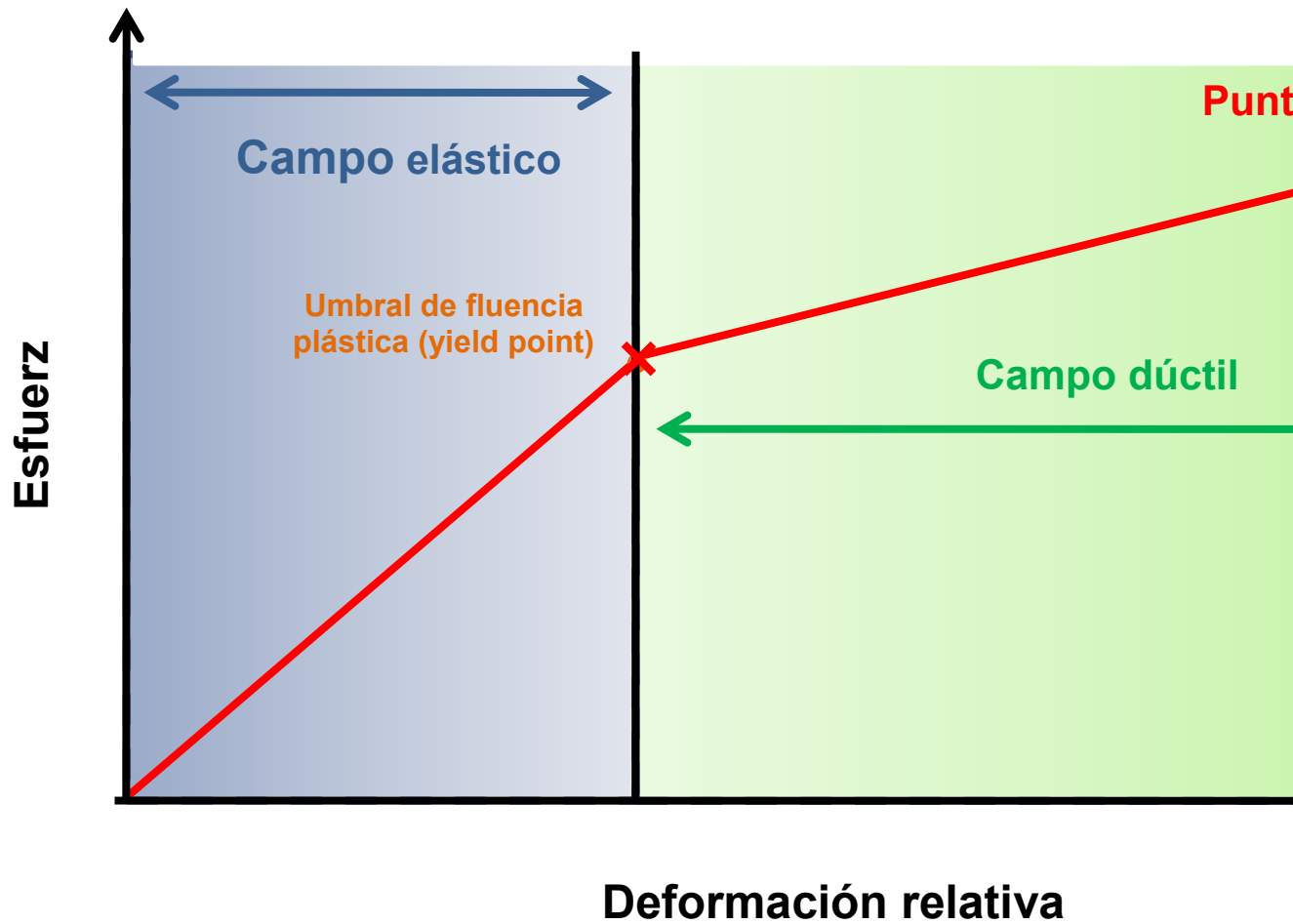


Figura 1. Diagrama de esfuerzo en función de la deformación relativa.
Fuente: Modificado de “The Stress-Depletion Response of Reservoirs,”; Addis MA;
 artículo SPE 38720

Las rocas que experimentan procesos de deformación elástica almacenan energía de deformación a medida que cambia su volumen. Cuando se remueven los esfuerzos de borde aplicados, la roca vuelve a su estado de deformación original, mientras que la energía de deformación retorna a su valor original. Con la aplicación de un mayor esfuerzo, las rocas experimentan procesos de deformación inelástica a medida que se producen cambios estructurales internos, no recuperables (que comienzan en el umbral de fluencia plástica), tales como la presencia de microfisuras debidas a la tracción, la trituración de granos o el deslizamiento en los límites intergranulares. Estos cambios producen una

deformación volumétrica permanente, a menudo aludida como deformación plástica. Los esfuerzos más altos tarde o temprano hacen que la roca falle (punto de fractura), como lo ilustra el proceso de trituración o fracturamiento de los granos y el cemento constituyentes o la disolución de los minerales.

1.5 Comportamiento Viscoelástico

La viscoelasticidad es un tipo de comportamiento reológico anelástico que presentan ciertos materiales que exhiben tanto propiedades viscosas como propiedades elásticas cuando se deforman.

En un sólido viscoelástico:

- La deformación generalmente depende del tiempo; aún en ausencia de fuerzas, la velocidad de deformación puede ser diferente de cero;
- Las tensiones y esfuerzos resistidos dependen tanto de la deformación como de la velocidad de deformación, por tanto la ecuación constitutiva que relaciona tensiones y deformaciones debe tener la forma:

$$\phi(\sigma_{i,j}, \dot{\sigma}_{i,j}, \dots, \varepsilon_{i,j}, \dot{\varepsilon}_{i,j}, \dots, t) = 0$$

Físicamente las propiedades elásticas son el resultado de desplazar ligeramente los átomos de su posición de equilibrio a lo largo de planos cristalográficos, mientras las propiedades viscosas proceden de la difusión de átomos o moléculas en el interior del material.

1.6 Esfuerzos en el subsuelo

Los esfuerzos que actúan sobre una formación pueden variar en su origen, magnitud y dirección. Los esfuerzos locales verticales naturales son originados fundamentalmente por el peso de los estratos de sobrecarga. Los esfuerzos

horizontales poseen además un componente gravitacional que puede ser intensificado por la tectónica, los efectos térmicos y la estructura geológica. No obstante, otros factores tales como la litología, la presión de poro y la temperatura, inciden en la magnitud y orientación de los esfuerzos, además del grado en que la roca responde a los esfuerzos. El esfuerzo, una medida de la fuerza que actúa sobre un área determinada, está compuesto por componentes normales y componentes de corte. El esfuerzo normal (σ) es el que se aplica en forma perpendicular a un plano o a la superficie de la roca. El esfuerzo de corte (τ) se aplica a lo largo de la cara del plano. Matemáticamente existe una orientación de ejes ortogonales que define las direcciones de los esfuerzos para las cuales los esfuerzos de corte son nulos. Esta orientación define los ejes de los esfuerzos principales, en los que los esfuerzos aplicados son estrictamente normales.

A menudo se asume que en los yacimientos, estos ejes principales ortogonales están orientados en sentido vertical y horizontal; sin embargo, esta condición no suele cumplirse. La magnitud y orientación de los esfuerzos presentes en la Tierra cambian con el buzamiento estructural de la formación, que puede rotar la orientación de los esfuerzos principales con respecto a las direcciones vertical y horizontal, así como también lo puede hacer la presencia de fallas, diapiros salinos, montañas u otras estructuras complejas.⁵

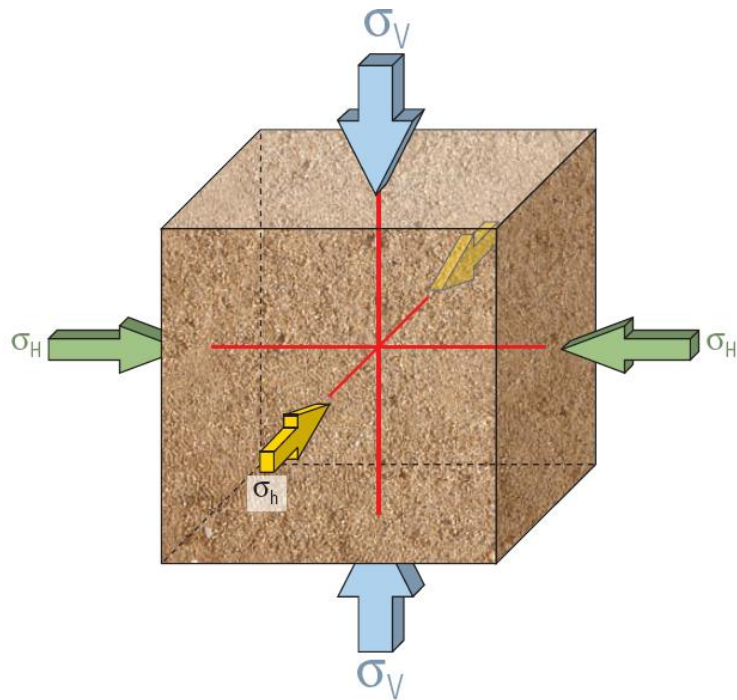


Figura 2. Diagrama de esfuerzos locales y esfuerzos principales.

Fuente: Modificado de "The Stress-Depletion Response of Reservoirs,"; Addis MA ; artículo SPE 38720

Los esfuerzos aplicados, se designan como σ_V , σ_H y σ_h , donde V indica la dirección vertical, H indica la dirección del mayor esfuerzo horizontal y h, la dirección del menor esfuerzo horizontal. Por razones de simplicidad, a menudo se asume que éstas son las direcciones de los esfuerzos principales, pero las direcciones principales de esfuerzo pueden ser rotadas en forma significativa con respecto a estos tres ejes. Los esfuerzos principales se indican en general como σ_1 , σ_2 y σ_3 , en orden de magnitud decreciente. Cuando las direcciones de los esfuerzos principales no coinciden con las direcciones vertical y horizontal, también habrá esfuerzos de corte sobre las caras del cubo en la orientación mostrada.

En la tierra, donde la deformación está restringida, los tres componentes de los esfuerzos están ligados, y cualquier cambio de esfuerzo en una dirección es acompañado por cambios de los esfuerzos a lo largo de los ejes ortogonales. Por

ejemplo, cuando la depositación continúa trae aparejadas profundidades de sepultamiento mayores, el consiguiente incremento del esfuerzo vertical de los estratos de sobrecarga puede generar cambios en el esfuerzo horizontal, dependiendo del grado en que las formaciones sean capaces de expandirse lateralmente. Esta respuesta es restringida generalmente por la presencia de formaciones adyacentes que confinan la deformación de la roca. Las diferencias en las propiedades de las formaciones también imponen contrastes de esfuerzos entre las litologías adyacentes. Por otro lado, la anisotropía de las formaciones puede traducirse en un mayor esfuerzo lateral en una dirección que en otra.

Un cuerpo de roca responde al esfuerzo aplicado a través de diversos modos de deformación relativa (deformación) que producen cambios de volumen y forma, a menudo acompañados por cambios en las propiedades de las rocas. El espectro de deformación oscila entre la deformación elástica, o reversible, y la deformación plástica, o permanente, antes de terminar finalmente en la falla de la roca. La deformación causada por la compresión, la tensión o el esfuerzo de corte puede producir fenómenos de compactación, extensión, traslación o rotación, que se traducen finalmente en rotura por cizalladura, fracturamiento o fallamiento. Además de la magnitud del esfuerzo aplicado, la respuesta de una roca al esfuerzo depende en gran medida del tipo de roca, la cementación, la porosidad y la profundidad de sepultamiento. En las areniscas, el tamaño, la forma y el área de los puntos de contacto entre los granos de roca individuales inciden en la deformación. En las calizas, la forma y la resistencia de la estructura interna de la roca influyen en la deformación.⁶

Los incrementos pequeños producidos en los esfuerzos generalmente causan una deformación pequeña, de la que la roca puede recuperarse. Pasado cierto punto, la roca experimentará un proceso de deformación plástica o fallará. El modo de deformación y falla es impuesto por la relación existente entre los cambios producidos en el esfuerzo máximo y en el esfuerzo mínimo. Esta relación se denomina trayectoria de los esfuerzos.⁴ En la geomecánica petrolera, la trayectoria

de los esfuerzos (K) es convencionalmente la relación existente entre el cambio producido en el esfuerzo horizontal mínimo efectivo y el cambio producido en el esfuerzo vertical efectivo, o esfuerzo de sobrecarga respecto de las condiciones de yacimiento iniciales durante la caída de presión de fluido, expresada en forma más simple como $K = \Delta\sigma_3 / \Delta\sigma_1$. Esto también puede expresarse en términos de cambios del esfuerzo de corte (Q) y cambios del esfuerzo medio (P'), como se muestra en el diagrama P'- Q.

Los modos claros de distorsión y falla pueden graficarse como una función del esfuerzo de corte (Q) y del esfuerzo efectivo medio (P'). Con un valor de P' relativamente bajo y un valor de Q relativamente alto, la falla de la roca se produce habitualmente como un esfuerzo de corte localizado, a lo largo de un plano orientado de manera tal que forma un ángulo con los ejes de los esfuerzos principales. Con un valor de P' relativamente alto y un valor de Q relativamente bajo, las rocas pueden experimentar fenómenos de compactación o de aplastamiento de poros.

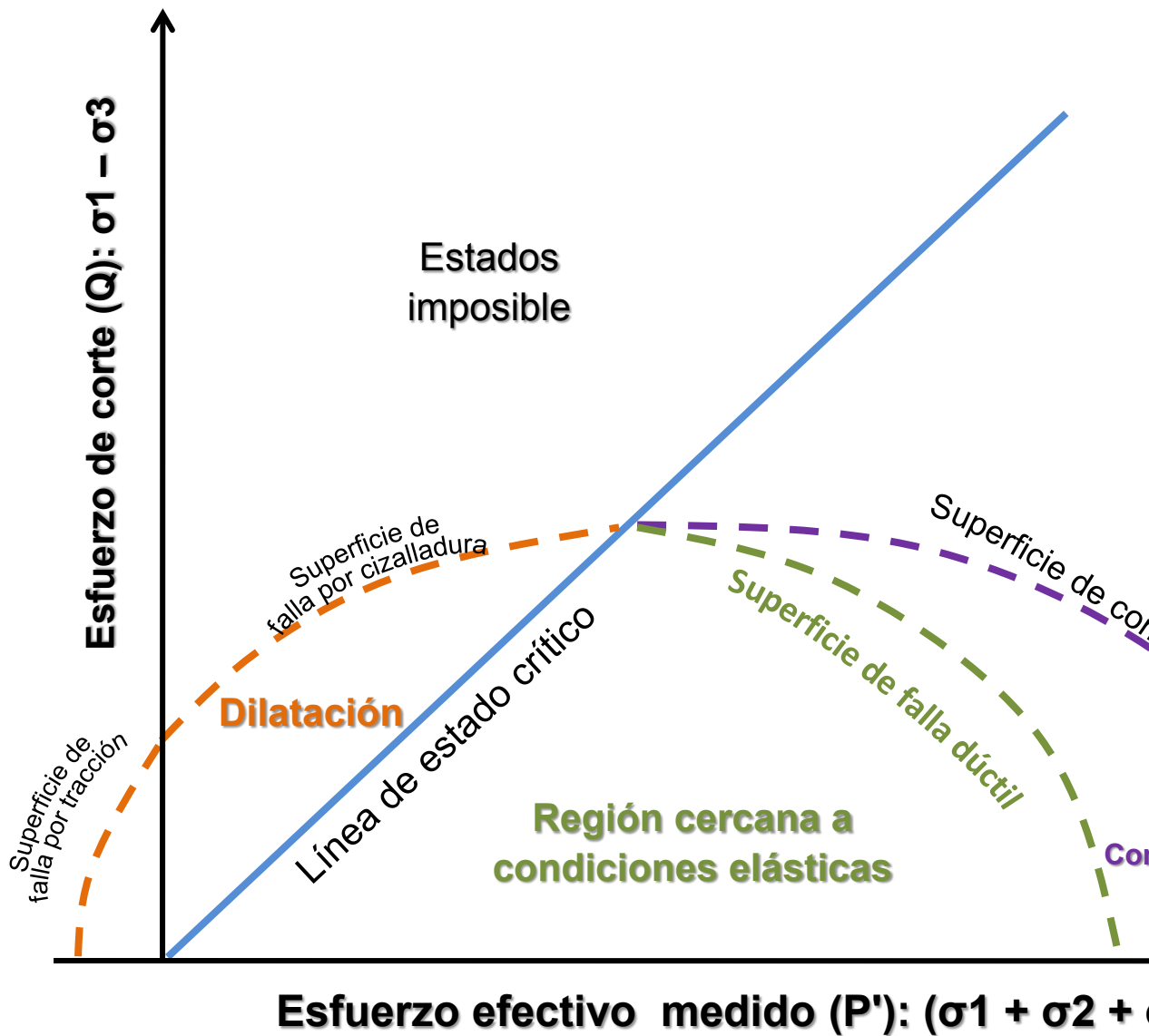


Figura 3. Distorsión y falla. Diagrama P'-Q.

Fuente: Modificado Scott TE: "The Effects of Stress Paths on Acoustic Velocities and 4D Seismic Imaging," *The Leading Edge* 26, no. 5 (Mayo de 2009): 602–608.

Una situación de esfuerzos relativamente bajos, implica que la roca fallará por esfuerzo de corte, generando un plano de corte. La resistencia a la cizalladura se

incrementa, y al incrementarse el esfuerzo de confinamiento lateral que actúa sobre la roca. Donde se observan situaciones de mayores esfuerzos, la roca experimenta un proceso de compactación o reducción de la porosidad. Este fenómeno es más común en las rocas blandas, de alta porosidad, tales como la creta, las areniscas porosas y la diatomita.

Si se someten a esfuerzos diferenciales, otras rocas, tales como las sales, tenderán a fluir con el tiempo para reducir los esfuerzos de corte y desplazarse a estados de los esfuerzos hidrostáticos.

Para manejar los yacimientos, las compañías de petróleo y gas deben enfrentar una diversidad de factores asociados a los esfuerzos de fondo de pozo, no causados en todos los casos por los estratos de sobrecarga o la tectónica. La presión de poro, las diferencias de temperatura y las interacciones químicas también pueden producir perturbaciones localizadas en la orientación y magnitud de los esfuerzos.

Si bien los esfuerzos tectónicos locales y regionales desempeñan un rol central en la deformación de las rocas, también deben considerarse otros factores de fondo de pozo, tales como la presión de poro, el peso del lodo y las fluctuaciones de la presión, la temperatura y la química de fondo de pozo, por sus claras contribuciones a la relación entre los esfuerzos locales y las deformaciones. Sus efectos pueden ser atemperados además por las propiedades texturales únicas de la litología local, tales como el tamaño y la distribución de los granos y poros que constituyen el esqueleto de la roca, la mineralogía y la composición de los cementos diagenéticos. Dada la diversidad de reacciones que tienen lugar ante la presencia de esfuerzos, es crucial que un operador sepa todo lo posible acerca de las rocas que rodean un pozo y las condiciones a las que dicho pozo será sometido.

1.6.1 Cambios producidos en los esfuerzos

Las actividades de perforación y producción afectan el estado de los esfuerzos locales. Los problemas que surgen durante las operaciones de perforación pueden presagiar las dificultades que aparecerán subsiguientemente durante la fase de producción. Los cambios en el estado de los esfuerzos pueden producir la falla de las rocas y esto causar problemas de inestabilidad del pozo durante la perforación. A su vez, estos cambios pueden conducir posteriormente a problemas de producción de arena, cuando el pozo ya ha sido terminado. Otras actividades llevadas a cabo durante la vida productiva de un campo petrolero pueden generar cambios en la presión de poro y la temperatura, que probablemente modifiquen los esfuerzos que actúan desde mayores distancias al pozo. Los cambios del estado de los esfuerzos no sólo afectan el yacimiento sino también las formaciones adyacentes.

La actividad de perforación perturba el equilibrio inicial de los esfuerzos presentes en la región vecina al pozo. Dado que a través de la perforación se excava un volumen cilíndrico de roca, los esfuerzos ejercidos con anterioridad sobre ese volumen deben ser transferidos a la formación adyacente. Este proceso crea esfuerzos tangenciales, o radiales, que deben ser soportados por la roca que rodea el pozo. Los esfuerzos ejercidos en el pozo son una función del peso del lodo, la inclinación del pozo, el ángulo y el azimut del lechado de la formación, y la magnitud y orientación de los esfuerzos de campo lejano (σ_V , σ_H y σ_h). El esfuerzo radial varía considerablemente en función del radio y el azimut del pozo. Por otro lado, puede exceder considerablemente el valor de σ_H .

En la mayoría de las operaciones de perforación convencionales, los perforadores utilizan la presión hidráulica del fluido de perforación como sustituto del soporte mecánico que se pierde a través del volumen cilíndrico de la roca excavada durante la perforación de un pozo. Esencialmente, reemplazan un cilindro de roca

por un cilindro de fluido de perforación. No obstante, la presión del lodo es uniforme en todas las direcciones y no puede equilibrarse contra los esfuerzos de corte orientados presentes en una formación. A medida que el esfuerzo se redistribuye alrededor de la pared del pozo, los esfuerzos de corte pueden exceder la resistencia de la roca. Si esto ocurre, el pozo se deformará o fallará por completo.

Durante la perforación, los pozos pueden verse comprometidos a través de una diversidad de modos de fallas inducidas por el lodo:⁷

- **La falla por tracción:** Es la que se produce mediante el incremento de la presión del lodo hasta que la pared del pozo ingresa en un estado de tensión y finalmente excede la resistencia a la tracción de la roca. Esto fractura la roca a lo largo de un plano perpendicular a la dirección del esfuerzo mínimo, lo que a menudo se traduce en problemas de pérdida de circulación.

- **La falla por compresión:** Esta puede ser causada por el peso del lodo, que es demasiado bajo o demasiado alto. En cualquiera de los dos casos, la formación se desmorona o se fragmenta, produciendo daños al pozo y ovalizaciones por ruptura de la pared del pozo.

A menos que el pozo haya sido limpiado correctamente, la acumulación de los escombros producidos por las ovalizaciones puede ocasionar el atascamiento de las tuberías por desmoronamientos o colapso del pozo.

- **El desplazamiento por esfuerzo de corte:** Es el que se produce cuando la presión del lodo es suficientemente alta como para reabrir las fracturas existentes intersectadas por el pozo. Cuando una fractura se abre, los esfuerzos presentes a lo largo de la abertura se liberan provisoriamente, permitiendo que las caras opuestas de la fractura sean sometidas a esfuerzos de corte. En el pozo, esto crea una dislocación pequeña pero potencialmente peligrosa.

La estabilidad del pozo es afectada además por factores estructurales, tales como la interacción existente entre la inclinación del pozo, el echado de la formación y las variaciones direccionales de la resistencia entre los planos de estratificación de las formaciones y a lo largo de dichos planos. No es inusual que se produzca cierto grado de falla del pozo en los pozos verticales que intersectan lutitas de inclinación pronunciada, o en los pozos inclinados que intersectan los planos de estratificación de las lutitas formando ángulos bajos. Tales fallas son iniciadas por la presencia de bajos esfuerzos de corte y baja resistencia a la tracción a lo largo de los planos de debilitamiento de las lutitas.⁸

El tema de la resistencia, o la capacidad de una roca para tolerar el esfuerzo, pone de manifiesto una influencia subyacente importante con respecto a la deformación y la falla: la de la estructura interna de la roca. La estructura interna de la roca puede determinar si una determinada magnitud del esfuerzo hará que una roca se deforme o falle por completo, y puede incidir en el alcance y la orientación de las fracturas o las ovalizaciones de un pozo. Por lo tanto, si bien habitualmente se asume que la ovalización por ruptura de la pared del pozo se orienta a lo largo del eje de esfuerzo mínimo, la estratificación, cementación, mineralogía y granulometría de una roca pueden redirigir concretamente el curso de una ovalización a lo largo de los puntos más débiles de la roca.

1.7 Modelado de las propiedades geomecánicas

La interacción entre la geología, la orientación de los pozos y los cambios de los esfuerzos causados por las operaciones de perforación o producción constituye un proceso 3D complejo. Esta interacción cambia constantemente con el tiempo, lo que agrega otra dimensión de complejidad adicional. A lo largo de la vida de cualquier campo productivo, suceden innumerables eventos que alteran el marco geomecánico existente entre el yacimiento y la superficie. Se perforan y prueban pozos de exploración; se perforan y ponen en producción pozos adicionales;

algunos pozos pueden convertirse en inyectoras, otros son reparados, y otros incluso se taponan y abandonan. Cada actividad provoca cambios en los esfuerzos; algunos efímeros y otros más perdurables. Y estos cambios pueden ser costosos, con potencial para afectar la integridad, la porosidad y la permeabilidad de las formaciones; la compactación y la subsidencia de los yacimientos; y la integridad de los pozos y de las operaciones de terminación.

La comprensión de dichos cambios comenzó, en parte, con el hecho de reconocer que el fenómeno de subsidencia observado en ciertos campos, se relacionaba directamente con la producción. A comienzos de la década de 1950, se desarrollaron modelos matemáticos básicos para comprender y anticipar la subsidencia del Campo Wilmington, situado en California.⁹ Más adelante, la subsidencia del Campo Ekofisk del Mar del Norte, descubierto a comienzos de la década de 1980, instó al desarrollo de métodos de modelado por elementos finitos. Estos modelos vinculaban la producción de hidrocarburos con cambios producidos en las propiedades de los yacimientos y en la deformación y, a su vez, con el movimiento del lecho marino y la presencia de fallas en los estratos de sobrecarga.

Las compañías de E&P se interesaron en saber cómo evolucionan los esfuerzos a medida que se agotan los yacimientos. Si fuera posible modelar los cambios de los esfuerzos a lo largo de la vida productiva de un campo petrolero, los operadores podrían predecir los problemas durante la vida productiva de un pozo o anticipar la necesidad de perforar pozos de relleno. Con el crecimiento constante de la capacidad computacional, los programas de geomecánica adquirieron capacidades de modelado cada vez más sofisticadas. Los sofisticados simuladores numéricos de nuestros días exigen inevitablemente un conjunto de datos más robusto.

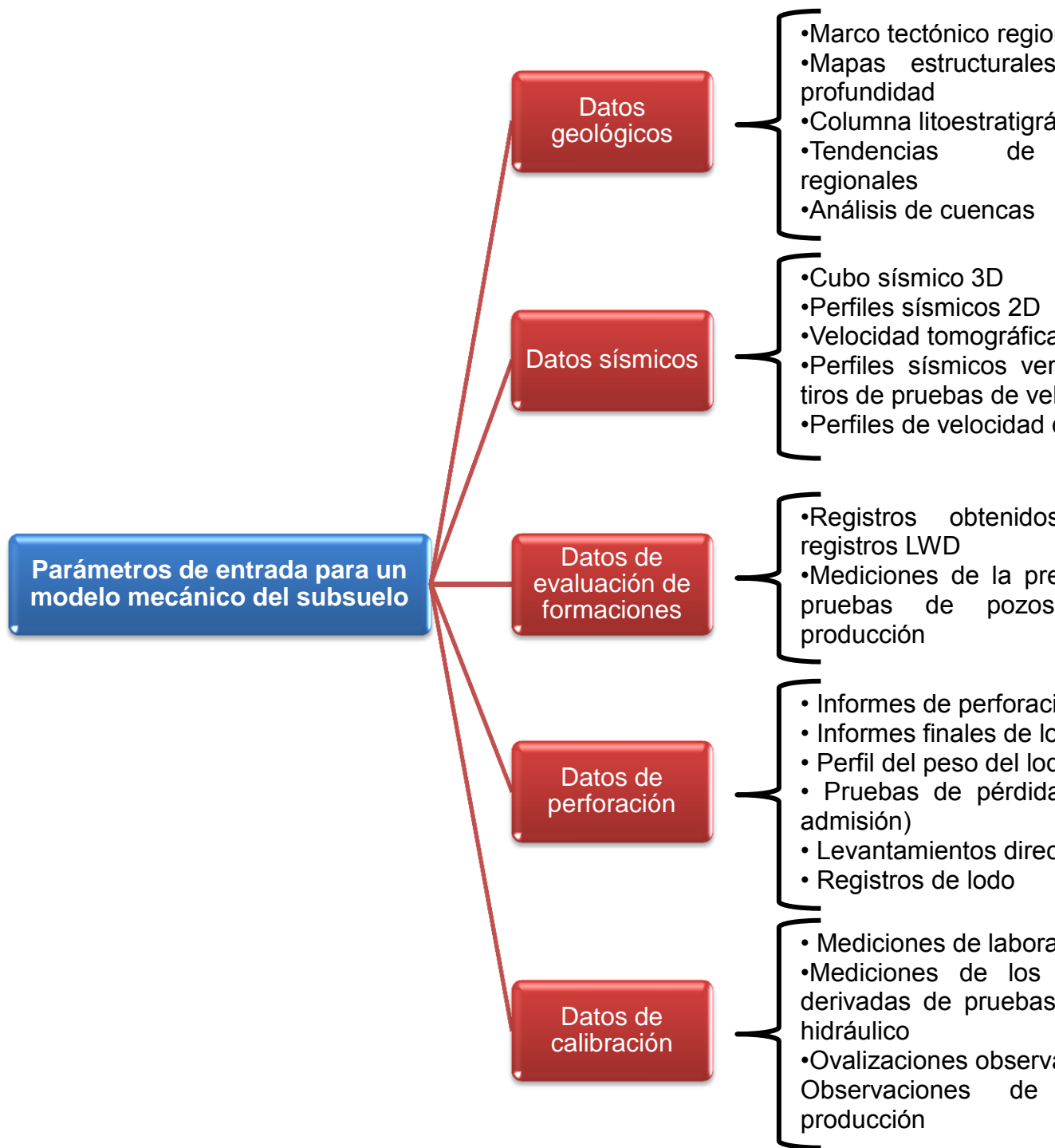


Figura 4. Parámetros de entrada para un modelo mecánico del subsuelo.

Fuente: Modificado de Ali AHA, Brown T, Delgado R, Lee D, Plumb D, Smirnov N, Marsden R, Prado-Velarde E, Ramsey L, Spooner D, Stone T y Stouffer T: "Observación

del cambio de las rocas: modelado mecánico del subsuelo,” Oilfield Review 15, no. 2 (Otoño de 2003): 22–41.

El método de modelado por elementos finitos es ampliamente utilizado para el análisis de los esfuerzos, tanto en ingeniería convencional como en geomecánica. El modelado por diferencias finitas se emplea para analizar el flujo de fluido.

Esta capacidad es clave para el desarrollo de modelos mecánicos del subsuelo 3D y 4D, secuenciados en el tiempo. A diferencia de los modelos de producción de yacimientos, los modelos mecánicos del subsuelo deben tener en cuenta no sólo el yacimiento sino también la sobrecarga, el fondo marino, la carga subyacente, o roca por debajo del yacimiento, y la carga lateral, o roca adyacente, lo que a menudo provee condiciones de borde para los esfuerzos.¹⁰

El modelo resultante puede ser utilizado como una fuente de datos de los esfuerzos para diversas etapas clave:

- *Planeación de pozos*: estabilidad del pozo y azimut de perforación óptimo
- *Terminación de pozos*: manejo de la producción de arena
- *Tratamientos de estimulación de formaciones*: orientación de la fractura hidráulica
- *Manejo de campos*: mantenimiento de la presión e inyección
- *Integridad de pozos*: diseño de pozos que den cabida a la compactación y a la subsidencia a medida que se hace producir el pozo

2. MECÁNICA DE ROCAS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO

La creación de un hueco en el subsuelo cuando se perfora un pozo, y la introducción de fluidos de perforación y completamiento para tener la formación estable, se considera actualmente en geomecánica como la principal razón de una serie de fenómenos que dan lugar a la inestabilidad del pozo, colapso de casing, falla de perforación y producción de arena.

La presencia de un hueco casi circular causa una concentración de esfuerzos que puede extenderse a un diámetro de pozo cercano al mismo hueco. Esta concentración de esfuerzos se diferencia de los esfuerzos generados en una zona lejana a la cara del pozo, en que los primeros podrían superar la fuerza de resistencia de la formación, generando una falla. El hueco también crea una superficie libre dado que elimina el confinamiento natural. Esta puede depender de las propiedades mecánicas de la formación, reduciendo la resistencia de la formación y dependiendo del tiempo de falla provocando inelásticidad. Por lo tanto, la apertura de un pozo en el subsuelo genera varios efectos colaterales:

- Creación de un campo de concentración de esfuerzos.
- Eliminación de la condición de confinamiento.
- Inestabilidad y desplazamiento en función del tiempo, causadas por la creación de una superficie libre.

La severidad de estos efectos y la presencia de una falla, posterior al hueco, dependerá de las magnitudes de los esfuerzos y las propiedades mecánicas de la formación.

Similarmente introduciendo fluidos exteriores a la formación, los efectos que se tienen son los siguientes:

- Se altera la presión de poro, creando una presión de poro localizada y elevada.
- Se reduce la fuerza de cohesión de la formación, la cual es función principalmente de la interacción del fluido con la matriz de la formación.
- Se presentan cambios de las fuerzas capilares.

2.1 Propiedades mecánicas de la roca

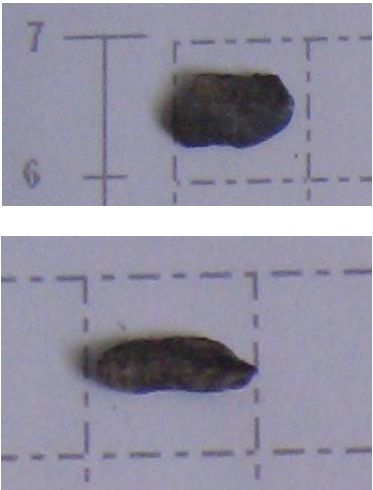
Antes que discutir las propiedades mecánicas básicas de la roca, en esta sección sólo se discutirán las propiedades específicas pertinentes a las actividades cerca del pozo. Estas actividades incluyen la inestabilidad del pozo asociada con la perforación, falla del cemento, aspectos de la mecánica de rocas de perforaciones, el inicio falla hidráulica, la geometría de fractura cercana al pozo, y la producción de arena. Las propiedades mecánicas a tratar incluyen características de carga-descarga, cargas cíclicas, poroelasticidad, viscoelasticidad, colapso poral, y la resistencia de la fractura.



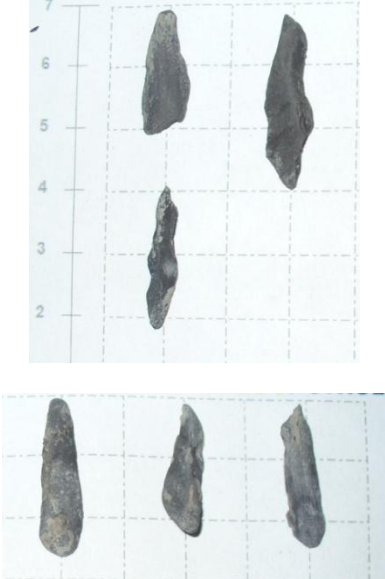
2.1.1 Características de carga-descarga


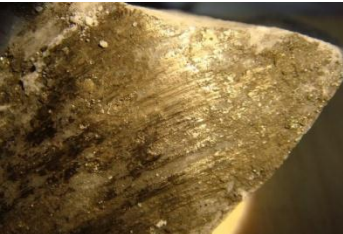
La construcción del pozo consiste en la carga del medio poroso de fluidos de perforación y descarga de fluidos de la formación, junto a la construcción de una envoltura de cemento que hace las veces de estructura que brinda estabilidad a

las paredes del mismo. Por lo tanto, estudiar las características de un ciclo de carga y descarga completo es importante. La evaluación del cemento y de las muestras de formación es una de las estrategias de control más utilizadas comúnmente durante la construcción de un pozo. La relación esfuerzo-deformación incide sobre la forma de los residuos de la formación que ascienden a la superficie, en función de la respuesta que la estructura del material granular tiene frente a la carga aplicada. Esta relación indica si la muestra de material es elástica o plástica, frágil o dúctil, y su comportamiento durante el proceso de carga y descarga frente a una deformación suave o a una deformación fuerte. En la Tabla No 1 se puede apreciar un resumen de la clasificación principal de los diferentes tipos de residuos (cavings) y como su forma da una idea del fenómeno ocurrido en fondo.

Tabla 1. Tipos de residuos de perforación. Su forma es un indicador del tipo preferencial de material (modelo) que se encuentra en el subsuelo.

Tipo de caving	Generalidades	Forma
<p>Tabular & Blocosos</p>	<p>Son el resultado de fracturas naturales ó planos de debilidad. En el caso de las fracturas naturales, la presión del fluido en el anular excede el esfuerzo horizontal mínimo lo cual resulta en una invasión de lodo en el sistema de fracturas alrededor del la cara del pozo. Esto puede conllevar a desestabilización severa del la región cercana a la pared del hueco debido al movimiento de los bloques de roca, conduciendo rápidamente a la ocurrencia de altas ratas de cavings, perdidas de retorno y pegas de tubería. Los bloques de rocas son rodeados por planos de fracturas naturales y por lo tanto tienen caras planas y paralelas. Algunos de estos planos de estratificación no serán paralelos a las caras del caving. Por otro lado los cavings que son resultado de los</p>	

	<p>planos de debilidad están caracterizados por tener caras planas y paralelas, además la dirección de estratificación es paralela a las caras.</p>	
<p>Angulares</p>	<p>Son consecuencias de fallas en la pared del hueco. Estos cavings están caracterizados por caras curvas con estructuras superficiales rugosas. Las superficies se interceptan en ángulos agudos (menores a 90°)</p>	
<p>Splintered</p>	<p>Tienen dos caras cercanamente paralelas con estructuras de pluma. se producen debido a que la falla de tensión ocurre paralela a pared del hueco y comúnmente en zonas sobrepresionadas perforadas con bajos sobrealances. El esfuerzo radial efectivo es en el momento de la producción de cavings es aún más bajo debido a la sobrepresión del fluido en los poros de la formación.</p>	
<p>Retrabajados (Reworked)</p>	<p>Estos cavings pudieron haber sido originados como tabular, blocky, angular splintered ó slicken side, pero debido al viaje de recorrido hacia sus esquinas redondeadas y</p>	

	las características propias que permiten diferenciar las morfologías entre sí no son observables.	
Slicken Side	Proviene de zonas de fallas. Su principal característica es que en sus caras presentan evidencia de deslizamiento, es decir, presentan espejos de fallas y superficies estriadas.	

Fuente: Curso de Geomecánica Básica – Universidad Corporativa – Instituto Colombiano del Petróleo 2009 y <http://en.wikipedia.org/wiki/Slickenside>

2.1.1.1 Poroelasticidad

Dentro de la proximidad del pozo, se puede examinar la poroelasticidad basada en el concepto de tensiones efectivas introducido por Terzaghi (1943) y Biot (1941). Este concepto sugiere que la presión de poro ayuda a contrarrestar el esfuerzo mecánico realizado a través del contacto de grano a grano. El efecto de la eficiencia de la presión de poro, p_r , se mide por el factor de poroelasticidad α ; la relación viene dada por:

$$\sigma' = \sigma - \alpha p_r \quad (2-1)$$

donde σ' es el esfuerzo efectivo y σ es el esfuerzo total (absoluto).

La constante de poroelasticidad es:

$$\alpha = 1 - \frac{C_{ma}}{C_b}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2-2)$$

donde C_{ma} es compresibilidad de la matriz de la roca, con el volumen de compresibilidad dado por:

$$C_b = \frac{3(1-2\nu)}{E} \quad (2-3)$$

en donde ν es la relación de Poisson y E es el modulo de Young. Si la roca no tiene porosidad, la compresibilidad de la matriz de la roca, C_{ma} es igual a C_b y α se convierte en cero. Recíprocamente con alta porosidad, la compresibilidad es pequeña comparada con la compresibilidad volumétrica, y α es aproximadamente 1. Aunque la constante de poroelasticidad puede ser evaluada en laboratorio, también se puede obtener a través de una envolvente de falla dada, generada a partir de muestras secas (Figura 5).

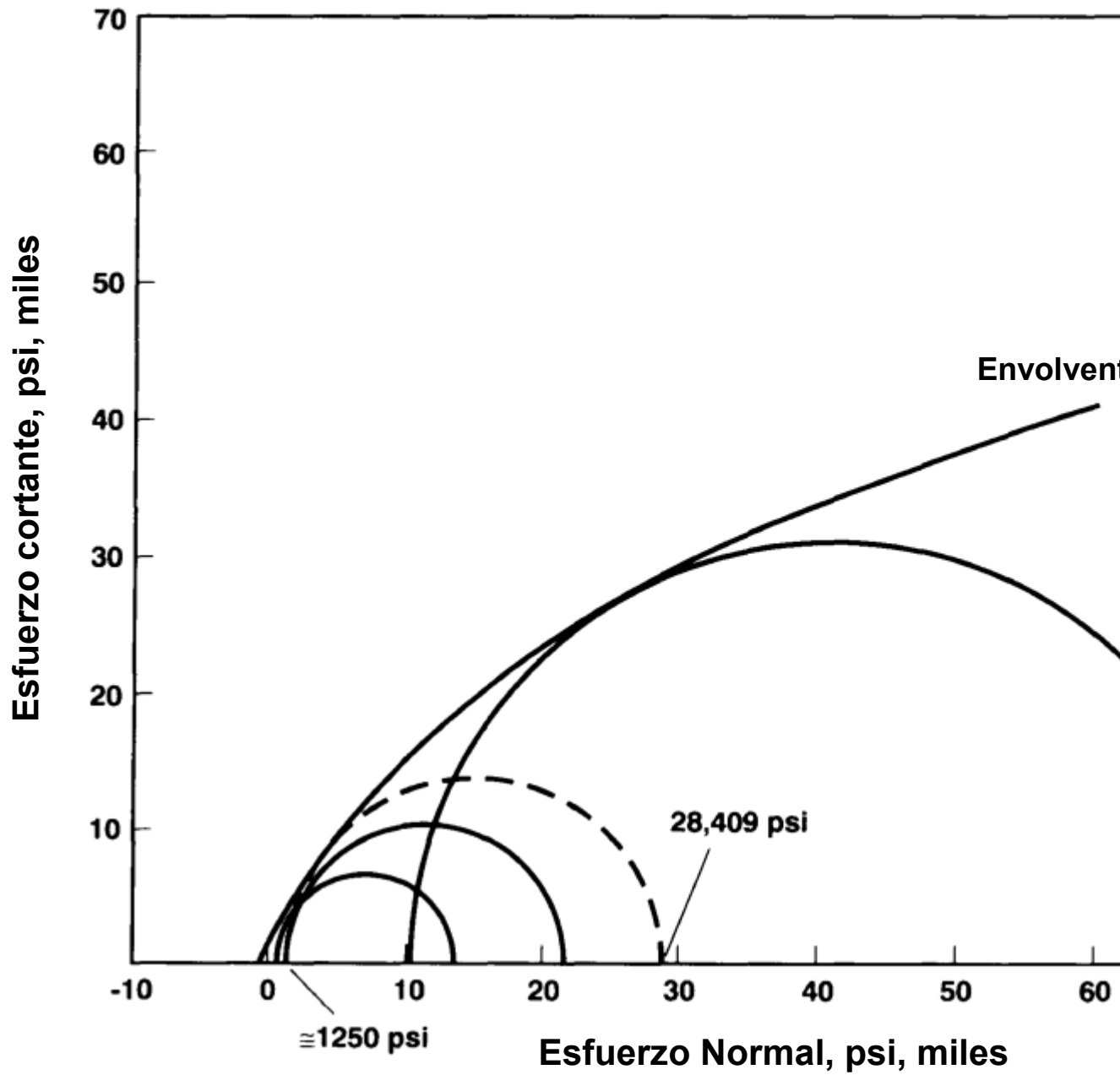


Figura 5. Determinación gráfica de α . Utilizando los datos de muestras secas, se construye la envolvente de Mohr.

Fuente: Modificado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

2.1.1.2 Viscoelasticidad

"Creep" es una propiedad viscoelástica o fenómeno dependiente del tiempo que contribuye significativamente con muchos problemas de inestabilidad relacionados con la construcción del pozo. Las pruebas de fluencia estudian la deformación de la roca bajo esfuerzo constante como una función del tiempo. Los desplazamientos totales obtenidos a partir de la aplicación de un esfuerzo constante son la suma de dos componentes:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon(t) \quad (2-4)$$

donde ε_t es la deformación total y ε_e es la deformación elástica.

La función de fluencia, $\varepsilon(t)$, caracteriza las propiedades reológicas de una roca. Una ecuación general para la función de fluencia puede ser compleja, y es mejor describirla con datos experimentales para un determinado rango de esfuerzo y temperatura.

2.1.1.3 Ductilidad a la Fractura

La ductilidad de la fractura es una propiedad del material que refleja la resistencia de la roca de una fractura existente a propagarse de un modo de fracturamiento dado. Para propagar una fractura radial o en "forma de moneda", se deben cumplir las siguientes condiciones en el frente de la fractura:

$$K_I \geq K_{IC}$$

$$K_I = (p_f - \sigma_{H,\min})\sqrt{\pi l} \quad (2-5)$$

Donde K_{IC} es la resistencia a la fractura, $\sigma_{H,\min} = \sigma'_{H,\min} + p_r$ y p_f es la presión dentro de la fractura.

Cuando se usa la mecánica de fractura elástica lineal, la resistencia a la fractura está relacionada con la fuerza de tensión, T (asumiendo condiciones estáticas) de la siguiente manera (Economides y Nolte, 1987):

$$T = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi l}} \quad (2-6)$$

Donde l es la longitud de una fractura o grieta existente.

Entre otras correlaciones útiles para la resistencia a la fractura, la fuerza de tensión, T , modulo de Young, E , y fuerza de compresión, C_o , Whittaker y otros (1992) proponen:

$$K_{IC} = 0,27 + 0,107T \quad (2-7)$$

$$K_{IC} = 0,336 + 0,026E \quad (2-8)$$

$$K_{IC} = 0,708 + 0,006C_o \quad (2-9)$$

Donde K_{IC} está en MPa \sqrt{m} , E está en GPa, y C_o está en MPa.

2.1.1.4 Aparente resistencia a la fractura

En fracturamiento hidráulico, el fluido de fracturamiento no llena la fractura completamente, y en el extremo del frente (punta) de fractura es en donde se encuentra realmente la zona fracturada de la roca. Este fenómeno ha sido observado varias veces en el laboratorio durante experimentos de fracturamiento hidráulico. La punta no mojanete causa una resistencia adicional a la propagación de la fractura, que conduce a una resistencia a la fractura por parte de la roca aparente más elevada. La magnitud de esta caída de presión adicional en región no mojanete, Δp_{nw} , es dada por Knott (1973):

$$\Delta p_{nw} = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \left(\frac{E \sigma_{H,min} W_{nw}}{1-\nu^2} \right) \quad (2-10)$$

donde w_{nw} es el ancho de la región no mojante, mientras que la caída de presión en la fractura, causada por la resistencia de la roca a la fractura dada por el modo de fractura 1 y una geometría de fractura específica, viene dada por:

$$\frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi l}} \quad (2-11)$$

Un anillo de pruebas modificado (Thiercelin and Roegiers, 1986) puede ser usado para la evaluación de la resistencia a la fractura en el laboratorio.

2.1.1.5 Resistencia a la fractura vs Presión de confinamiento efectiva.

Roegiers y Zhao (1991) han demostrado que la resistencia a la fractura es función de la presión de confinamiento, lo que puede explicar la dificultad de ajustar la presión de fracturamiento sobre la medida de la resistencia a la fractura básica a condiciones de no confinamiento. La Tabla 2 muestra valores seleccionados de resistencia a la fractura que fueron determinados experimentalmente. Muller (1986) mostró resultados experimentales en muestras de areniscas siguiendo la siguiente ecuación:

$$K_{IC}(p_c) = (1 + 0,037p_c)K_{IC} \quad (p_c = 0) \quad (2-12)$$

donde p_c es la presión de confinamiento.

Tabla 2. Valores seleccionados de resistencia a la fractura

Tipo de Roca	Presión de Confinamiento (MPa)	L_{IC} MPa \sqrt{m} (Rogiers and Zhao, 1991)	K_{IC} MPa \sqrt{m} (de la ecuación 1-12)
Chalk	0	0,73	0,73
Chalk	24,13	2,22	1,38

Chalk	48,26	2,32	2,04
Limestone	0	1,44	1,44
Limestone	24,13	2,12	2,73
Limestone	48,26	4,92	4,01
Sandstone	0	1,36	1,36
Sandstone	24,13	2,62	2,57
Sandstone	48,26	4,96	3,79

Fuente: Autor

2.1.1.6 Colapso de poro

Aunque el colapso de poro se convierte en un factor importante durante un largo tiempo en el agotamiento del yacimiento, el diseño de la construcción del pozo debe tener en cuenta esta propiedad mecánica de la roca como medio de prevención para problemas futuros cerca del pozo tales como hundimiento, falla del casing, colapso de perforación, y otros daños. El colapso de poro es causado por la caída de presión de poro severa, lo cual puede ocasionar problemas en el yacimiento, tales como disminución de porosidad y permeabilidad (especialmente cerca del pozo), producción de arena y migración de finos. El colapso de poro puede también causar compactación a lo largo de la sobrecarga de los estratos, principalmente en el hundimiento o cizallamiento del pozo, lo cual puede resultar en colapso de casing, y con el tiempo hasta en colapso de tubería. La figura 6 muestra la distribución de colapso de poro descrita por el criterio de falla de Mohr.

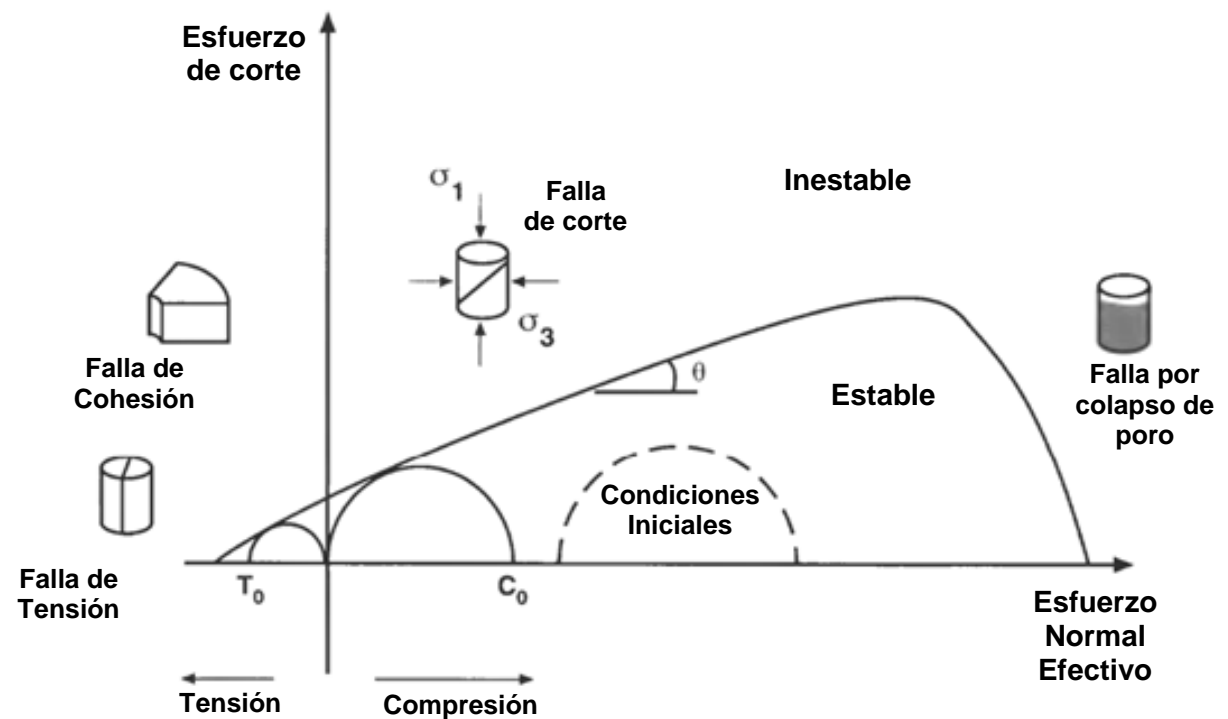


Figura 6. Diferentes mecanismos de falla y sus localizaciones de campo de esfuerzos dentro de la envolvente de falla de Mohr Coulomb.

Fuente: Modificado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

2.2 Campo de esfuerzos cerca de la cara del pozo

Un pozo perforado a través de una formación rocosa introduce un nuevo campo de esfuerzos en la proximidad del pozo que puede ser lo suficientemente grande como para provocar una falla. Adicionalmente cuando un pozo está con una carga activa (presión en el pozo es menor que la presión en el yacimiento) o con una carga pasiva (presión en el pozo es mayor que la presión del yacimiento) otro efecto de esfuerzos podría causar la falla de la formación.

Si nosotros asumimos homogeneidad, isotropía, masa de roca linealmente elástica que está deformada por debajo de su límite elástico, un campo de esfuerzos

expresado en coordenadas polares (vertical, tangencial, y radial) es dado por Kirsch (Jaeger and Cook, 1979):

$$\sigma'_v = g \int_0^H \rho_b dH - \alpha p_r \quad (2-13)$$

donde ρ_b es la densidad aparente de las capas de sobrecarga y H es la profundidad.

$$\begin{aligned} \sigma'_{rr} = & \frac{1}{2}(\sigma'_{H,max} + \sigma'_{H,min}) \left(1 - \frac{r_w^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma'_{H,max} - \sigma'_{H,min}) \left(1 - \frac{4r_w^2}{r^2} + \frac{3r_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\ & + \frac{r_w^2}{r^2}(p_w - p_r) \end{aligned} \quad (2-14)$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{\theta\theta} = & \frac{1}{2}(\sigma'_{H,max} + \sigma'_{H,min}) \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma'_{H,max} - \sigma'_{H,min}) \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\ & - \frac{r_w^2}{r^2}(p_w - p_r) \end{aligned} \quad (2-15)$$

donde p_w es la presión de fondo de pozo y p_r es la presión de yacimiento.

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma'_{H,max} + \sigma'_{H,min}) \left(1 - \frac{2r_w^2}{r^2} - \frac{3r_w^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (2-16)$$

donde los esfuerzos de compresión son positivos, y θ es el ángulo medido desde la dirección de $\sigma_{H,max}$. En el pozo, $r = r_w$, y asumiendo que una torta separa la presión del pozo, p_w de la presión del yacimiento, p_r entonces:

$$\sigma'_{rr} = p_w - p_r \quad (2-17)$$

$$\sigma'_{\theta\theta} = \sigma'_{H,max} + \sigma'_{H,min} - 2(\sigma'_{H,max} - \sigma'_{H,min}) \cos 2\theta - (p_w - p_r) \quad (2-18)$$

y

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (2-19)$$

Si se consideran los dos casos donde $\theta = 0(\sigma'_{H,max})$ y $\theta = 90(\sigma'_{H,min})$, se obtiene:

$$\sigma_{\theta=0} = 3\sigma'_{H,max} + \sigma'_{H,min} - p_w + p_r \quad (2-20)$$

y

$$\sigma_{\theta=90} = 3\sigma'_{H,max} + \sigma'_{H,min} - p_w + p_r \quad (2-21)$$

Para iniciar una falla de tensión, como es el caso de fracturamiento hidráulico, $\sigma_{\theta=0}$ debe convertirse en un valor negativo de la fuerza de tensión ($\sigma_{\theta=0} = -T$). La presión de ruptura requerida para iniciar una fractura se puede calcular fácilmente de la ecuación 2-20:

$$p_{hd} = 3\sigma'_{H,max} + \sigma'_{H,min} + T + p_r \quad (2-22)$$

o en términos de esfuerzos totales:

$$p_{hd} = 3\sigma_{H,max} + \sigma_{H,min} + T - p_r \quad (2-22a)$$

Los esfuerzos $\sigma_{H,min}$, $\sigma_{H,max}$ y σ_v se deben determinar en campo; sin embargo, a falta de información de campo disponible, la siguiente aproximación puede ser usada:

$$\sigma'_v = 1.1H - \alpha p_r \quad (2-23)$$

Partiendo del supuesto de que la formación es elástica, tectónicamente relajada y limitada lateralmente, los esfuerzos horizontal máximo y mínimo efectivos se pueden estimar de la siguiente manera:

$$\sigma'_{H,min} = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma'_v) \quad (2-24)$$

y

$$\sigma'_{H,max} = \frac{\sigma'_v + \sigma'_{H,min}}{2} \quad (2-25)$$

La solución anterior es válida sólo para las rocas elásticas. Sin embargo, cuando un taladro se introduce a una formación intacta, una región plástica se desarrolla en las proximidades del pozo, y prevalece una región elástica que se extiende un poco antes de diámetro del pozo, como se muestra en la Figura 7. La región plástica puede crear muchos problemas de inestabilidad de pozo durante la perforación. En la *zonepay* como resultado de la producción, la región plástica puede propagarse en lo más profundo del yacimiento, causando la conocida producción de arena.

En rocas fracturadas, se puede generar colapso de pozo, a menos que se utilice un alto peso del fluido de perforación. En la medida de lo posible, se debe conocer el tamaño de la región plástica con el fin de analizar la estabilidad del pozo, de los cañoneos e indagar la potencial producción de arena.

$$\sigma_{H,min} = \sigma_{H,max} = \sigma$$

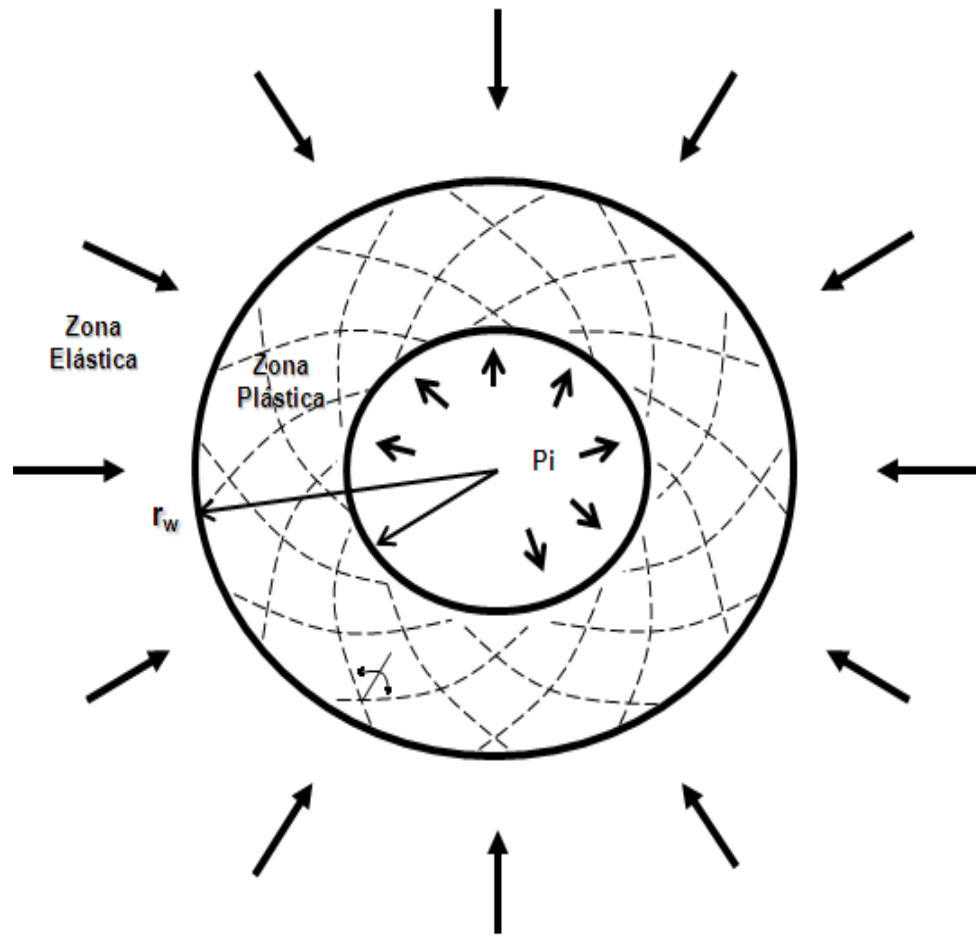


Figura 7. Las zonas plástica y elástica como se asume en la solución de Bray, después Goodman en 1980

Fuente: Modificado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

Bray (1967) asumió que las fracturas existentes en la zona plástica tienen forma espiralada con inclinación respecto a la dirección radial como se muestra en la Figura 7 (Goodman 1980). Si se aplica la teoría de Mohr-Coulomb, el radio de la zona plástica viene dado por:

$$r_{pl} = r_w \left[\frac{2\sigma' - C_0 + \left(1 + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}\right)}{\left(1 + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}\right)(p_w - p_r) + C_j \cot \phi_j} \right]^{1/Q} \quad (2-26)$$

donde

$$Q = \frac{\tan \delta}{\tan(\delta - \phi_j)} - 1 \quad (2-27)$$

y donde C_j es la cohesión para las uniones de las rocas (determinada experimentalmente) y ϕ_j es el ángulo de fricción interno de las uniones de las rocas.

$$\sigma'_{H,min} = \sigma'_{H,max} = \sigma' \quad (2-28)$$

Dentro de las zonas elástica y plástica, la solución de Bray está dada por:

$$\sigma'_{rr} = \sigma' - r_{pl} \left[\frac{\left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} - 1\right)\sigma' + C_0}{r^2 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + 1\right)} \right] \quad (2-29)$$

$$\sigma'_{\theta\theta} = \sigma' - r_{pl} \left[\frac{\left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} - 1\right)\sigma' + C_0}{r^2 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + 1\right)} \right] \quad (2-30)$$

para la zona elástica, y

$$\sigma'_{rr} = \left((p_w - p_r) + C_j \cot \phi_j \right) \left(\frac{r}{r_w} \right)^Q - C_j \cot \phi_j \quad (2-31)$$

$$\sigma'_{\theta\theta} = \left((p_w - p_r) + C_j \cot \phi_j \right) \frac{\tan \delta}{\tan(\delta - \phi_j)} \left(\frac{r}{r_w} \right)^Q - C_j \cot \phi_j \quad (2-32)$$

para la zona plástica.

En la Figura 8 se muestran resultados aplicando Soluciones de Kirsch y Bray. El radio de la zona plástica es 3,47 veces el radio del pozo. Estos cálculos son importantes sobre todo si se requiere considerar la zona plástica en una formación poco consolidada. Con pruebas de pozo en la zona, puede realizar un examen semejando el análisis de un daño causado por la deformación plástica de la roca.

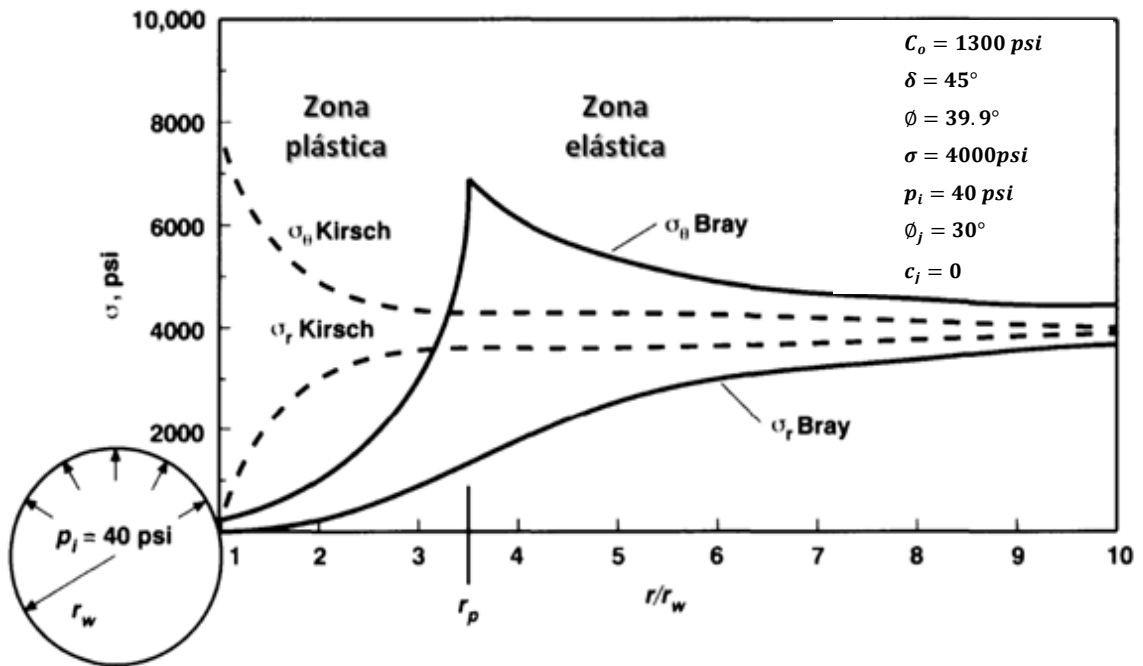


Figura 8. Soluciones de Kirsch y Bray, de Goodman, 1980.

Fuente: Modificado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

2.3 Criterio de Falla

Para entender un mecanismo de falla, se debe aplicar un criterio de falla específico y compatible. Los materiales granulares como la arena, presentan falla de corte, mientras que en materiales blandos como arcillas el mecanismo que domina es la compactación plástica. Los siguientes mecanismos de falla pueden causar problemas de inestabilidad del pozo, cerca del pozo:

- Falla de corte sin deformación plástica apreciable, como una ruptura.
- Deformación plástica y compactación, lo cual puede causar colapso poral.
- Falla de tensión, causando que la formación se quiebre.
- Falla de cohesión, equivalente a erosión, que puede causar migración de finos y producción de arena.
- Fluencia, que puede causar un agujero apretado durante la perforación
- Colapso de poro, que puede causar falla compresiva de la infraestructura del marco de la matriz y que puede ocurrir durante el último período de la producción.

Para predecir la falla de la roca, se han desarrollado muchos criterios empíricos. Esta condición es indispensable para entender la interpretación física de estos criterios antes de aplicarlos a los problemas asociados con la construcción del pozo. Debido a que estos criterios son empíricos, los ingenieros deben seleccionar cuidadosamente los apropiados para determinado problema. Generalmente los criterios son usados para generar envolventes, por lo general separando zonas estables e inestables. Aunque algunos ingenieros intentan linealizar la envolvente de falla, tal linealización es artificial. Los tres criterios que son útiles para pozo y fallas cerca del pozo son presentados a continuación.

2.3.1 Criterio de falla de Mohr-Coulomb

El criterio de falla de Mohr-Coulomb relaciona la resistencia al corte de las fuerzas de contacto y la fricción, y las conexiones físicas (cohesión) que existen entre los granos. Una aproximación lineal se da de la siguiente manera:

$$\tau = C + \sigma'_n \tan \phi \quad (2-33)$$

donde τ es el esfuerzo de corte. C es la fuerza cohesiva, ϕ es el ángulo de fricción interno y σ'_n es el esfuerzo normal efectivo que actúa sobre los granos. Los factores C y ϕ son coeficientes para la linealización y pueden ser determinados experimentalmente. Cuando se desea interpretar algún otro mecanismo de falla lo que se busca es una desviación de la línea recta la cual suele ser muy común, teniendo en cuenta que se toma como base únicamente en la falla de corte. Por lo tanto, este criterio se debe aplicar sólo bajo condiciones de validez. La envolvente de falla se determina a partir de varios círculos de Mohr. Cada círculo representa una prueba triaxial, donde se somete una muestra a confinamiento lateral ($\sigma_2 = \sigma_3$), y esfuerzo axial σ_1 que se incrementa hasta la falla. La envolvente de los círculos de Mohr representa la base de este criterio de falla.

A veces es más conveniente expresar la envolvente lineal de Mohr-Coulomb en términos de σ_1 y σ_3 . Esta expresión se convierte en:

$$\sigma'_1 = \frac{1+\sin \phi}{1-\sin \phi} \sigma'_3 + C_0 \quad (2-34)$$

$$C_0 = 2C \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) = 2C \frac{\cos \phi}{1-\sin \phi} \quad (2-35)$$

La ecuación 2-34 es también equivalente a:

$$\sigma'_1 = C_0 + \sigma'_3 \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2-36)$$

Una vez se determina la envolvente de falla, se puede realizar el análisis de estabilidad por cálculos de los esfuerzos normal y de corte para una situación dada suponiendo que el ángulo de corte es 45° .

$$\sigma'_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \alpha p_r \quad (2-37)$$

y

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2-38)$$

Estos puntos se trazan en la envolvente de falla, y entonces la estabilidad de la roca es evaluada con este criterio. Si la envolvente de falla muestra un comportamiento no lineal, el intento de linealización debe hacerse para el rango de esfuerzo para el que se aplica a un determinado problema.

2.3.2 Criterio de Hoek-Brown

El criterio de Hoek-Brown (Hoek y Brown, 1980) es también empírico y tiene mayor aplicación a yacimientos naturalmente fracturados. El criterio establece que:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sqrt{I_m C_0 \sigma_3' + I_s C_0^2} \quad (2-39)$$

donde I_m es el índice de fricción y I_s es el índice intacto. Ambos índices son función de las propiedades de los materiales. Este criterio encuentra razonablemente la falla frágil, pero da malos resultados en fallas dúctiles. Por lo tanto, este es usado para predecir fallas en formaciones naturalmente fracturadas. Los parámetros I_m , I_s y C_0 son medidos en el laboratorio. Para rocas débiles, I_m es menor que 0,1 y I_s es menor que 0,0001; sin embargo para rocas fuertes, I_m oscila de 5 a 15 y I_s es equivalente a 1.

2.3.3 Criterio de Drucker-Prager (Ampliado Von Mises)

El criterio de Drucker-Prager se basa en la suposición de que el esfuerzo cortante octaédrico alcanza un valor crítico:

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (2-40)$$

donde

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2] \quad (2-41)$$

y

$$I_1 = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 \quad (2-42)$$

que es el primer invariante de tensores de esfuerzo.

Los parámetros del material, α y K , están relacionados con los ángulos de fricción interno ϕ , y cohesión C , para condiciones lineales, de la siguiente manera

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (2-43)$$

y

$$K = \frac{6C \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (2-44)$$

Un gráfico de $\sqrt{J_2}$ vs I_1 en condiciones de falla que permite la evaluación de un problema relacionado con la falla de una roca. Este criterio se ajusta al nivel de esfuerzo más alto.

3. APLICACIONES RELACIONADAS CON LA MECÁNICA CERCA DEL POZO

3.1 Estabilidad del pozo durante la perforación

La mayoría de los problemas de estabilidad del pozo se producen en formaciones de shale. Desafortunadamente, las propiedades del shale pueden ser desde muy

suaves a muy rígidas, y desde muy laminadas a muy enteras. Diferentes mecanismos son los causantes de problemas de inestabilidad del pozo (Figura 9), siendo más destacables los efectos químicos y mecánicos, los cuales serán objeto de una discusión más ampliada a continuación.

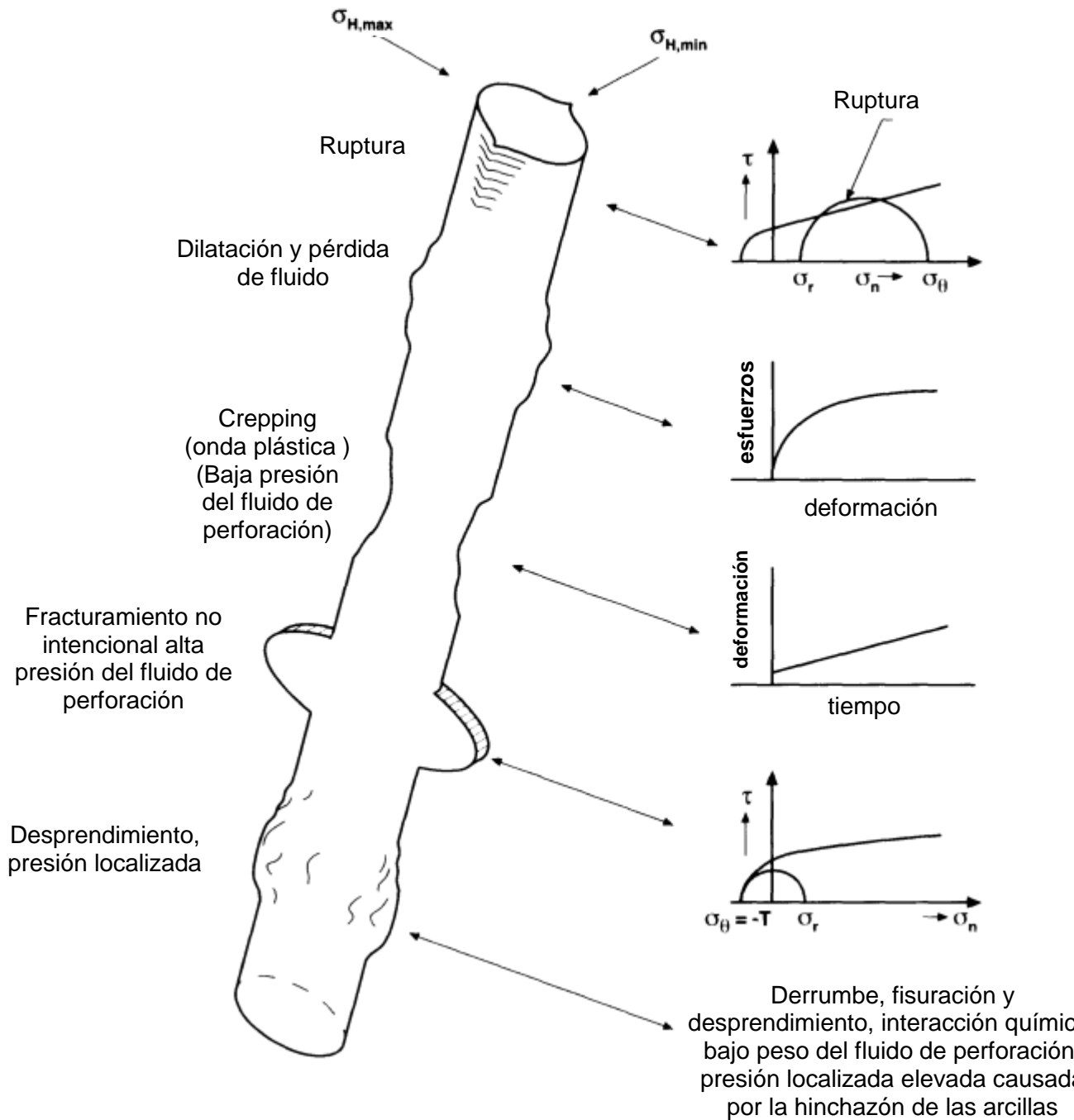


Figura 9. Posibles problemas de inestabilidad de pozo durante la perforación
Fuente: Modificado de Rock mechanics in wellbore construction, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

3.1.1 Efectos químicos

Arcillas de intercambio de iones, como illita, mica, esmectita, clorita, capa de arcillas mezcladas, y zeolitas, pueden causar muchos problemas de inestabilidad de pozo. Los ingenieros erróneamente pueden tratar el mecanismo de falla del modelo con modelos mecánicos analíticos o empíricos mientras que el principal mecanismo de falla puede ser debido a los efectos químicos. Los siguientes mecanismos de falla durante la construcción del pozo pueden estar relacionados a causas químicas.

3.1.1.1 Hinchazón de la arcilla (hidratación) y migración

La mayoría de las formaciones de shale contienen materiales arcillosos sensibles al agua, tales como esmectita, illita y capa de arcillas mezcladas, que absorben el agua que induce una elevada presión localizada. Esta presión reduce el esfuerzo efectivo alrededor de la cara del pozo, lo que hace a la matriz del shale hincharse, desintegrarse y colapsar (Dusseault y Gray, 1992). Mody y Hale (1993) desarrollaron un modelo que incorpora efectos mecánicos y químicos para evaluar el fluido de perforación en la estabilidad del shale.

3.1.1.2 Intercambio de iones

Salmueras como KCl pueden controlar el hinchamiento de las arcillas, pero las illitas, cloritas, esmectitas y capas de arcillas mezcladas pueden cambiar la salmuera a través de mecanismos de intercambio iónico y generando un hinchamiento posterior.

3.1.1.3 Deterioramiento de la cementación

Al examinar las formaciones de arena, los ingenieros deben estudiar el grado y el tipo de cimentación. El análisis mineralógico, petrografía en una sección delgada,

y la compatibilidad líquida, son métodos viables de pruebas para evaluar la producción de arena.

3.1.1.4 Daños cerca de la cara del pozo

El daño de formación cerca de la cara del pozo puede ocurrir debido a los depósitos de parafina, depósitos de escamas, migración de finos causada por caolinita y arcillas alita, precipitación de asfáltenos, producción de arena, incluso emulsiones formadas a partir de fluidos de fracturamiento durante la estimulación.

Para vencer estos efectos químicos, los ingenieros deben seleccionar el tipo de sistema del fluido de perforación en función de su efecto sobre la fuerza de la formación. Los efectos de las propiedades químicas y físicas del sistema del fluido de perforación en la estabilidad de la formación deben ser globales y el sistema del fluido de perforación debe ser evaluado sobre la base del mecanismo de roca.

3.1.2 Efectos mecánicos

Estos efectos se reducen al análisis de los mecanismos de tensión y falla de corte que deben ser considerados para la evaluación de la estabilidad del pozo durante la perforación.

3.1.2.1 Falla de Tensión

El esfuerzo efectivo en el pozo supera la fuerza de tensión de la formación y causa falla de tensión. Por lo tanto, una fractura inducida se puede producir debido a la pérdida del fluido de perforación si:

$$p_w \geq p_r + \sigma'_{\theta\theta} + T \quad (3-1)$$

Para un medio elástico, esta relación viene dada por Haimson y Fairhurst, 1967:

$$p_w = 3\sigma'_{H,min} - \sigma'_{H,max} + T + p_r \quad (3-2)$$

Sin embargo, si existe una fractura natural, entonces la fuerza de tensión, T , debe asumirse que es cero.

3.1.2.2 Falla de corte

Una vez que se perfora un pozo y se establece un campo de concentración de esfuerzos, la roca soportará el campo de esfuerzos hasta el límite de elasticidad, lo que da como resultado una zona de ruptura cerca del pozo que causa desprendimientos, desmoronamientos y la ampliación del tamaño del agujero. Como se expuso en capítulo 2, se debe usar un criterio de falla apropiado para la evaluación de este tipo de falla.

3.1.2.3 Peso del fluido de perforación

El peso del fluido de perforación se debe calcular como medio para prevenir el inicio de las fallas de tensión y corte. En algunas formaciones, el peso del fluido de perforación debe prevenir la fluencia en formaciones viscoplásticas. El peso del fluido de perforación también representa una consideración importante para el tratamiento de problemas de inestabilidad del pozo. Este se encuentra limitado por dos fronteras:

- La frontera superior es la presión que provoca una falla de tensión y pérdida de fluido de perforación. Esta presión puede ser determinada en campo basándose en la ecuación 3-1.

- La frontera inferior es la presión requerida para proporcionar esfuerzo de confinamiento, que se elimina durante la perforación. El esfuerzo de confinamiento evita la falla de corte, la creación de una zona plástica y deformación progresiva.

La frontera superior es estimada a partir de un campo de esfuerzos en sitio, y la fuerza de tensión es medida en laboratorio. Mientras que el límite inferior se estima a partir del campo de esfuerzos in-situ, las propiedades mecánicas de la formación son estimadas a partir de uno de los criterios descritos en la sección 2.2 que mejor modele una formación dada. El criterio de falla de Mohr-Coulomb, puede ser usado para determinar el peso de lodo de perforación necesario para evitar una falla de corte (Ecuación 2-34).

Cerca del pozo, el esfuerzo σ'_3 puede ser representando como σ'_{rr} tal como está en la ecuación 2-17.

Sin embargo, el término σ'_1 puede ser representado por el esfuerzo tangencial $\sigma'_{\theta\theta}$ que es descrito por la ecuación 2-20 y 2-21. De las dos ecuaciones, la 2-21 representa el punto en el pozo que estará expuesto al estrés más tangencial. Este esfuerzo debe ser considerado para calcular el peso del fluido de perforación. Por lo tanto el término σ'_1 esta dado por:

$$\sigma'_1 = 3\sigma'_{H,max} - \sigma'_{H,min} \quad (3-3)$$

Mediante la sustitución de estos resultados en la ecuación 2-34 se obtiene:

$$3\sigma'_{H,max} - \sigma'_{H,min} = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} (p_w - p_r) + C_0 \quad (3-4)$$

o

$$p_w = \frac{3\sigma'_{H,max} - \sigma'_{H,min} - C_0}{\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}} + p_r \quad (3-5)$$

Si se asume que: $\sigma'_{H,max} = \sigma'_{H,min} = \sigma$, entonces:

$$p_w = \frac{2\sigma' - C_0}{\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}} + p_r \quad (3-6)$$

El peso del fluido de perforación debe ser calculado en base a p_w tal como está dado en la ecuación 3-5 ó 3-6.

Un modelo diferente puede ser utilizado con base en el radio de la zona plástica creada como resultado de la perforación del pozo, dada por la ecuación 2-26. Para prevenir la generación de la zona plástica, r_{pl} debe ser igual r_w . Sustituyendo esta condición en la ecuación 2-26, se obtiene:

$$2\sigma' - C_0 = \left(1 + \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}\right)(p_w - p_r) \quad (3-7)$$

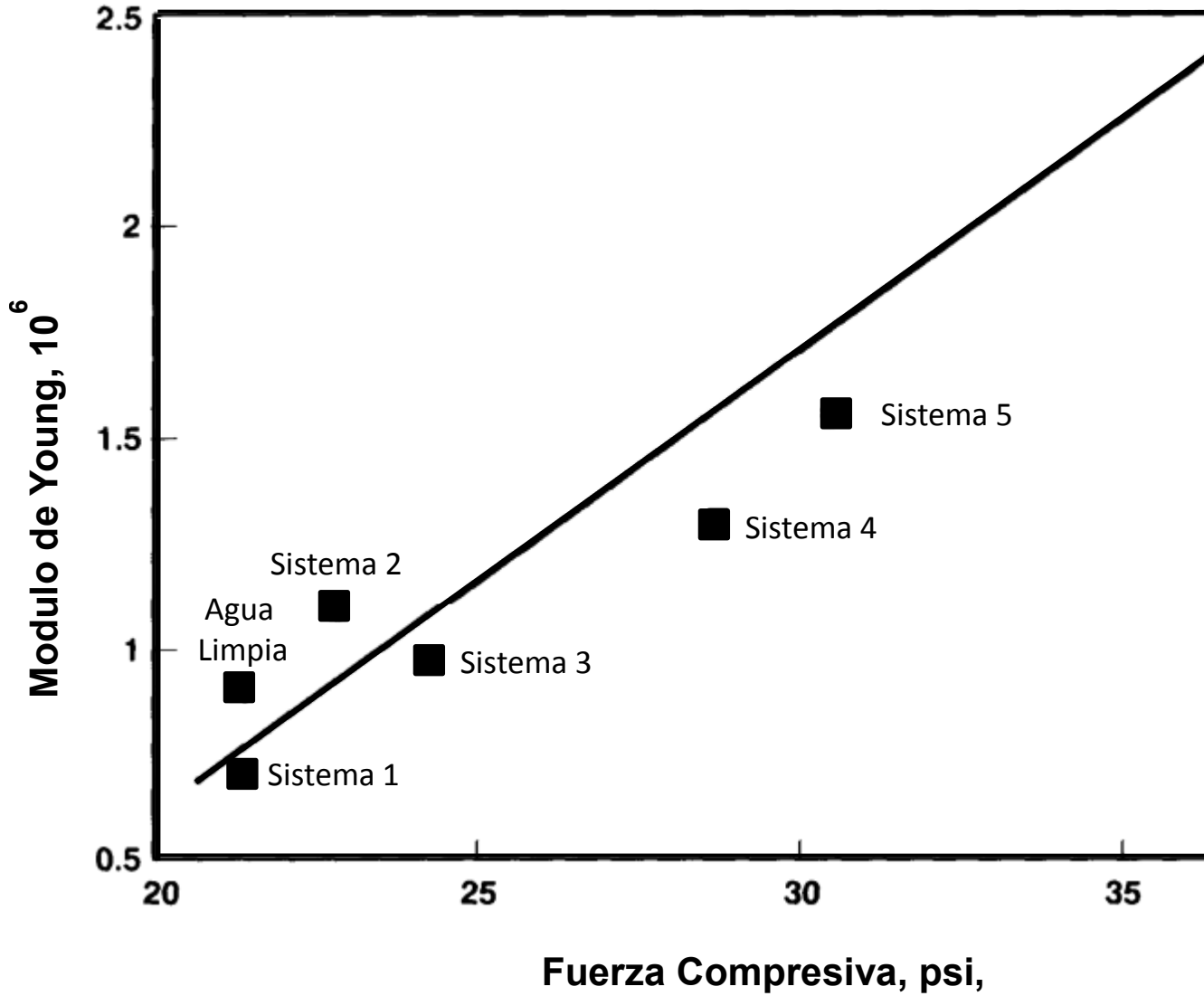


Figura 10. El efecto de diferentes sistemas de fluidos de perforación en las propiedades mecánicas en muestras de shale.

Fuente: Modificado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

Entonces,

$$p_w = \frac{2\sigma' - C_0}{\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}} + p_r \quad (3-8)$$

El peso del fluido de perforación debe ser determinado basado en p_w . Una comparación de las ecuaciones 3-6 y 3-8 sugiere que los modelos proporcionan resultados diferentes para el peso del fluido de perforación.

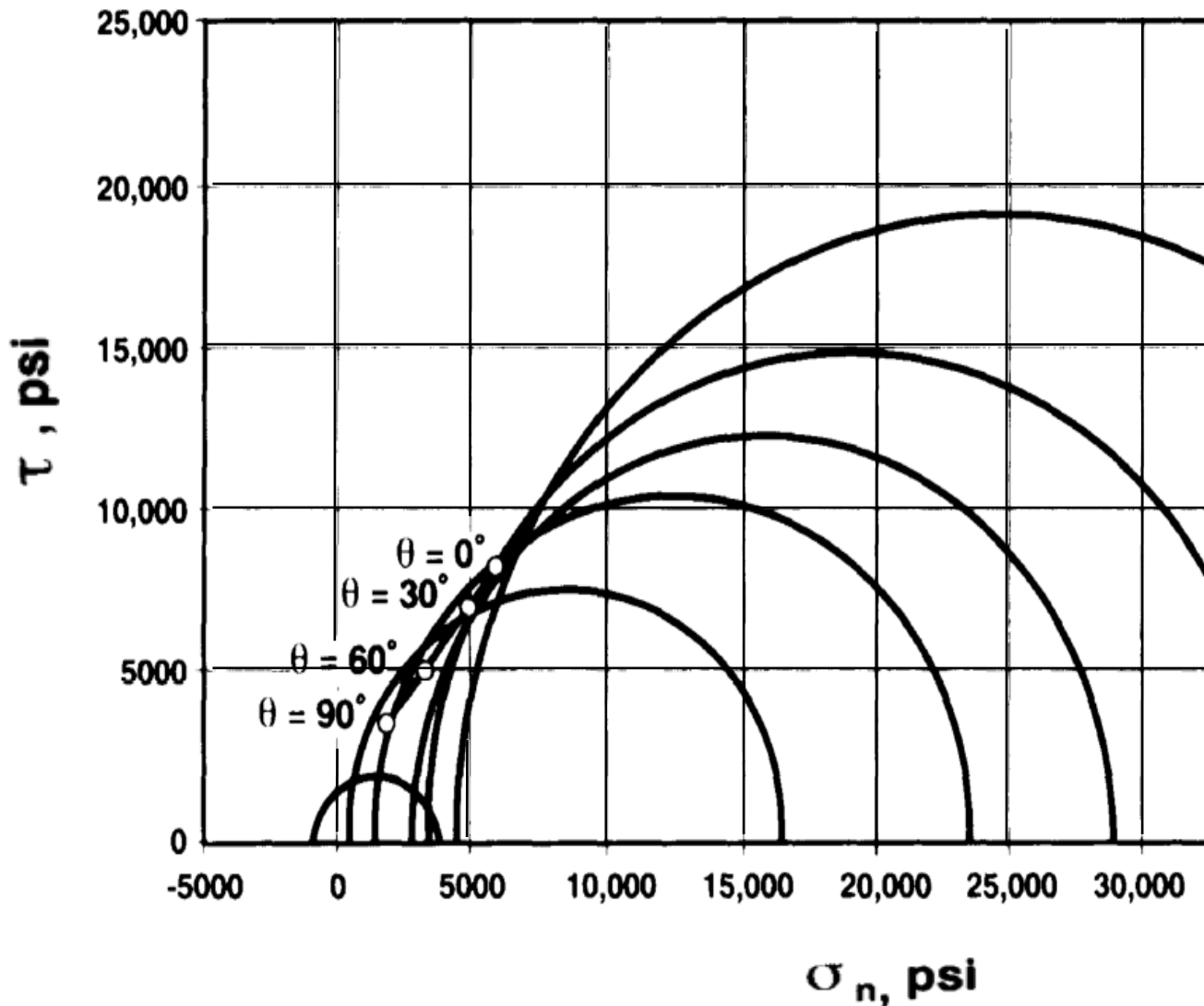


Figura 11. Evaluación gráfica de la estabilidad de pozo usando una envolvente de falla dada. Se observa un hueco estable, pero cerca de la frontera estable/ inestable.

Fuente: Modificado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

La Figura 11 muestra que todos los puntos están dentro de la región estable de la envolvente de falla, pero están cerca de la frontera. Si se va a evaluar un pozo desviado o uno horizontal, entonces el campo de esfuerzos alrededor de la cara de pozo debe ser calculado basado en la transformación de los esfuerzos principales en las zonas principales del pozo.

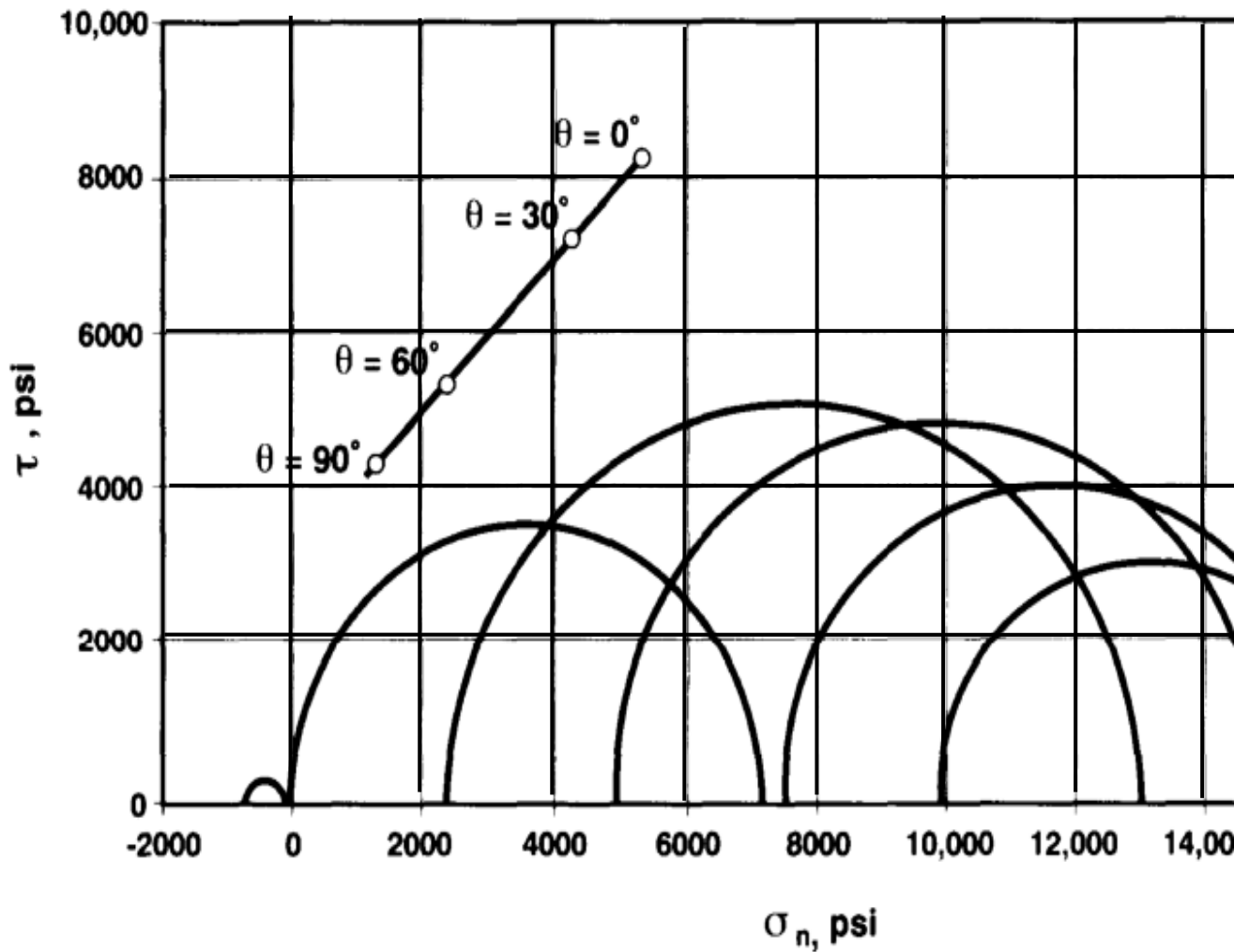


Figura 12. Evaluación gráfica de la estabilidad de pozo con una envolvente de falla dada. Se observa que el pozo muestra problemas de inestabilidad en todas las direcciones alrededor de la cara del pozo.

Fuente: Modificado de Rock mechanics in wellbore construction, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

3.2 Perforaciones

En las perforaciones el cementado y el entubado son la manera tradicional de que el pozo se comunique con el yacimiento. Cuando las perforaciones son buenas y están limpias, permiten bastante producción sin obstáculos con reducción razonable en la producción de arena. La investigación en esta área vital de la construcción del pozo tiene resultados en las siguientes prácticas de la industria, a pesar de la efectividad de algunas prácticas es aún discutible:

- El uso de tecnologías limpias y de bajo contenido de sólidos, compatible con fluidos de completamiento.
- El uso de perforaciones bajo balance de presión, tales como 500 psi en pozos de aceite y 1500 psi en pozos de gas.
- La utilización de pequeñas cargas para minimizar el efecto de la zona compactada alrededor del túnel perforado lo que puede reducir la permeabilidad original tanto como un factor de 10 o más

McLeod (1982) mostró que el daño causado por la zona compactada puede ser muy grande. El diseño de perforación debe ser evaluado en base a lo que se espera del completamiento del pozo y la actividad de simulación (Morita y McLeod 1994). Los propósitos de la perforación se enumeran a continuación:

- Como un método de completamiento sólo o con la intención de la estimulación de la matriz
- Como una práctica que tiene la intención de realizar empaquetamiento
- Como un mecanismo de apoyo al fracturamiento hidráulico

3.2.1 Perforaciones orientadas al fracturamiento hidráulico

Trabajos experimentales y teóricos indican que las orientaciones de las perforaciones deben ser diseñadas para eliminar problemas de fracturamiento en pozos verticales y desviados (Morita y McLeod, 1994; Bermann y Elbel, 1991; Abass y otros, 1994; Venditto y otros, 1993). Para un tratamiento de fracturamiento hidráulico con éxito, la perforación debe estar en orden con la dirección de la fractura prevista (la dirección del esfuerzo máximo horizontal). Estas condiciones serán:

- Obtener máximo ancho de la fractura cerca del pozo
- Crear una fractura simple
- Reducir la presión de ruptura y propagación

La figura 13 presenta resultados experimentales que muestra un sistema de fracturas complejas en el que las perforaciones son orientadas dentro de ciertos ángulos de la dirección de la fractura (Abass y otros, 1994). El estudio experimental se llevó a cabo para estudiar los efectos de perforaciones orientadas a los lados de altos y bajos del pozo horizontal en la dirección de la fractura prevista.

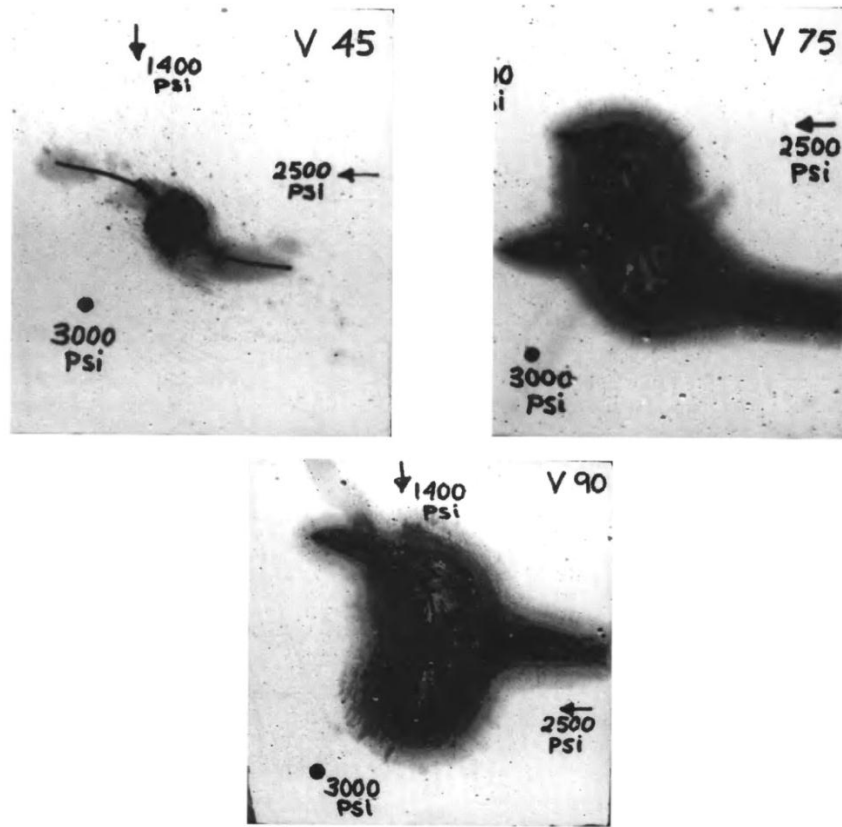


Figura 13. Geometría de fractura cerca de la cara del pozo como función la orientación de la perforación relativa a la dirección de los esfuerzos en sitio.

Fuente: Tomado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

La figura 14 muestra para ángulos de perforación de 0° , 15° y 30° , siendo el promedio de presión de ruptura de 3200 psi; esta presión se incrementa constantemente para ángulos mayores de 30° . Adicionalmente, este experimento mostró que el ancho de fractura es una función de la orientación de la perforación. Esta figura sugiere que el ajuste de perforación óptimo es 60° (equivalente a un máximo de 30° de la desviación de la dirección de la fractura) o menos, en la que la presión de ruptura es mínima.

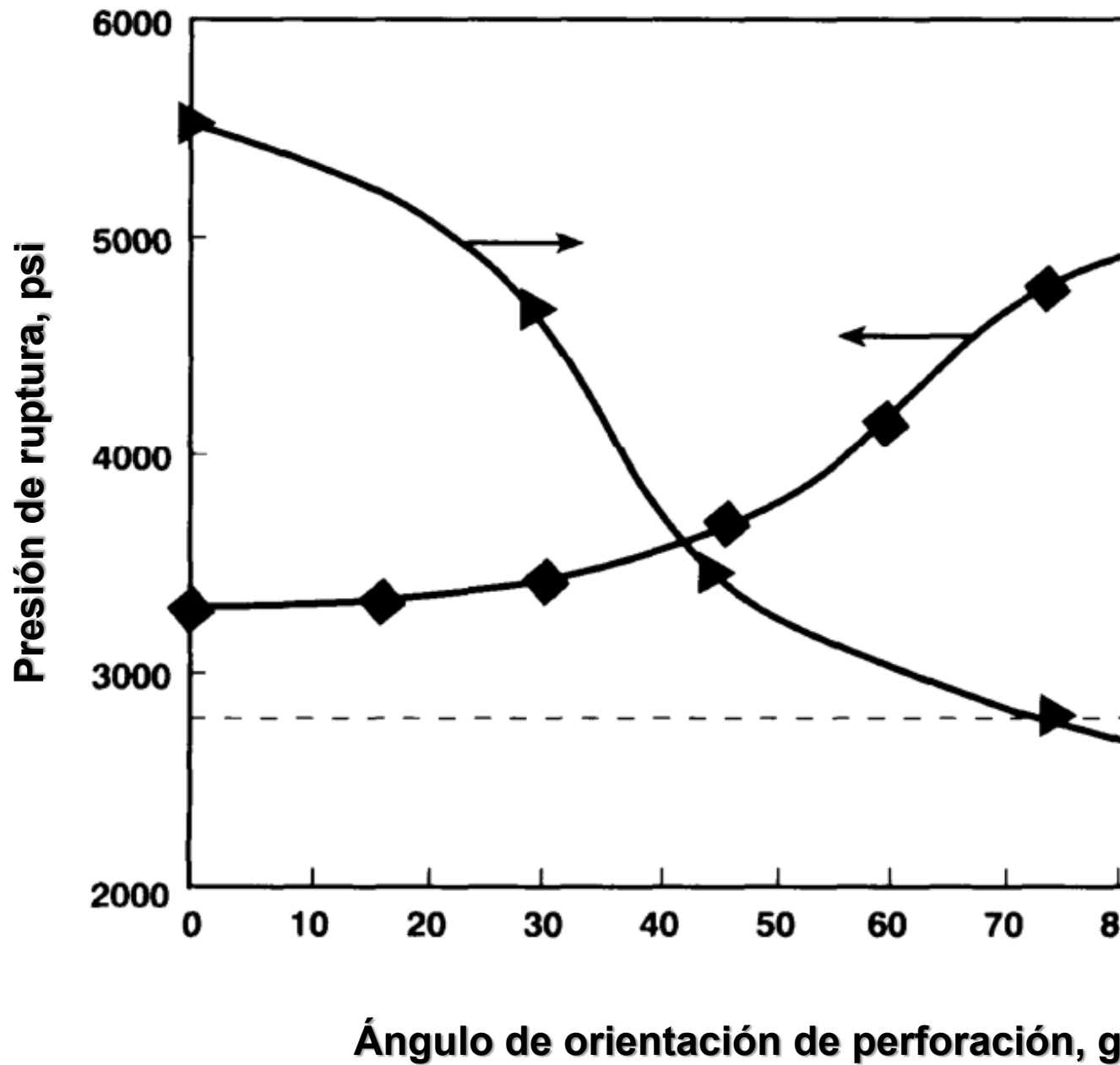


Figura 14. Representación del ancho de fractura y presión de iniciación de fractura como función de la orientación de la perforación relativa a la dirección de los esfuerzos en sitio.

Fuente: Modificado de Rock mechanics in wellbore construction, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

3.2.2 Perforaciones orientadas para control de arena

Un pozo circular en una formación rocosa crea un nuevo campo de esfuerzos alrededor de la cara del pozo, lo que causa una falla orientada (ruptura) o colapso total. Las perforaciones orientadas pueden ser usadas para rupturas o formaciones no consolidadas.

Formaciones Consolidadas

Si existe ruptura en una formación consolidada, se recomiendan los siguientes pasos (Figura 15):

- El área cerca de la cara del pozo debe ser consolidada con un material de resina líquido que se inyecta en la zona productiva.
- Porque la ruptura es orientada en la dirección del esfuerzo horizontal mínimo 180° , el ajuste debe ser realizado en la dirección del esfuerzo horizontal máximo.
- Una fractura hidráulica usando un diseño *frackpack* debe ser realizada.

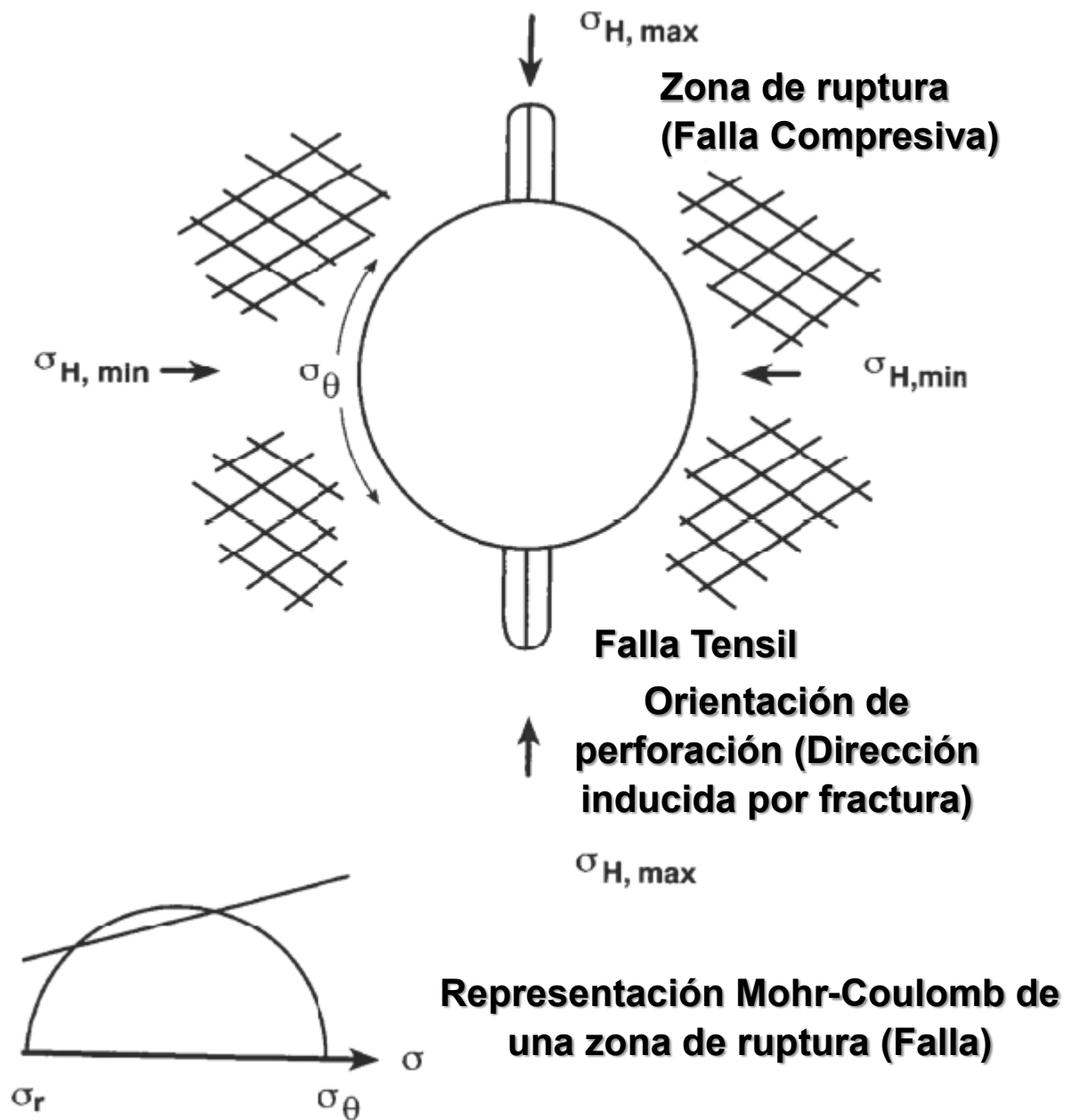


Figura 15. Perforación orientada para control de arena, donde la región de ruptura está menos afectada

Fuente: Modificado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

Formaciones no Consolidadas

Los experimentos demostraron que un pozo no debe ser perforado a través de una formación no consolidada porque crearía un campo de esfuerzos concentrados alrededor de la cara del pozo. EL hidrocarburo puede ser producido a través de fracturamiento hidráulico, ya sea en un pozo vertical o en un pozo horizontal. En este caso, la perforación se puede orientar en el lado inferior (Figura 16). Basándose en los mecanismos de propagación de la fractura, la fractura tendrá dos flancos en las formaciones homogéneas, incluso si se ve obligada a propagarse en una dirección. (Figura 17).

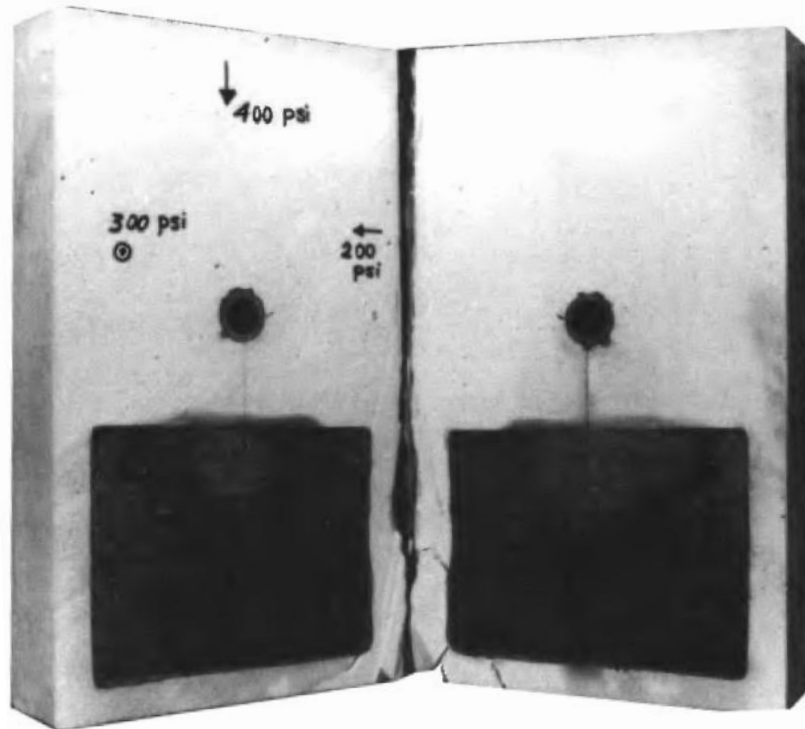


Figura 16. Demostración experimental de la perforación en la capa límite y el uso de la perforación orientada y la fractura al comunicarse con areniscas poco consolidadas
Fuente: Tomado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

La figura 17 demuestra este concepto, donde un pozo horizontal es perforado en una formación homogénea con cero ajustes de perforaciones en la parte inferior

del pozo. En este caso, se inicia una fractura y se crean dos flancos. Sin embargo cuando un flanco de la fractura encuentre un medio con menor resistencia a la fractura de propagación (resistencia a la fractura menor), el flanco superior de la fractura se detiene y el inferior continúa propagándose.

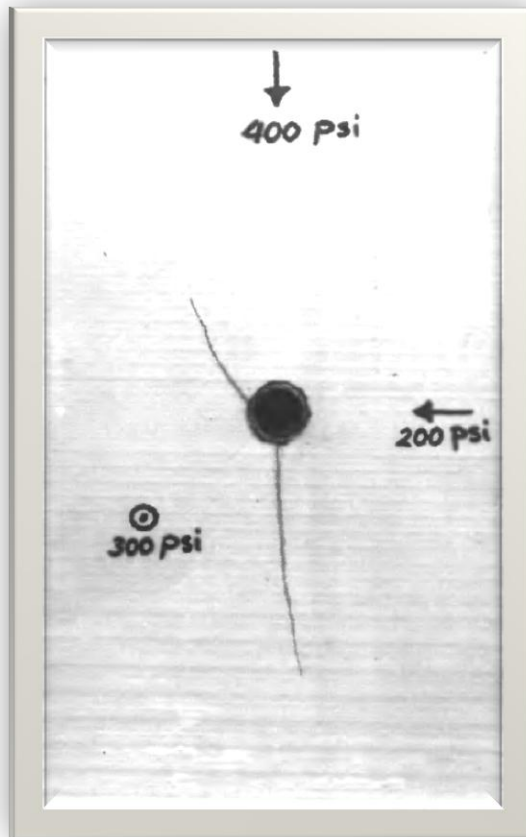


Figura 17. Propagación de fractura de dos flancos de una perforación
Fuente: Tomado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda;
2003

3.3 Fracturamiento hidráulico

En esta sección solo se discutirán los aspectos mecánicos de la roca en el fracturamiento hidráulico cerca de la cara del pozo.

3.3.1 Iniciación de fractura y presión de ruptura

Inicia la fractura en el pozo como resultado de la falla de tensión donde el esfuerzo tangencial en cualquier punto alrededor del pozo se convierte en tensión (negativo) e igual a la fuerza de tensión de la formación, T .

$$\sigma_{\theta\theta} = -T \quad (3-9)$$

La presión de ruptura, p_{bd} es dada por Hubbert y Willin (1957):

$$p_{bd} = 3\sigma_{H,min} - \sigma_{H,max} + T - p_r \quad (3-10)$$

La presión de propagación de la fractura está dada por:

$$p_f = \sigma_{H,min} + \Delta p_{net} + \Delta p_f + \Delta p_{tip} \quad (3-11)$$

La presión de fricción Δp_f , puede estar dividida en muchos términos de perforación cerca de la cara del pozo, y geometría de la fractura, que determinará si la presión de fractura se reducirá o aumentará con el tiempo.

Si se asume que la fractura deja de propagarse después del cierre, entonces la presión de cierre instantáneo ISIP, es:

$$ISIP = \sigma_{H,min} + \Delta p_{net}; \text{ por lo tanto,}$$

$$p_f = ISIP + \Delta p_f + \Delta p_{tip} \quad (3-12)$$

La presión neta Δp_{net} , corresponde a la presión para mantener la fractura abierta con un ancho de fractura dado. Esta presión puede cambiar todo el trabajo, especialmente en tratamientos de arenamiento. EL gradiente de fractura es simplemente la ISIP dividido por la profundidad.

El término Δp_{tip} es la caída de presión necesaria para propagar la fractura, que es una función de la resistencia a la fractura.

La resistencia a la fractura puede ser estimada de la siguiente ecuación para una fractura circular (Shlyapobersky y otros, 1998):

$$K_{IC} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \Delta p \sqrt{R} \quad (3-13)$$

donde R es el radio de la fractura.

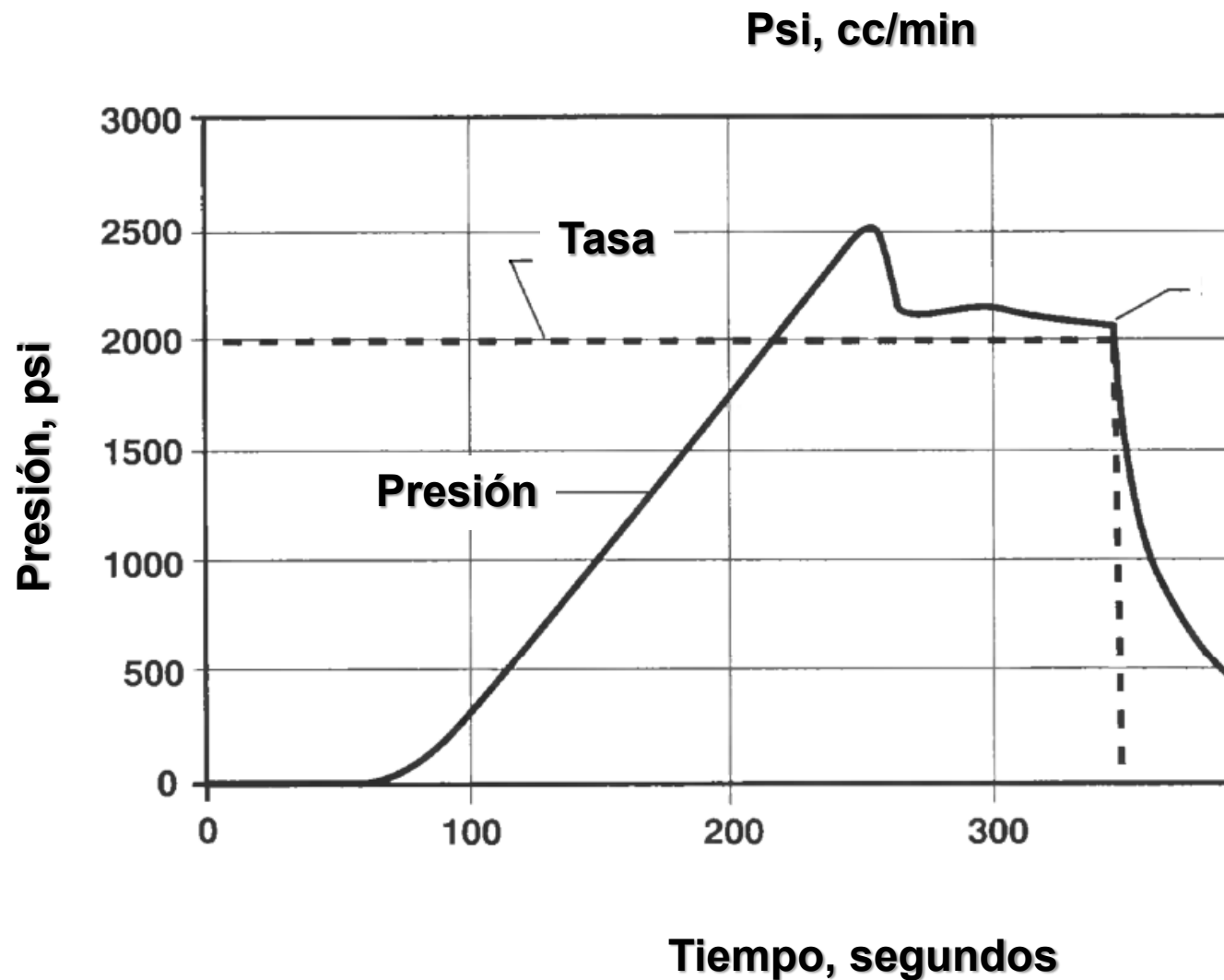


Figura 18. Resultados experimentales de fracturamiento de un bloque de roca en un pozo vertical

Fuente: Modificado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

3.3.2 Doble presión de cierre después del cierre

El Doble cierre de esfuerzos es uno de los fenómenos observables en campo durante el fracturamiento de pozos verticales en que las capas horizontales (Warpinski y otros 1985). Los autores presentaron una explicación válida que durante el cierre la zona con mayor esfuerzo se cierra primero, seguida por otro

cierre de la zona con menor esfuerzo. EL doble cierre de presión también se ha observado en el laboratorio durante el fracturamiento de muestras que contienen los pozos horizontales (Abass y otros 1996). La figura 1-18 muestra un análisis microfrac de una prueba de laboratorio donde dos esfuerzos de cierre son observados: 1800 psi y 1430 psi. Si este fenómeno se observa en el campo y el pozo es desviado o horizontal, esto indica geometría de fractura no plana cerca de la cara del pozo, por lo tanto el segundo cierre deberá ser usado para estimar el esfuerzo horizontal mínimo.

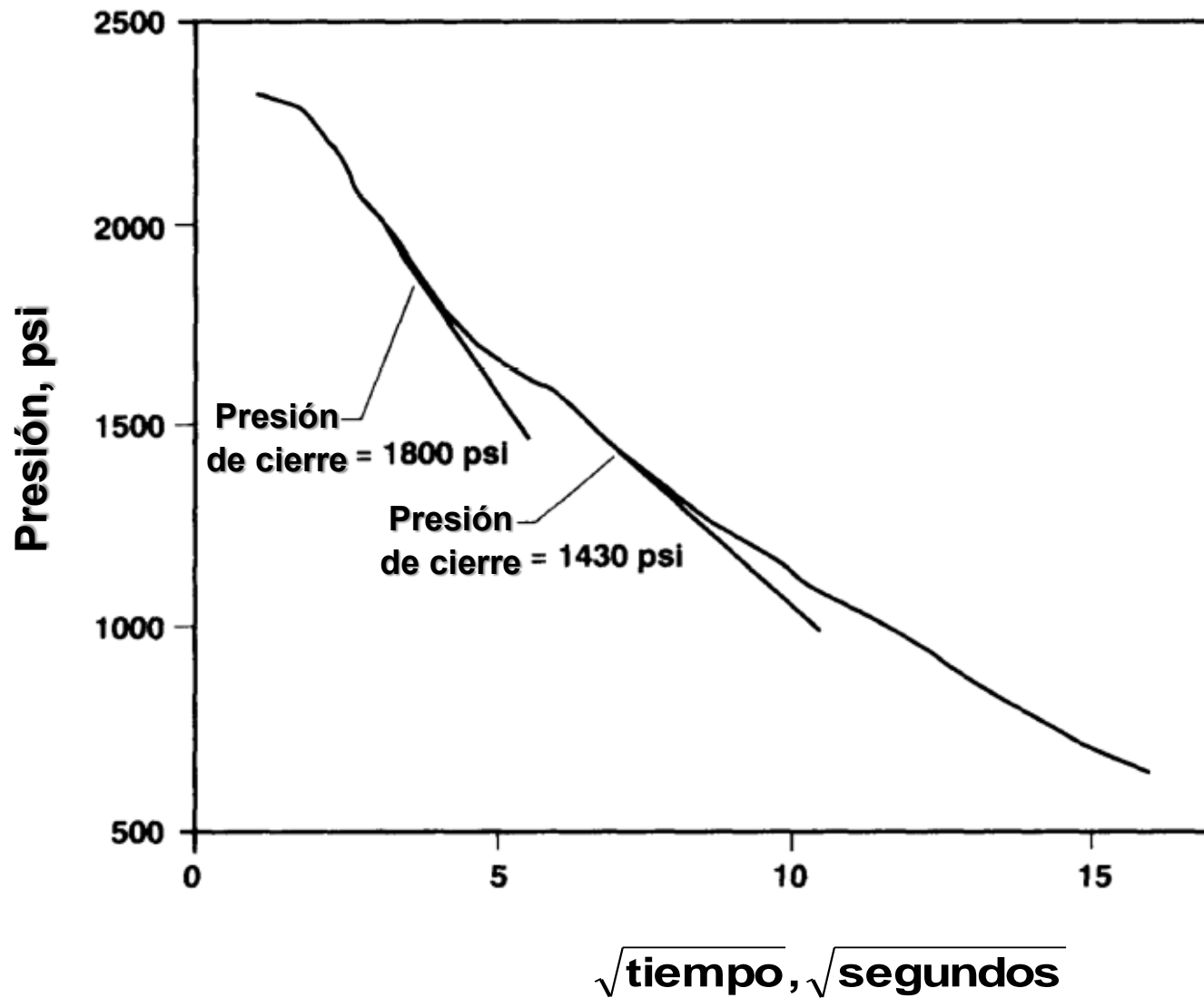


Figura 19. Doble cierre de presión observado en fracturamiento de pozos horizontales
Fuente: Modificado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

3.3.3 Comportamiento no lineal de esfuerzo-deformación en fracturamiento

Las ecuaciones generales para calcular el ancho de fractura en el pozo para diferentes modelos están dadas por:

$$w_{max} = \frac{2(1-\nu^2)(p_f - \sigma_{H,min})}{E} \begin{bmatrix} 2x_f \\ h_f \\ 4R/\pi \end{bmatrix} \begin{matrix} KGD \\ PKN \\ Radial \end{matrix} \quad (3-14)$$

Para comportamiento no lineal, que se produce en el carbón y las arenas poco consolidadas, las propiedades mecánicas cambian con la presión. Para rangos pequeños de presión, estos cambios no son importantes. Sin embargo para rangos de presión grandes, que ocurre en diseños de arenamiento, la cuestión del cambio de presión es significativa. Una solución numérica puede ser adoptada para incluir el comportamiento no lineal:

$$w_{max} = 2(1 - \nu^2) \begin{bmatrix} 2x_f \\ h_f \\ 4R/\pi \end{bmatrix} \left[\sum \frac{\Delta p}{E} \right] \begin{matrix} KGD \\ PKN \\ Radial \end{matrix} \quad (3-15)$$

3.4 Producción de arena

Cuando un pozo es perforado en formaciones poco consolidadas, se establece alrededor de la cara del pozo una condición de no confinamiento que crea una zona plástica que puede crecer con el tiempo. Cuando el pozo es entubado y cementado, el confinamiento se restaura, pero la zona plástica no es reversible. Por lo tanto cuando las perforaciones se introducen en la formación, la zona plástica está expuesta a condiciones de no confinamiento nuevamente. Cuando se toma en cuenta el problema de la formación de la producción de sólidos, se debe diferenciar entre la producción de arena y finos.

- La migración de finos (movilización de minerales de la arcilla, cuarzo, mica, carbonato, etc.) resulta de las fuerzas de arrastre y la incompatibilidad de los fluidos de completamiento. Si los finos están siendo producidos, no debe ser detenidos por las técnicas de *screening*, tal como el empaquetamiento. Los finos deben producirse para evitar la caída de la permeabilidad.

- La migración de arena es un resultado de efectos mecánicos y químicos que pueden ser eliminados por varias técnicas que serán tratadas a continuación.

3.4.1 Efectos mecánicos

3.4.1.1 Fallas de corte y tensión

Perkis y Weingarten (1988) aplicaron el criterio de Mohr Coulomb para predecir la reducción de presión cerca de la cara del pozo, lo que desencadena producción de arena:

$$\Delta p = \frac{C(1+3 \sin \alpha)}{\tan \alpha(1-3 \sin \alpha)} \quad (3-16)$$

donde α puede ser obtenido de la ecuación 1-42.

Esta ecuación se basa en la suposición que un arco de arena se desarrolla alrededor de una perforación. La ecuación que rige el esfuerzo para mantener el hueco estable es:

$$\frac{d\sigma_{rr}}{dr} = \frac{2(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})}{r} = 0 \quad (3-17)$$

Bratli y Risnes (1981) presentaron la siguiente ecuación para flujo esférico alrededor de cada perforación, basada en la suposición que la caída de presión es la misma para todas las perforaciones:

$$\Delta p = 2C \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad (3-18)$$

donde

$$C_0 = 2C \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad (3-19)$$

entonces $\Delta p = C_0$ para flujo radial y $\Delta p = 2C_0$ para flujo esférico.

3.4.1.2 Falla Cohesiva

Una falla cohesiva es realmente un efecto erosivo que elimina las partículas individuales resultantes de flujo a través de los huecos de perforación. Si la fuerza de arrastre generada por la velocidad del fluido supera la fuerza de cohesión del material rocoso, se produce la erosión y la arena se produce. Si se considera un hueco de perforación de con radio r_p , el esfuerzo de corte a través de la superficie interna puede ser calculado como:

$$\tau = r_p \frac{dp}{l} \quad (3-20)$$

Por lo tanto,

$$r_p \frac{dp}{dl} = C \quad (3-21)$$

El lado derecho de la ecuación 1-66 se conoce como el flujo en el medio poroso o en el hueco de perforación. La ecuación 1-66 establece una relación para el inicio de la producción de arena.

3.4.1.3 Reducción crítica para la producción de arena

Con base en la mecánica de rocas, se puede asumir que la formación es estable alrededor de la cara del pozo (un círculo estático) antes de la perforación (Figura 20). Cuando el pozo es puesto en producción, se establece un diferencial de presión (Δp). Con base en las ecuaciones 2-14 y 2-15, el diferencial de presión aumenta el esfuerzo tangencial, mientras que disminuye la magnitud del esfuerzo radial. Por lo tanto el centro del círculo de Mohr permanece estacionario, pero el radio crece. Si la caída de presión es lo suficientemente alta para una envolvente

de falla de una formación determinada, el nuevo círculo puede tocar el nuevo círculo de falla. La caída de presión se muestra en la figura 20 representa la caída de presión máxima de seguridad para la formación, y esta presión puede ser determinada para un yacimiento dado.

Esta envolvente de falla es frecuentemente no lineal. Por lo tanto sólo la parte de la envolvente de falla correspondiente a la condición de esfuerzo en sitio se debe utilizar para la evaluación de falla. La figura 20 por ejemplo muestra que 2 aproximaciones lineales pueden ser obtenidas para diferentes niveles de esfuerzo. La línea inicial es afectada por el círculo de fuerza de tensión y el círculo de fuerza uniaxial. Esto es artificial para incluir el círculo de tensión dentro del criterio de falla, y por lo tanto esto no debe ser considerado en la construcción de la envolvente de falla.

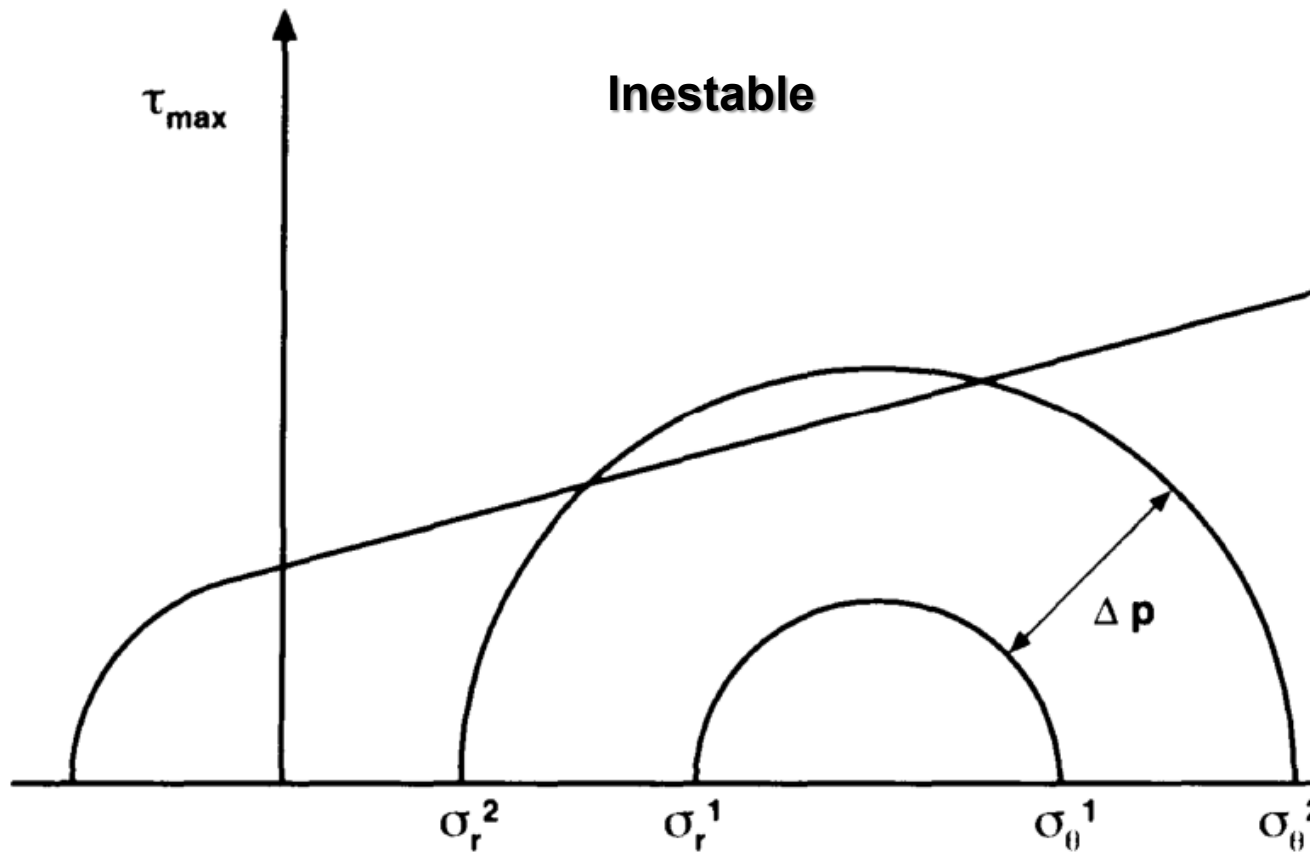


Figura 20. Representación mecánica de la caída de presión crítica que desencadena producción de arena

Fuente: Modificado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

3.5 Fracpacks

Desde el punto de vista de mecánica de rocas, los fracpacks ayudan a reducir la caída de presión cerca de la cara del pozo, que a su vez reduce o evita la falla de cohesión (erosión) y la falla de tensión. Una combinación fracpack/empaquetamiento puede controlar efectivamente la producción de arena en muchas áreas.

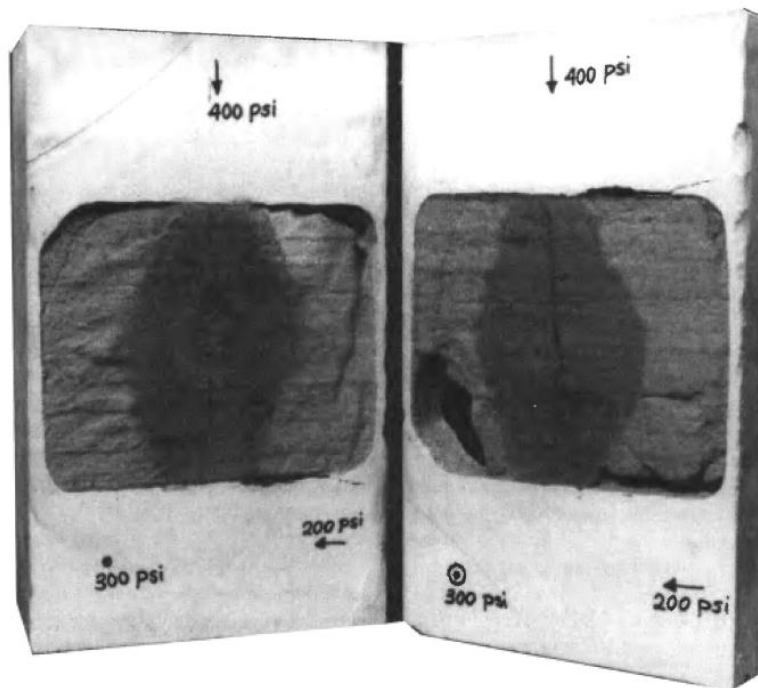


Figura 21. Demostración de laboratorio de de fracturamiento de formaciones de areniscas poco consolidadas

Fuente: Modificado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

La figura 21 muestra un experimento de fracturamiento hidráulico en una muestra de un afloramiento poco consolidado que tiene un modulo de Young de 377,000 psi y una fuerza compresiva de 1037 psi. Esta figura muestra que una formación poco consolidada puede ser fracturada al igual que cualquier formación convencional. La longitud de la fractura debe ser optimizada para reducir la caída de presión severa cerca de la cara del pozo. (Abass y otros 1994; Fletcher y otros 1995).

3.6 Efectos químicos

El marco de un material granular de areniscas y el tipo de cementación natural son características inherentes que ayudan a mantener la estabilidad; perforando un pozo en la formación y introduciendo fluidos exteriores alterando esta estabilidad natural. Los análisis mineralógicos de la mayoría de formaciones de arena revelan cuarzo, feldespato, carbonato (como dolomita), y la arcilla (como clorita, esmectita). Los materiales de cementación, tales como el cuarzo, dolomita y clorita dan estabilidad a una formación determinada y por lo tanto se debe mantener durante la perforación, el completamiento y la estimulación de las fases.

Yale y otros (1995) estudiaron los efectos de la cementación entre las diferentes propiedades mecánicas estáticas y dinámicas. El hallazgo más interesante es la relación entre el grado de no linealidad y la relación estática y dinámica de las propiedades mecánicas. En otras palabras el tipo de control de la cementación depende si la muestra tiene comportamiento elástico lineal, elástico no lineal elastoplástico, durante la carga y la descarga. Dado que una formación está expuesta a muchos ciclos de carga y de descarga durante la fase de construcción del pozo, el estudio de las características de carga y descarga de una formación es importante. Para el control de arena las siguientes técnicas pueden ser usadas individualmente o en combinación dependiendo del mecanismo de falla:

- Un pozo horizontal en la capa límite y una fractura de la formación
- Perforaciones orientadas en la dirección del esfuerzo horizontal máximo
- Fracpack y/o empaquetamiento
- Fracpack con arena recubierta con resina
- Consolidación durante la perforación
- Consolidación y fracpack

3.7 Mediciones de esfuerzos en sitio

Los esfuerzos en sitio y las propiedades mecánicas de la formación son cruciales para la evaluación de muchos problemas asociados con la construcción del pozo. Varios métodos están disponibles para medir la magnitud y dirección de los esfuerzos en sitio, y varios deben ser realizados y comparados de manera que sean determinados resultados razonables (Daneshy y otros 1986).

3.7.1 Prueba Microfrac

Durante la prueba microfrac, de 1 a 2 barriles de fluido de fracturamiento o fluido de perforación es inyectado en un intervalo pequeño y aislado del pozo (Soliman, 1993). El dato de caída de presión que se producen después de la inyección es usado para analizar la magnitud de $\sigma_{H,min}$. Un núcleo de orientación de la parte inferior del pozo debe ser recuperado después de la prueba de microfrac. La dirección de la fractura es observada de este núcleo de orientación, con la dirección de $\sigma_{H,min}$ que es perpendicular a la orientación de la fractura. Para confirmar esta dirección una deformación de recuperación inelástica se puede realizar en una porción no fracturada de un núcleo recuperado.

Aunque no se recomienda, también se puede realizar una prueba microfrac en pozos desviados o horizontales. Un análisis inicial indica que la magnitud de $\sigma_{H,min}$ puede ser sobrestimado en tales pozos; un mayor volumen de fluido de fracturamiento puede tener que ser inyectado (McLeod, 1982).

3.7.2 Información geológica

Consideraciones geológicas pueden proporcionar valiosa información cualitativa sobre el campo de esfuerzos. La figura 22 muestra como la estructura geológica puede ser usada para inferir en el campo de esfuerzos en sitio.

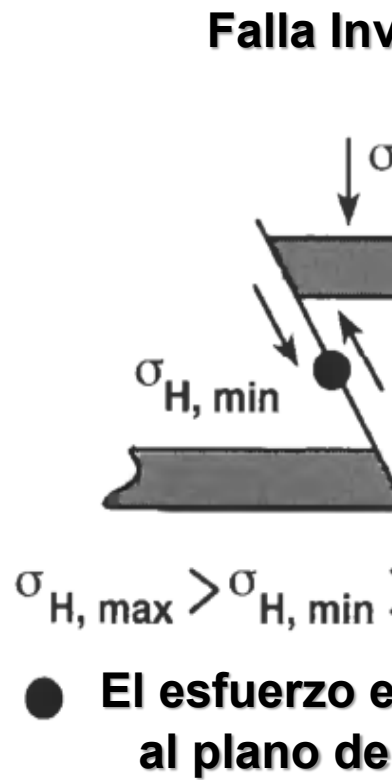
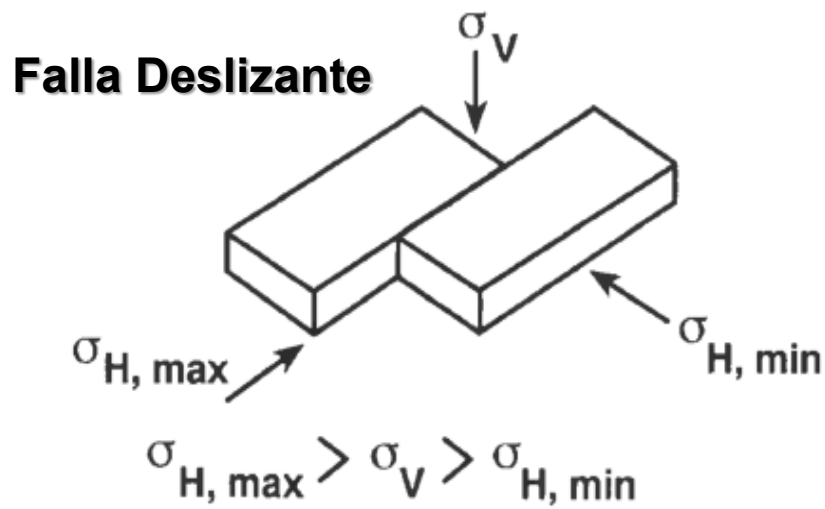
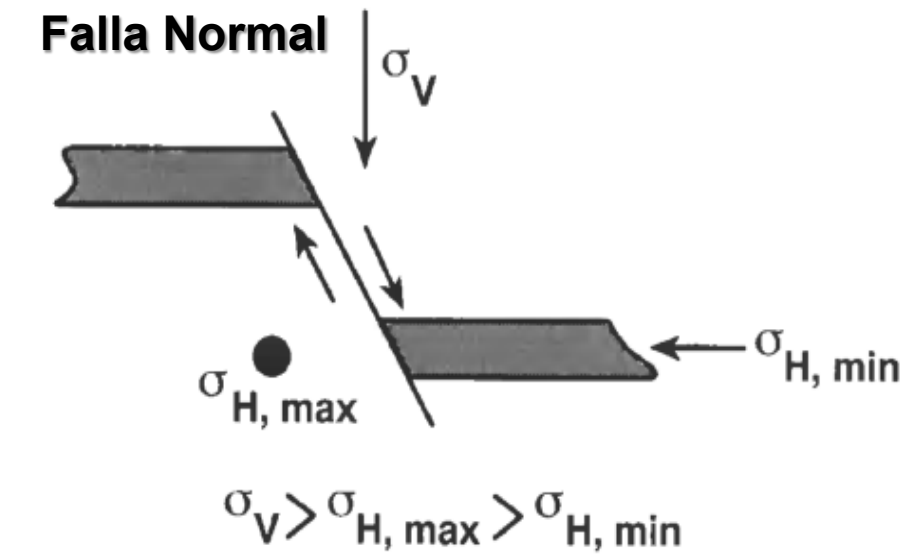
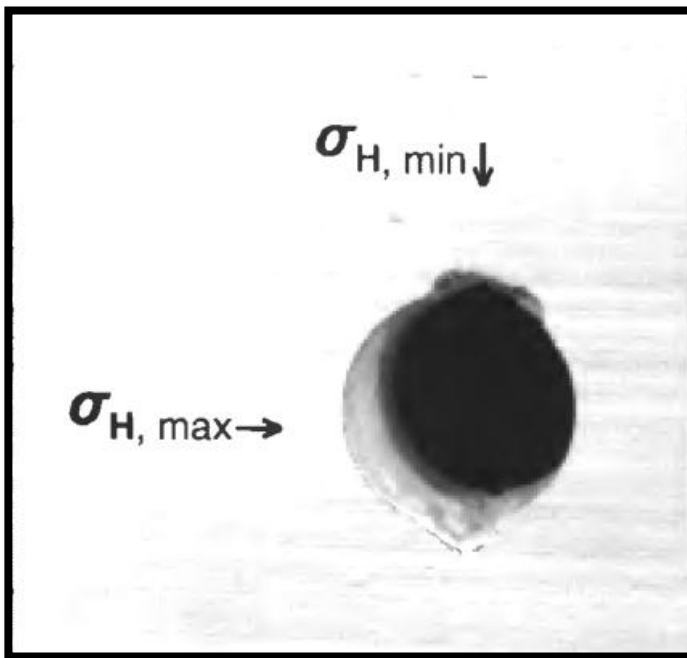


Figura 22. Interpretación del campo de esfuerzos para diferentes estructuras geológicas
Fuente: Modificado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

3.7.3 Análisis de ruptura

En una formación donde el σ_{θ} se crea a partir de la de la perforación que exceda la fuerza compresiva de la formación, una zona de ruptura cerca de la cara del pozo se produce. Los trabajos experimentales han demostrado que la ruptura puede ser una técnica valiosa que permite a los ingenieros para determinar la dirección del esfuerzo horizontal mínimo. La figura 23 demuestra experimentalmente como la ruptura es creada en la dirección del esfuerzo horizontal mínimo. Un registro caliper puede mostrar el fenómeno de ruptura. La ruptura no se debe confundir con el canal de erosión en el que el pozo es hecho en todas las direcciones.



HUECO ABIERTO VERTICAL

Prueba de ruptura del pozo:

$$\sigma_v = 3000 \text{ psi}$$

$$\sigma_H = 2500 \text{ psi } 5000 \text{ psi}$$

$$\sigma_h = 1400 \text{ psi}$$

Figura 23. Demostración experimental del fenómeno de ruptura.

Fuente: Modificado de *Rock mechanics in wellbore construction*, Abass Hazim, Justo Neda; 2003

3.7.4 Deformación de recuperación inelástica

Este método predice la dirección de los esfuerzos en sitio en la formación. Este se basa en la teoría que el núcleo se relaja cuando los esfuerzos en sitio son removidos (Voight, 1968; Blanton 1983). La cantidad de relajación depende del tiempo y esta proporcionalmente relacionado con la dirección y magnitud de los esfuerzos originales. Un núcleo orientado es usualmente retirado del pozo y es montado en un dispositivo que mide la deformación de recuperación en diferentes direcciones. La cantidad de deformación recogida puede varia de 0 más de 60 micropulgadas.

Las magnitudes de los esfuerzos en sitio pueden ser estimados de la recuperación de la deformación principal (Blanton, 1983).

La figura 24 muestra un ejemplo real de este método de la que se puede determinar la dirección de los esfuerzos en sitio.

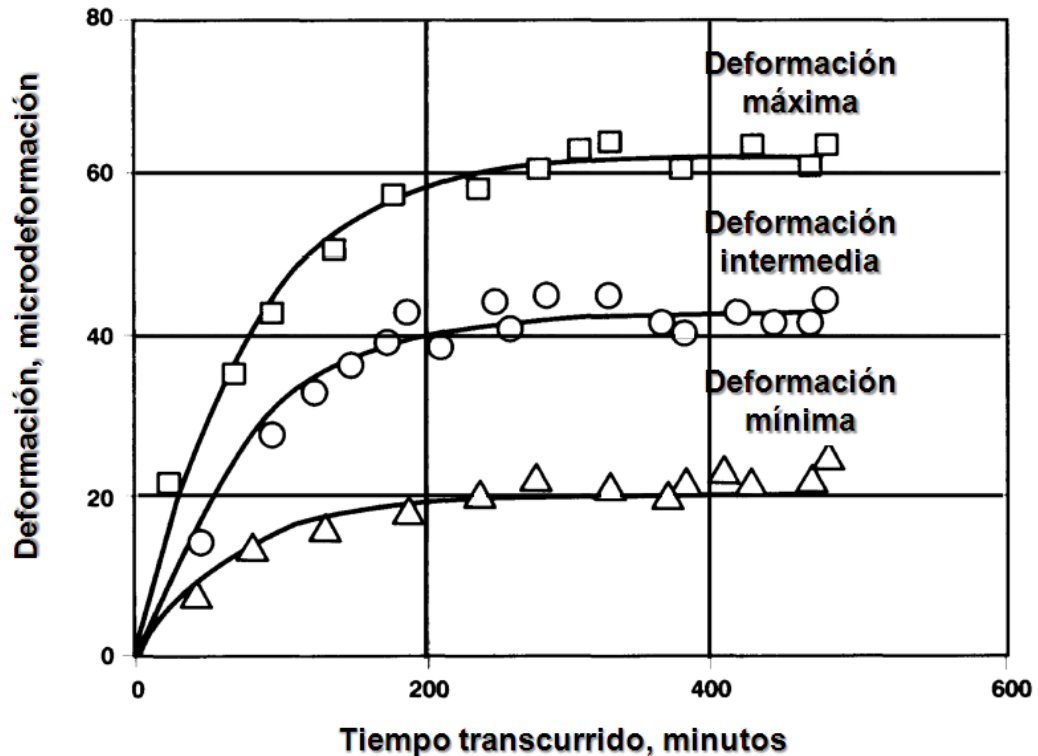


Figura 24. Deformaciones principales observadas de una prueba de deformación de recuperación inelástica

Fuente: *Modificado de Rock mechanics in wellbore construction, Abass Hazim, Justo Neda; 2003*

Antes de que los datos del método anterior sean analizados, las siguientes observaciones deben considerarse seriamente:

- El método se basa en la relajación después de que el núcleo físicamente se separa de la masa de roca sometida a esfuerzo. El crecimiento inelástico del núcleo es un resultado de microcracks causado por la relación de los esfuerzos en sitio. El número de estos microcracks es proporcional al estado de esfuerzos antes de la extracción. Por lo tanto este método es altamente dependiente de la calidad del núcleo retirado y de la existencia de fracturas naturales. La muestra debe ser observada cuidadosamente antes y después de la prueba. Si la muestra se observa una fractura natural, esta no debe ser usada.
- Si la fractura natural no era evidente antes de la prueba pero se observó posterior a la prueba y si después la muestra se corta en varios planos, los datos deben ser descartados. Una fractura natural puede invertir la dirección real de hasta el 90°.
- Muchos esfuerzos se han hecho para analizar la recuperación. Si la deformación total es menor que 50 micropulgadas, los resultados pueden considerarse poco confiables. Buenos resultados son obtenidos cuando la recuperación es 200 micropulgadas o más.
- El método para determinar la magnitud del esfuerzo debe considerarse como una aproximación. Más investigación es necesaria para este método.

- Todas las curvas de deformación pueden mostrar la recuperación de deformación positiva continua. Los datos más confiables se tienen a partir de curvas que muestran toda la recuperación positiva. Las curvas que muestran toda la recuperación negativa están denominadas por el efecto de la presión de poro; sus resultados deben ser analizados, pero no deben ser considerados confiables. Las curvas que muestran de ambos modos son causadas por el efecto direccional de la permeabilidad (anisotropía), efectos mecánicos, etc. Los resultados de estas curvas no deben ser considerados confiables.

4. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES ORIENTADOS A ANÁLISIS GEOMECÁNICO

Para garantizar cierto nivel de control sobre el modelo que se piensa realizar, el presente estudio propone un primer flujo de trabajo que apunta a pre-valorar el software que se piense utilizar. Aunque en este trabajo se tomó una decisión en función de los criterios que a continuación se van a exponer, no es intención del autor crear una camisa de fuerza alrededor de la herramienta que servirá como soporte para la construcción de los modelos computacionales. Los objetivos del proyecto y la dirección del análisis del mismo deben ser función exclusiva del ingeniero que diseña.

Los pasos propuestos son los siguientes:

- Paso 1: Análisis preliminar del modelo
- Paso 2: Elección de la herramienta computacional
- Paso 3: Diseño conceptual del modelo
- Paso 4: Identificación de los flujos de trabajo internos
- Paso 5: Simulación y análisis de resultados

4.1 ANALISIS PRELIMINAR DEL MODELO

En esta etapa del proceso de construcción del modelo, se desea llegar a un “plano” del sistema a valorar. Para efectuar este análisis se requiere definir unos parámetros característicos del sistema que se va a simular. Estos parámetros se exponen a continuación.

Tipo de medio. En este caso, la descripción del medio de interés es importante pues dicha descripción definirá el modelo de material que se piensa utilizar. Para el caso de los modelos de subsuelo los casos más generales que se pueden presentar son los siguientes:

- *Medio granular – saturado:* obedece a aquel tipo de medios que representan el sistema en su estado más real posible. El material granular del subsuelo generalmente estará saturado de algún tipo de fluido (aceite, agua o gas) o de una mezcla. Sin embargo, su elección en el momento del modelamiento depende de que se cuente con información asociada a los modelos constitutivos del mismo.
- *Medio Continuo:* es la suposición “más simple” dado que no se requiere de parámetros que describan la interacción entre los fluidos interporosos y la matriz de roca.

Condiciones del medio. Aquí lo que se debe hacer es definir bajo que condiciones se piensa modelar el medio de interés. Los elementos que se deben tener en cuenta son los siguientes:

- *Nivel de saturación (completa o parcial):* esta condición permite pensar en saturar un medio de dos fluidos diferentes. Generalmente se debe manejar esta condición con cuidado y siguiendo el trazado de suposiciones establecidas por el modelo constitutivo.
- *Fluido saturante:* se debe definir el tipo de fluido que llenará los espacios intersticiales del medio poroso. A este fluido se le debe asociar una curva de comportamiento que describa la razón de movilidad en función de la saturación.
- *Nivel de acción térmica:* este tópico es opcional pero importante. Ciertos fluidos cambian sus propiedades al igual que ciertas rocas cuando se registra cambio de temperatura con el tiempo. En estos casos se requiere una tabla de datos que defina el comportamiento térmico del material de interés.

Tipo de modelo. En este caso, según lo expuesto en los capítulos anteriores, se debe seleccionar el modelo que mejor represente las condiciones que se requieren modelar. Para efectos de recordar un poco, las opciones que mejor funcionarían para los objetivos del presente trabajo son:

- Elasticidad lineal
- Druker – Prager
- Druker – Prager extendido (poro elástico)

Disponibilidad de información. Dentro de los parámetros de selección, este último es el más decisivo pues determina si un modelo se podrá o no aplicar en función de la información disponible. Es común que muchos modelos no se puedan llevar a niveles rigurosos de simulación, simplemente porque no se cuenta con la información disponible para alimentarlos. En este punto se deberá cotejar la información disponible, según el tipo de modelo elegido, sin estar exento el ejercicio de aplicar correlaciones y promedios con el fin de completar la información. Si la calidad de la información es pobre se recomienda usar un modelo con menores requerimientos. Tras la valoración de los parámetros anteriormente expuestos, es posible que se llegue a la conclusión de que la herramienta que se requiere no existe, lo que daría lugar a la oportunidad de desarrollar.

4.2 ELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

Una vez se tiene una idea de cuáles son los parámetros de caracterización del problema, viene la tarea de valorar el software disponible para construir el modelo. Aunque el objetivo del estudio que se pretenda emprender sea construir un modelo propio, se debe entender que dentro de la escala de construcción de modelos computacionales, el desarrollo de un modelo propio no es una opción fuera de la lista pero si de última medida.

Las preguntas que facilitan de alguna manera la elección de la herramienta y la estrategia de montaje del modelo son las siguientes:

- Se desea usar totalmente software ya construido?
- Se requiere generar complementos a software ya construido?
- Se desea integrar software ya construido?
- Se requiere modificar software ya construido?

- Se requiere construir un programa desde cero?

4.2.1 Software libre

A continuación se presenta un conjunto de programas que escalan en sus flujos de trabajo el preproceso, el proceso y el postproceso. Algunos de ellos se enfocan en un flujo o en otro. Otros cuentan con la ventaja de tener herramientas en los tres. Los elementos que fueron tenidos en cuenta para exponer esta clasificación fue el nivel de robustez, el nivel de documentación disponible y la plataforma operativa de trabajo. Los ítems evaluados en cada caso fueron los siguientes:

1. Módulo de análisis estático lineal
2. Módulo para el análisis estático no lineal
3. Módulo de análisis dinámico
4. Módulo para problemas de campo en estado estacionario
5. Módulo para análisis de problemas térmicos transitorios
6. Módulo CFD para fluidos newtonianos
7. Módulo CFD para fluidos no newtonianos
8. Módulo CFD para estado estable
9. Módulo CFD régimen transitorio
10. Módulo CFD para flujo laminar
11. Módulo CFD para flujo turbulento
12. Módulo CFD para flujo compresible
13. Módulo CFD para flujos incompresibles
14. Modelado de problemas electromagnéticos
15. Problemas de dinámica explícita

Tabla 3. Herramientas de preproceso, proceso y postproceso disponibles

Programa	Pre-procesador	Procesador	Post-Procesador
----------	----------------	------------	-----------------

Calculix	✓	✓	✓
Z88		✓	✓
OpenFOAM	✓	✓	✓
Impact	✓	✓	✓
Code – Aster		✓	
Gmsh	✓		✓
GetDP		✓	
Tochnog		✓	
NetGen	✓		✓
NGSolve		✓	
FreeFem		✓	✓
OpenFlower		✓	
FEIt		✓	✓

Fuente: Modificado de Seminario de Mecánica Computacional orientada a la ingeniería de Petróleos. Universidad de Antioquia. Instituto Tecnológico Metropolitano. Elkin Rodolfo Santafé - Medellín 2010

Tabla 4. Valoración del Software disponible (ítems 1 al 8)

Programa	1	2	3	4	5	6	7	8
Calculix	X	X	X	X	X			
Z88	X							
OpenFOAM	X			X	X	X	X	X
Impact								
Code – Aster	X	X	X	X	X			
Gmsh-GetDP	X		X	X	X			
Tochnog	X	X	X	X	X	X	X	X
NetGen-NGSolve	X		X	X				
FreeFem	X	X	X	X	X	X	X	X
OpenFlower								
FEIt	X	X						

Fuente: Modificado de Seminario de Mecánica Computacional orientada a la ingeniería de Petróleos. Universidad de Antioquia. Instituto Tecnológico Metropolitano. Elkin Rodolfo Santafé - Medellín 2010

Tabla 5. Valoración del Software disponible (ítems 9 al 16)

Programa	9	10	11	12	13	14	15	16
Calculix							X	
Z88								
OpenFOAM	X	X	X	X	X	X		
Impact								X
Code – Aster							X	
Gmsh-GetDP							X	
Tochnog	X	X	X	X	X	X		
NetGen-NGSolve							X	
FreeFem	X	X	X	X	X	X	X	
OpenFlower	X		X		X			
FEIt								

Fuente: Modificado de Seminario de Mecánica Computacional orientada a la ingeniería de Petróleos. Universidad de Antioquia. Instituto Tecnológico Metropolitano. Elkin Rodolfo Santafé - Medellín 2010

Tabla 6. Disponibilidad de asesoría y recursos de consulta

	Manuales y Tutoriales					Foros de discusión			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4
Calculix	★	★	★	★	★				😊
Z88	★	★	★					X	
OpenFOAM	★	★	★	★	★				😊
Impact	★	★	★					X	
Code – Aster	★	★							😊
Gmsh-GetDP	★	★	★	★				X	
Tochnog	★						X		
NetGen	★	★				X			
NGSolve	★	★				X			
FreeFem	★	★	★	★				X	
OpenFlower	★							X	
FEIt	★	★	★	★		X			

Fuente: Modificado de Seminario de Mecánica Computacional orientada a la ingeniería de Petróleos. Universidad de Antioquia. Instituto Tecnológico Metropolitano. Elkin Rodolfo Santafé - Medellín 2010

Tabla 7. Plataforma (S.O) disponible para cada programa

Programa	Linux	Windows
Calculix	X	X
Z88	X	X
OpenFOAM	X	
Impact	X	X
Code – Aster	X	X
Gmsh	X	X
GetDP	X	X
Tochnog	X	
NetGen	X	X
NGSolve	X	X
FreeFem	X	X
OpenFlower	X	
FEIt	X	X

Fuente: Modificado de Seminario de Mecánica Computacional orientada a la ingeniería de Petróleos. Universidad de Antioquia. Instituto Tecnológico Metropolitano. Elkin Rodolfo Santafé - Medellín 2010

4.2.2 Software Comercial

Frente a la pregunta del software comercial, es inevitable realizar comparaciones a todos los niveles. Las herramientas comerciales gozan de un elemento común y es que integran programas que cubren el preproceso, proceso y postproceso. Dos de los competidores más fuertes a escala comercial son ANSYS (Swanson Analysis Systems, Inc.) y ABAQUS (Simulia, Inc). Hay seguidores fuertes de cada herramienta siendo en la actualidad, un mercado bastante competitivo y fortalecido por la adquisición de compañías pequeñas con aplicaciones sólidas que alimentan las suites de cada casa comercial. Inicialmente, ANSYS era más conocido en el mundo comercial y ABAQUS se concebía más como una herramienta orientada a la investigación y la academia.

Desde sus orígenes en diseño, ANSYS ha sido un paquete auto-suficiente con un buen preprocesador y un buen post-procesador, mientras que ABAQUS solía ser solucionador independiente. Si se requería utilizar ABAQUS se tenía que hacer todo el proceso previo de diseño del modelo y flujo de ideas antes de poner el modelo en funcionamiento. ABAQUS sin embargo, adquirió PATRAN y desde entonces tomo esta base para el desarrollo de herramientas de soporte en el preproceso y postproceso, haciéndolo más atractivo a los usuarios finales. ANSYS cuenta con una muy buena documentación, tanto en manual de teoría como en manual de operación. Adicionalmente expone las secuencias de comandos de ANSYS (APDL), que representa una herramienta poderosa para los programadores. Todas estas potencialidades hacen que ANSYS cuenta con una amplia base de clientes haciéndolo históricamente hablando, el más preferido para aplicaciones comerciales.

Sin embargo, la moneda tiene dos caras. ANSYS ha logrado ponerse a la par en robustez con ABAQUS en el desarrollo de nuevos elementos, la incorporación de nuevas metodologías, subrutinas de usuario, entre otros. Comparando la biblioteca de materiales, se encuentra una ventaja contundente por parte de ABAQUS, y es en este punto en donde los usuarios ven probable cambio de ANSYS a ABAQUS. La reciente adquisición de ANSYS de muchos programas de CFD (como Fluent y CFX) representa un esfuerzo por parte de esta compañía por proporcionar solución completa, pero muchos de estos esfuerzos de integración fueron simplemente horribles. Con el tiempo se ha ido mejorando la funcionalidad pero aún persisten algunos detalles que hacen de las herramientas más un problema que una solución. Ya en el caso de análisis no lineal, ABAQUS tiene su ventaja. Pero la brecha se está cerrando después de ANSYS implementado los 180 elementos de la serie.

El otro tema a analizar en este caso es el costo. Históricamente, ABAQUS ha sido siempre más costoso. ANSYS presenta más opciones en materia de precios, y es

menos costoso. Ya a nivel de universidades la historia es diferente. Hoy en día, la evolución de la PC a arquitecturas que integran multiprocesadores y multi-hilos ha extendido el uso de estas herramientas, lo que se ve traducido en una reducción de los costos. ABAQUS ha desarrollado un enfoque relacionado con el número de procesadores simultáneos, y ANSYS se ha enfocado en el número de trabajos simultáneos. Esto hace que exista una gran diferencia en los precios. Fácilmente ANSYS pueden alcanzar costos de U\$6600/año en mantenimiento. ABAQUS, requiere de algunos toolkits adicionales y puede alcanzar costos por el orden de los U\$ 30000/año.

4.3 DISEÑO CONCEPTUAL DEL MODELO

En este paso lo que se hace es concretar los valores generales que serán cargados dentro de la herramienta computacional elegida. Se debe tener en cuenta que cada herramienta es distinta, y aunque dos herramientas ofrezcan el mismo tipo de análisis, es probable que sus flujos de trabajo sean muy diferentes. Por esta razón, se considera pertinente que un diseño conceptual del estudio se esboce primero. Esto permite entender mejor el problema y permite que se pueda adaptar incluso a diferentes herramientas a la vez.

Para el diseño conceptual se debe definir:

- Geometría general (2D, 3D o Axialsimétrica)
- Números de zonas presentes (subdivisiones con propiedades o modelos diferentes)
- Zonas de mayor refinamiento
- Propiedades de las diferentes zonas (según modelo de material definido)
- Estado de cargas de equilibrio

- Estado de condiciones de frontera
- Tipo de análisis temporal (dinámico o estático)

4.4 IDENTIFICACIÓN DE LOS FLUJOS DE TRABAJO INTERNOS

Esta etapa es muy dependiente del tipo de herramienta que se escoja. Existe la probabilidad de que la herramienta elegida sea muy completa, así como también, que sea necesario complementarla con scripts adicionales. El objetivo es montar sobre el programa toda la información estimada en el diseño conceptual (paso 3), teniendo en cuenta los parámetros definidos en el análisis preliminar (paso 1). Como se expuso anteriormente, diferentes herramientas pueden ofrecer lo mismo, pero el proceso de montaje puede ser diferente.

Las actividades que se registren en este paso, son función exclusiva del software que se use, incluyendo el orden en el que se ejecuten. Sin embargo es posible exponer a modo general las actividades más comunes:

- Definición del tipo o tipos de elementos a utilizar
- Construcción de la malla de simulación
- Control de calidad de la malla
- Instalación de las cargas y propiedades
- Inicialización del modelo
- Definición de las variables de salida

4.4.1 Flujo de Trabajo en ABAQUS con soporte en GUI

Cuando se utiliza como soporte la interfaz humana del programa que se ha elegido (en este caso ABAQUS), ajustando el procedimiento al entorno específico, el flujo de trabajo que se debe considerar es el siguiente:

1. Elegir el sistema coordenado
2. Definir los grados de libertad
3. Crear las partes del modelo
4. Crear los materiales
5. Definir y asignar propiedades
6. Ensamblar el modelo.
7. Configurar el tipo de análisis.
8. Aplicar las condiciones de borde y cargas.
9. Enmallar el modelo
10. Crear y someter un trabajo a análisis.

Este flujo de trabajo aplicado sobre un modelo simplificado se puede apreciar en el Anexo 2.

4.4.2 Flujo de trabajo en ABAQUS con soporte en DATA

Cuando se utiliza como soporte de construcción del modelo la DATA (archivo plano) se debe tener en cuenta la siguiente secuencia de procedimientos:

1. Definir los nodos maestros
2. Generar las copias (si hay simetría)
3. Definir las zonas de interés (sub-secciones geométricas)
4. Generar los elementos

5. Agrupar los elementos por materiales
6. Definir las características de cada material
7. Aplicar a cada grupo de elementos el material correspondiente
8. Aplicar las condiciones de frontera
9. Aplicar las condiciones iniciales
10. Inicializar el modelo
11. Instalar los pasos (steps)
12. Editar los archivos de salida.

Este flujo de trabajo aplicado sobre un modelo simplificado se puede apreciar en el Anexo 2.

4.5 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este último paso se enfrentan dos problemas principales: los altos tiempos de cómputo según la complejidad del problema y la capacidad de visualización de los resultados. Como sugerencia particular en el primer aspecto, se recomienda siempre que los modelos sean altamente refinados, asignar suficiente memoria virtual y espacio en disco. Si es posible minimizar el problema usando geometría axial, se recomienda esta práctica. Para efectos de la visualización, se recomienda definir las variables de las que se requiere salida. Esta definición se realiza generalmente durante el proceso de implementación del modelo en la herramienta.

5. CASOS DE ESTUDIO

5.1 Modelo tridimensional completamente elástico

Aplicando la metodología expuesta en el capítulo 4, se exponen a continuación los detalles del modelo construido.

5.1.1 Análisis preliminar del modelo

Tipo de medio: medio Continuo

Condiciones del medio: dado que el medio no es granular, no se considerará saturado. No hay efectos térmicos involucrados.

Tipo de modelo: Modelo de Morh-Coulomb con elasticidad lineal

Disponibilidad de información: el banco de datos usado corresponde al análisis de un pozo ubicado en la zona del Piedemonte. Los datos referidos se encuentran disponibles en el trabajo de TERAN, A. (12).

5.1.2 Elección de la herramienta computacional

La herramienta escogida para la construcción de este modelo es el ABAQUS en su versión 6.9 – Estudiantil. Como se expuso en el capítulo 4, el nivel de robustez de este software permitirá a su vez construir los modelos que vienen posteriormente.

5.1.3 Diseño conceptual del modelo

El modelo que se piensa construir cuenta con las siguientes suposiciones:

- Es completamente vertical.
- La zona de interés se construirá embebida dentro de una zona mucho mayor.
- La zona de interés es una intercalación de areniscas y shales de 11 franjas.
- Se realizará una comparación con dos pesos de lodo utilizados durante la perforación.
- Se colocará una sobrecarga de roca para simular el *overburden* y las condiciones intrínsecas de esfuerzos.
- Se usará un estrato posterior que servirá de colchón dentro del modelo.
- Se anularán los desplazamientos en las caras externas
- Se instalará una carga de presión en la cara interna del modelo

Como se puede apreciar en la Figura 25, las condiciones de frontera fueron fijadas jugando con las condiciones a las cuales es sometido un pozo. Se usó una extensión radial de 10 veces el radio del pozo fijando las paredes externas bajo la suposición de que en ese punto, no hay alteración de los esfuerzos. La presión del lodo fue colocada en la cara interna para emular el efecto de la presencia de esta sobre carga en el sistema. La idea una vez se realicen los cálculos es obtener el mapa de esfuerzos correspondiente a ese nivel de fuerzas actuantes. En la Figura 26 se pueden apreciar los detalles del modelo en vertical. Para emular la presencia de fuerzas de cuerpo en la zona de interés se ha colocado una zona de sobrecarga que emula el *overburden*, buscando con el peso de esta columna, sobrecargar la zona de interés. Posteriormente se coloca una zona de amortiguamiento que servirá de colchón para el peso de sobrecarga instalado. Los análisis de comportamiento se concentrarán en la zona de interés.

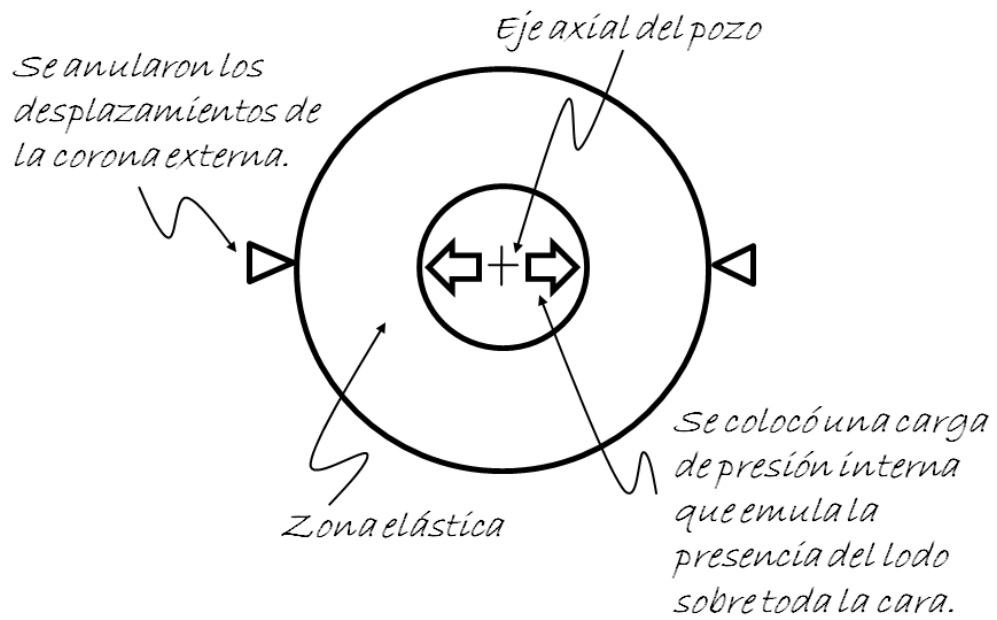


Figura 25. Condiciones de frontera instaladas en el modelo (vista de planta)
Fuente: Autor

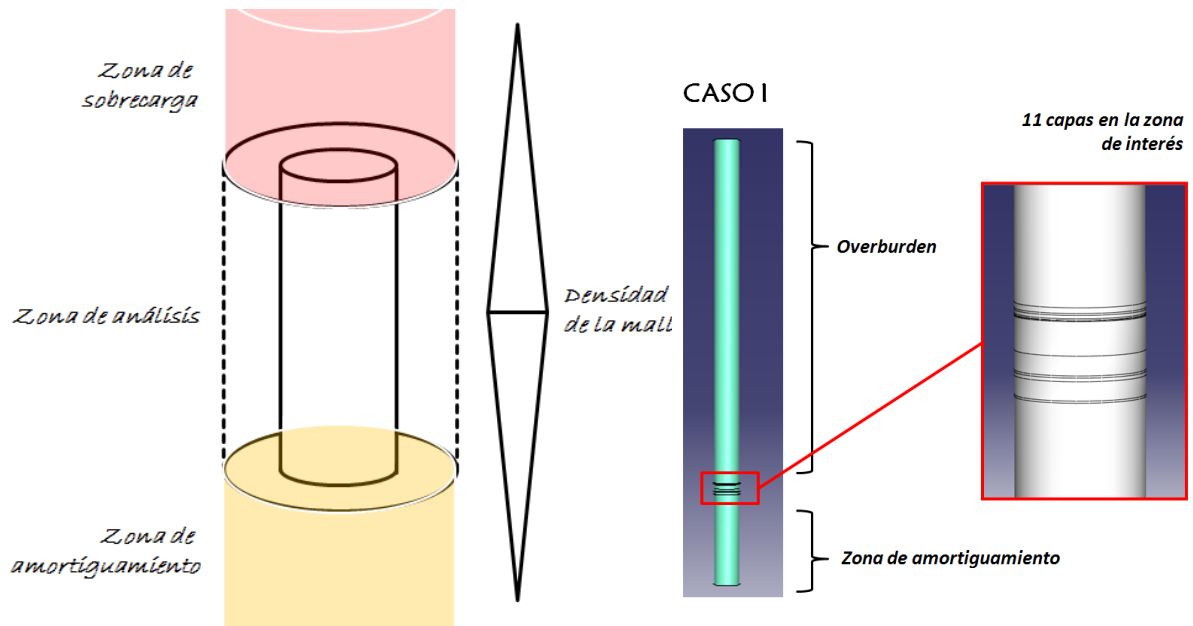


Figura 26. Distribución general del modelo.
Fuente: Autor

Tabla 8. Geometría

Estrato	Tope (m)	Base (m)	Espesor (m)	Radio (m)
1	0	3791,4072	3791,4072	0,20447
2	3791,4072	3798,87175	7,464552	0,20447
3	3798,87175	3801,36197	2,490216	0,20447
4	3801,36197	3805,79071	4,428744	0,20447
5	3805,79071	3807,72924	1,938528	0,20447
6	3807,72924	3808,56134	0,832104	0,20447
7	3808,56134	3809,58547	1,106424	0,20447
8	3809,58547	3855,07687	45,4914	0,20447
9	3855,07687	3881,18604	26,109168	0,20447
10	3881,18604	3884,00544	2,8194	0,20447
11	3884,00544	3888,80299	4,797552	0,20447
12	3888,80299	3914,3879	25,584912	0,20447
13	3914,3879	3917,18292	2,795016	0,20447
14	3917,18292	4917,18292	1000	0,20447

Fuente: Autor

Tabla 9. Propiedades

Estrato	E (Pa)	v	Gravedad	Densidad de la capa
1	5,6711E+10	0,19	9,8	2850
2	5,6711E+10	0,19	9,8	2850
3	5,6992E+10	0,19	9,8	2850
4	6,0122E+10	0,18	9,8	2850
5	6,6674E+10	0,17	9,8	2850
6	4,1372E+10	0,24	9,8	2850
7	3,9844E+10	0,24	9,8	2850
8	6,7323E+10	0,17	9,8	2850
9	5,5648E+10	0,20	9,8	2850
10	6,2401E+10	0,18	9,8	2850
11	6,5119E+10	0,18	9,8	2850
12	6,485E+10	0,18	9,8	2850
13	7,1821E+10	0,16	9,8	2850
14	7,1821E+10	0,16	9,8	2850

Fuente: Autor

Tabla 10. Peso de lodo utilizado

Densidad de lodo (Pa/m)	h	Presión en la cara del pozo
16467,79231	3791,4072	62436106,33
16467,79231	3798,87175	62559031,02
16467,79231	3801,36197	62600039,38
16467,79231	3805,79071	62672971,02
16467,79231	3807,72924	62704894,3
16467,79231	3808,56134	62718597,21
16467,79231	3809,66777	62736817,57
16467,79231	3855,15917	63485960,5
16467,79231	3881,26834	63915920,86
16467,79231	3884,08774	63962350,15
16467,79231	3888,88529	64041355,24
16467,79231	3914,4702	64462682,26
16467,79231	3917,26522	64508710
16467,79231	4917,26522	80976502,31

Fuente: Autor

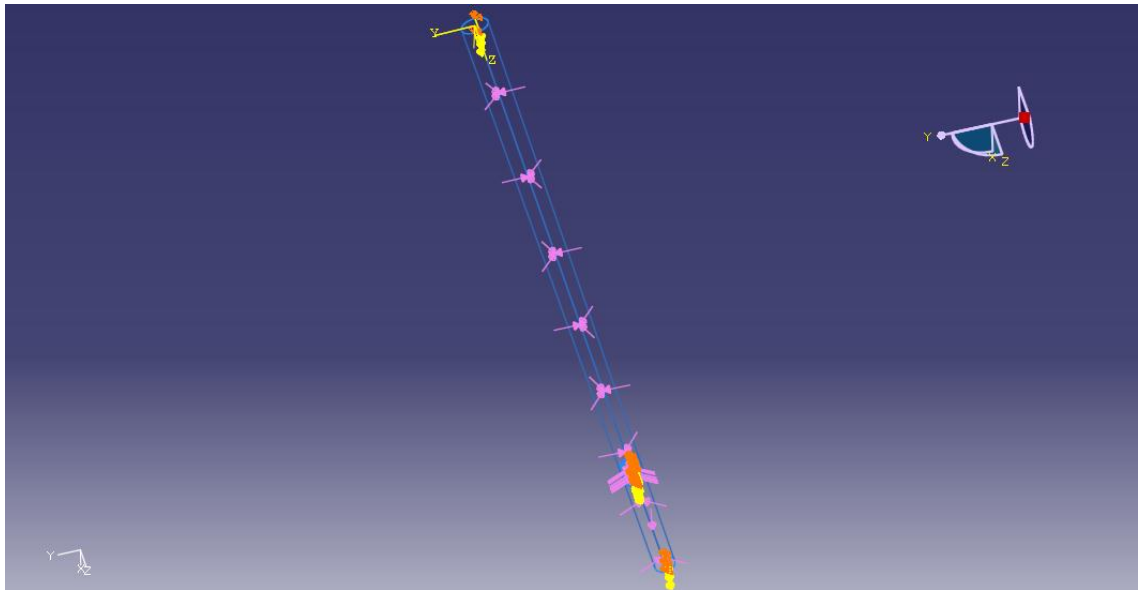


Figura 27. Distribución general del modelo.

Fuente: Autor

5.1.4 Identificación de los flujos de trabajo internos.

Siguiendo el procedimiento expuesto en el Capítulo 4 (Flujo de trabajo en ABAQUS con soporte en GUI) y ampliado en el Anexo B, para el caso de estudio se exponen algunos gráficos ilustrativos.

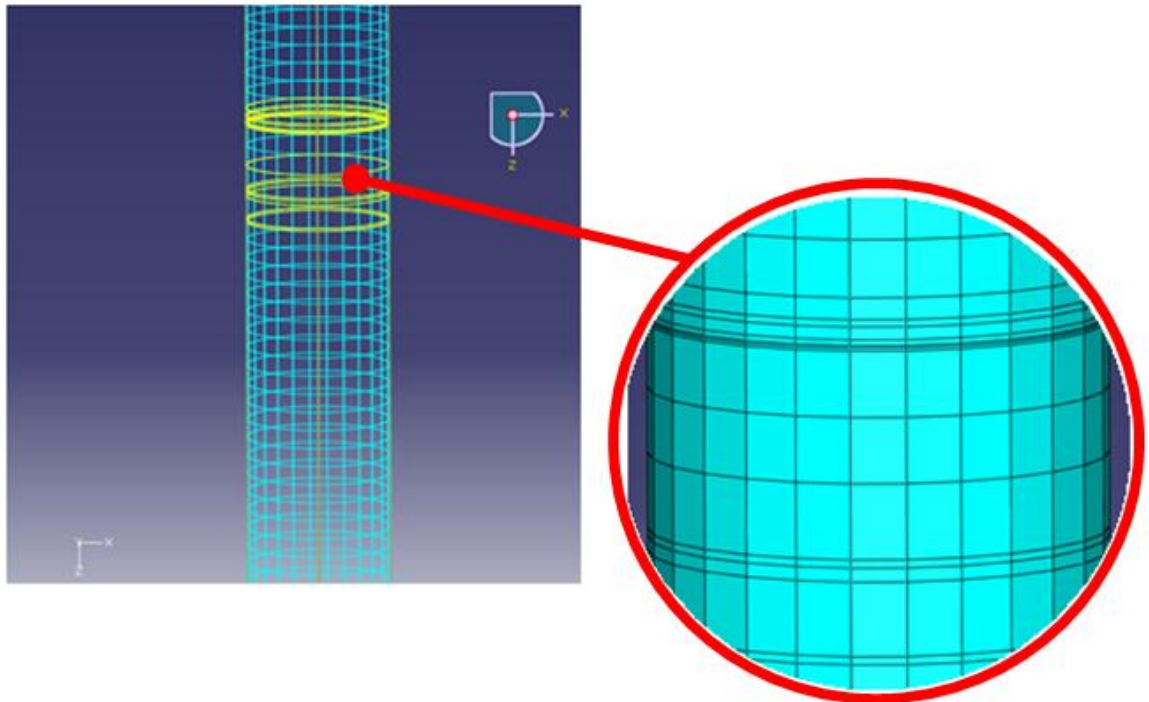


Figura 28. Malla general y detalle de la zona de interés en el modelo.

Fuente: Autor

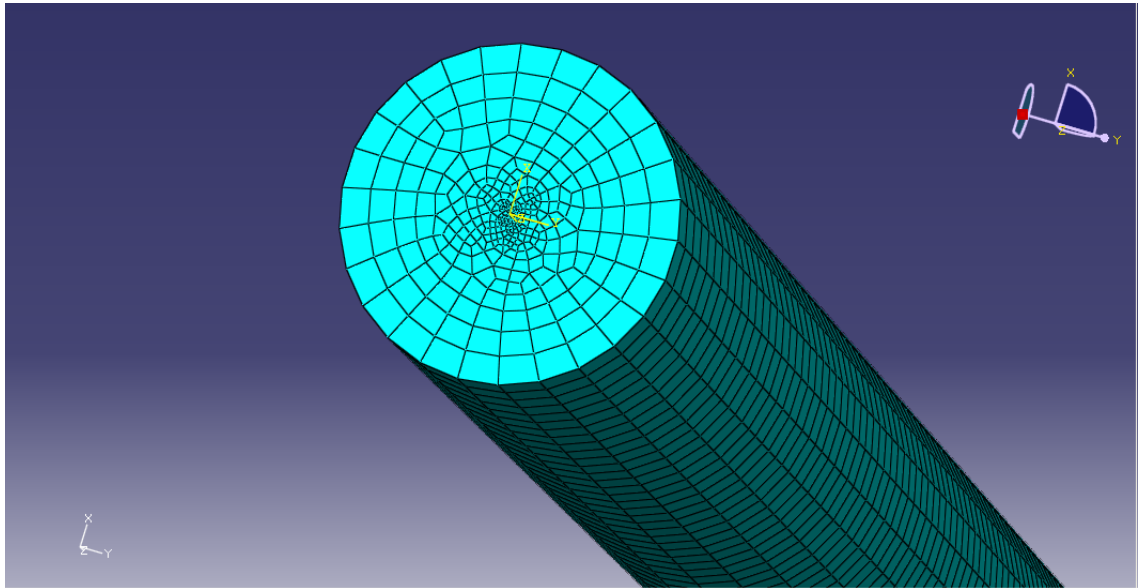


Figura 29. Detalle de la sección transversal de la malla.

Fuente: Autor

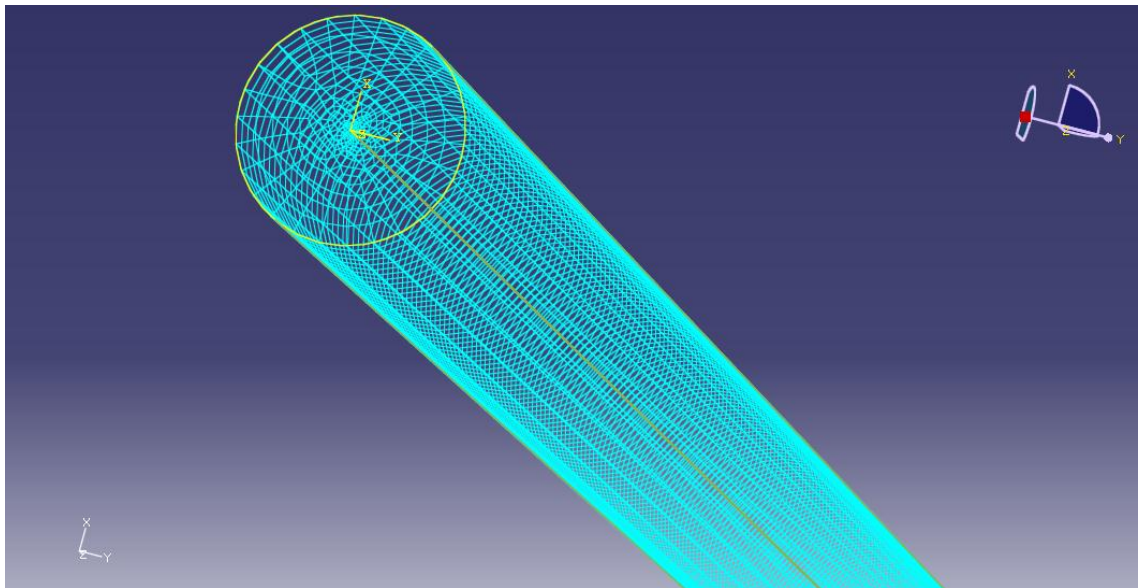


Figura 30. Detalle en transparencia de la malla construida con el eje axial del pozo a la vista.

Fuente: Autor

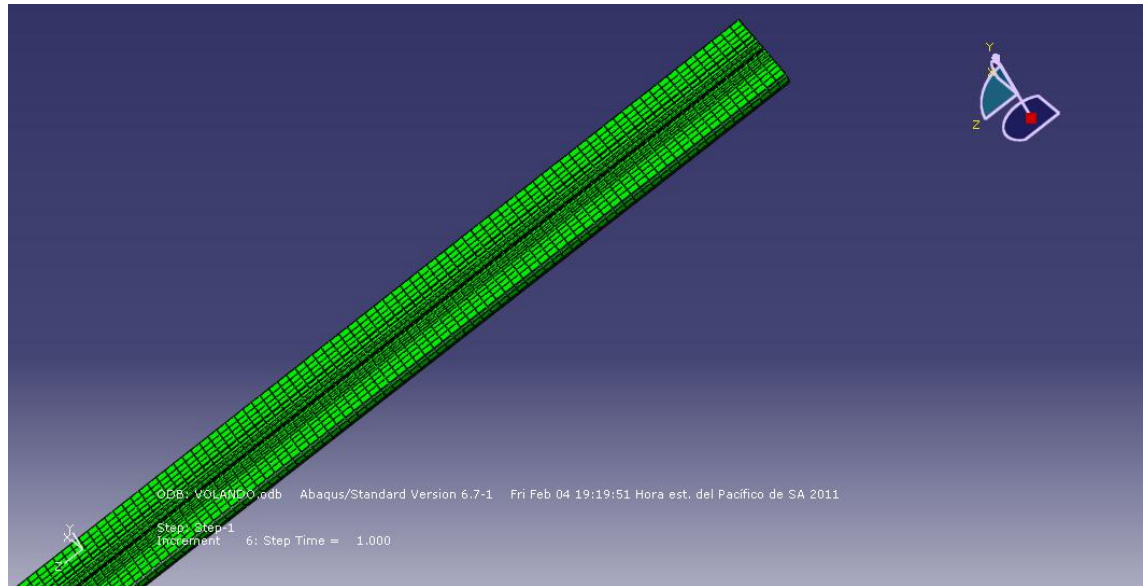


Figura 31. Detalle de la malla en corte paralelo al eje axial.

Fuente: Autor

5.1.5 Simulación y análisis de resultados

El modelo fue corrido bajo dos condiciones de contorno. La primera con peso de lodo de 16467,79231 Pa/m y el segundo con 11174,57335 Pa/m. En la Figura 32 se pueden apreciar los detalles asociados con el campo de deformaciones bajo el lodo de 14 ppg, siendo este considerablemente diferente al obtenido con peso de lodo de 9,5 ppg (Figura 33). Los niveles de deformación que se presentaron fueron mucho mayores con el segundo peso de lodo, siendo este un indicio de que no logra su objetivo estabilizante al presentar mayores niveles de deformación. Analizando los desplazamientos (Figura 34) se puede encontrar que los porcentajes más altos se encuentran concentrados hacia el tope de la zona de

interés y no presentan cambios radicales en configuración con el cambio de peso de lodo.

Por último, al revisar los perfiles de variación de esfuerzo, los mayores campos de esfuerzo se presentan con mayor peso de lodo. Esto da indicadores fuertes de tendencia a la fractura por modo de falla.

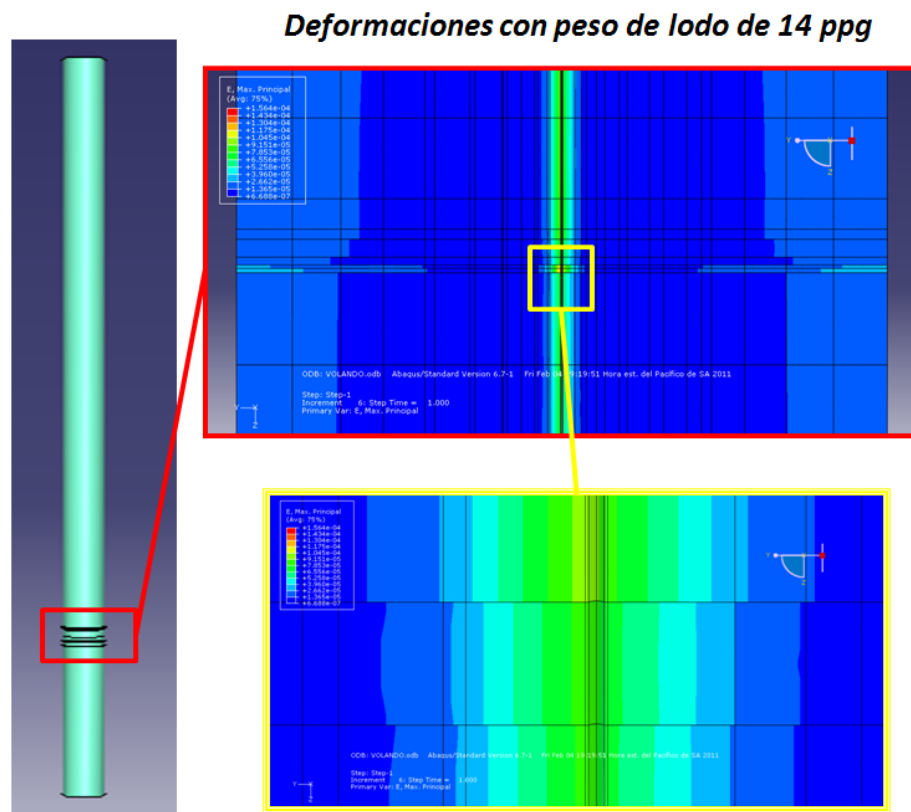


Figura 32. Campo de deformaciones resultante con peso de lodo 14 ppg.

Fuente: Autor

Deformaciones con peso de lodo de 9,5 ppg

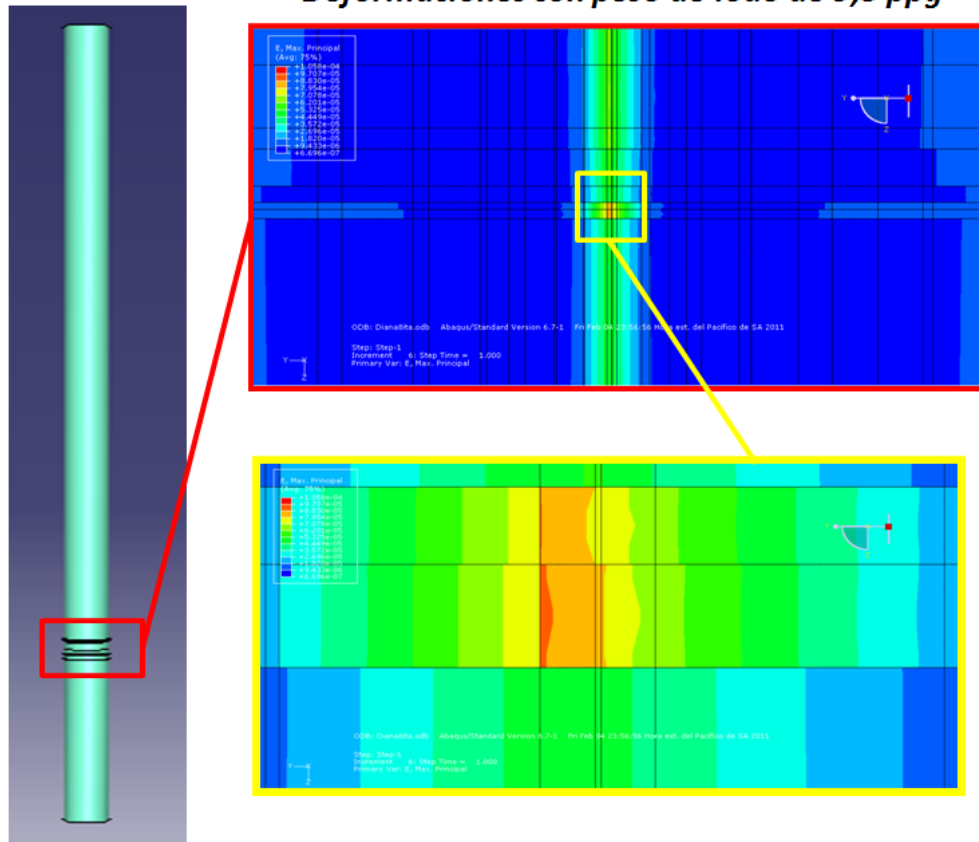


Figura 33. Campo de deformaciones resultante con peso de lodo 9,5 ppg.

Fuente: Autor

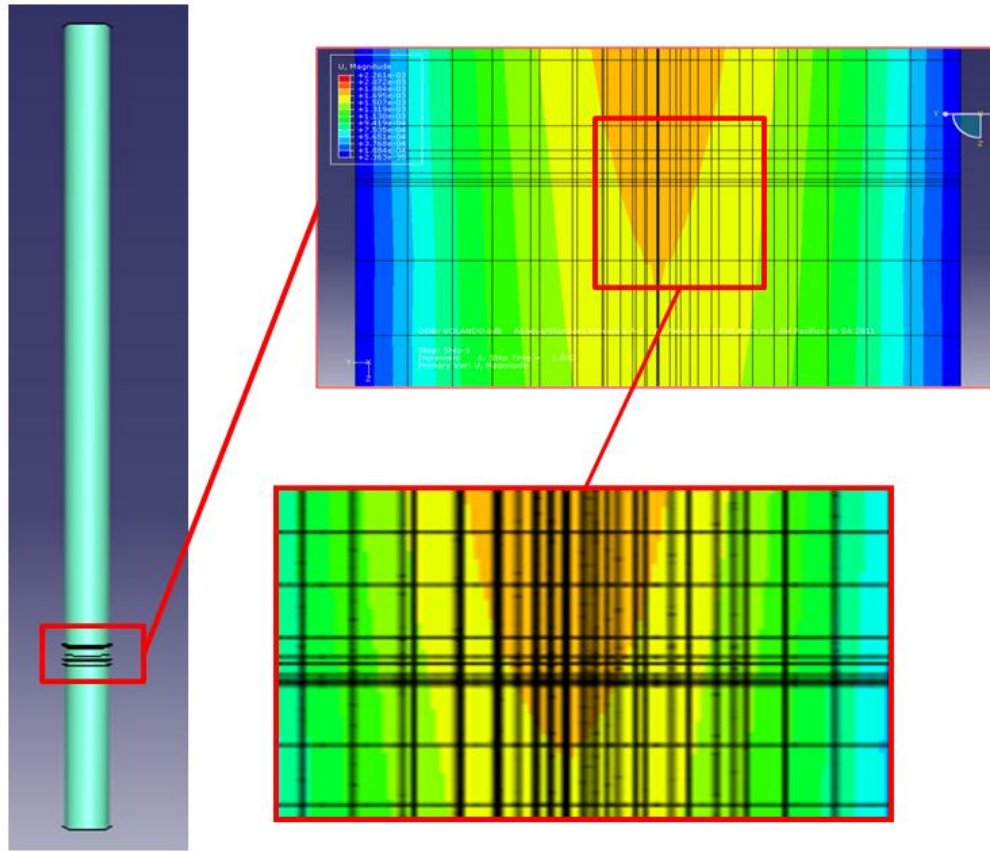


Figura 34. Zonas de desplazamiento máximo para peso de lodo de 14 ppg.

Fuente: Autor

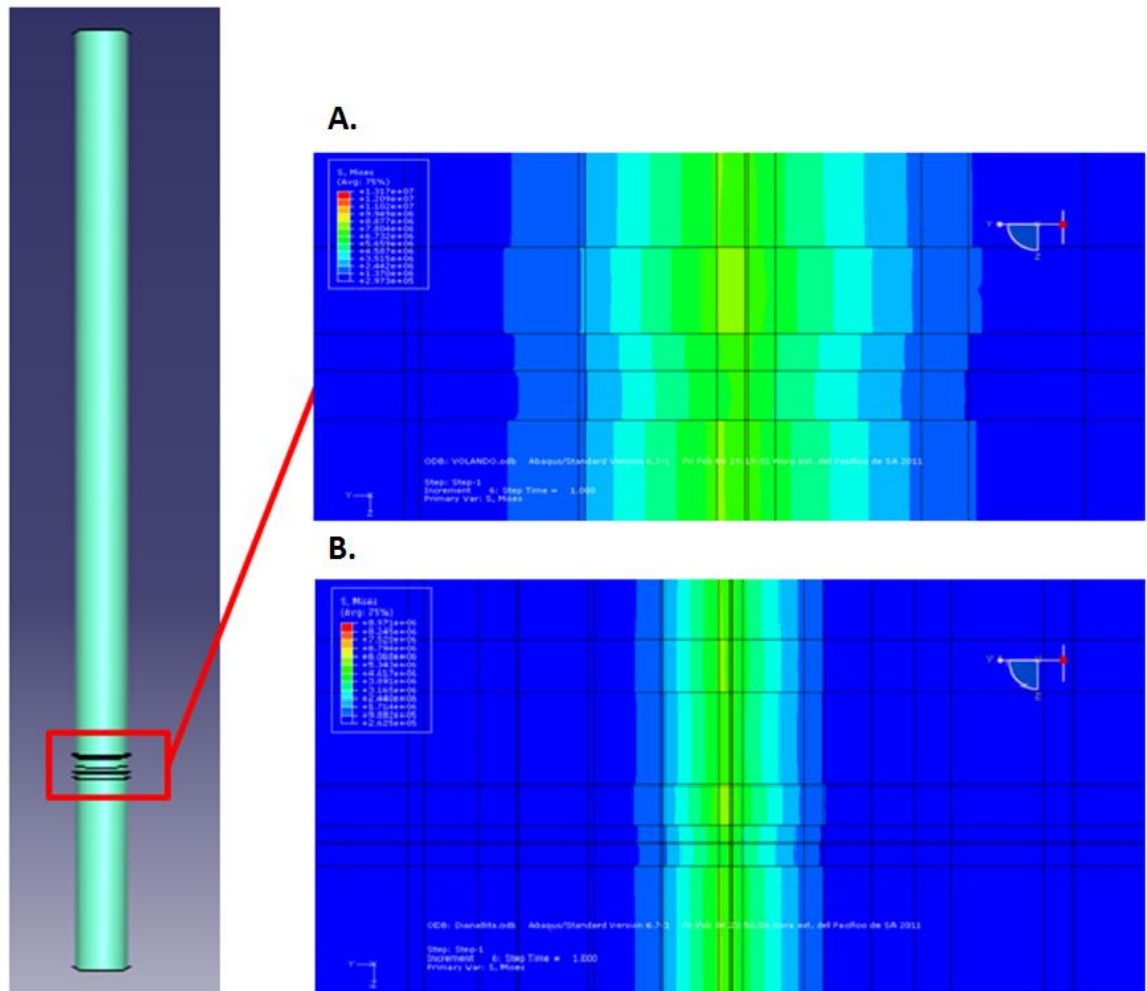


Figura 35. Variación de esfuerzos para peso de lodo de 14 ppg (A) y para peso de lodo de 9 ppg (B). El campo de esfuerzos se encuentra graficado sobre la malla deformada.

Fuente: Autor

5.2 Modelo Axisimétrico

Aplicando la metodología expuesta en el capítulo 4, se exponen a continuación los detalles del segundo modelo construido.

5.2.1 Análisis preliminar del modelo

Tipo de medio: medio poroelástico combinado con medio continuo.

Condiciones del medio: el medio se considera granulado y saturado de aceite en la zona de interés y de agua en las zonas adyacentes. No hay efectos térmicos involucrados.

Tipo de modelo: Drucker-Prager extendido

Disponibilidad de información: el banco de datos usado corresponde al análisis de un pozo ubicado en la zona del Piedemonte. Los datos referidos se encuentran disponibles en el trabajo de TERAN, A. (14).

5.2.2 Elección de la herramienta computacional

La herramienta escogida para la construcción de este modelo es el ABAQUS en su versión 6.9 – Estudiantil.

5.2.3 Diseño conceptual del modelo

El modelo que se piensa construir cuenta con las siguientes suposiciones:

- Es completamente vertical, pero se considerará axialsimétrico
- La zona de interés se construirá embebida dentro de una zona mucho mayor.
- La zona de interés es una intercalación de areniscas y shales de 11 franjas.
- Se realizará una comparación con dos pesos de lodo utilizados durante la perforación.
- Se colocará una sobrecarga de roca para simular el *overburden* y las condiciones intrínsecas de esfuerzos.
- Se usará un estrato posterior que servirá de colchón dentro del modelo.

- Se tomará un anillo de comportamiento plástico y poroso embebido en otro anillo continuo modelado con elementos “infinitos”*
- Se instalará una carga de presión en la cara interna del modelo

5.2.3.1 Elementos Axisimétricos

La coordenada 1 es R, y la coordenada 2 es Z. La dirección R corresponde a la dirección global X y la dirección Z corresponde a la dirección global Y. Esto es importante cuando los datos deben darse en las direcciones globales. La coordenada 1 debe ser mayor o igual a cero.

Grado de libertad 1 es U_r (desplazamiento en dirección radial), y el grado de libertad 2 es U_z (desplazamiento en dirección Z). Generalmente los elementos de simetría axial con giro adicionan un grado de libertad adicional, 5, correspondiente al ángulo de giro (en radianes).

ABAQUS no se aplica automáticamente ninguna de condición de contorno a los ganglios situados a lo largo del eje de simetría. Usted debe solicitar las condiciones de simetría radial o límite en estos nodos, si lo desea.

En ciertas situaciones en Abaqus / Standard puede ser necesario aplicar condiciones de contorno en los nodos radiales que se encuentran en el eje de simetría para obtener la convergencia de problemas no lineales. Por lo tanto, la aplicación de condiciones de contorno en los nodos radiales en el eje de simetría se recomienda para problemas no lineales.

* Este tipo de elemento es propio del ABAQUS y se utiliza en casos donde la zona está en contacto con una frontera y se requiere comportamiento elástico en dicha zona. Estos elementos vienen formulados de manera natural para que adopten este tipo de comportamiento.

Para elementos axisimétricos los grados de libertad referidos a los desplazamientos y rotaciones son:

1. Desplazamiento en r
2. Desplazamiento en z
3. Rotación a través del eje z
4. Rotación en el plano r – z

Los grados de libertad sólo son activados cuando el análisis lo requiere, ya que cada elemento finito usa los grados de libertad requeridos. Por ejemplo para elementos sólidos en dos dimensiones 2D, se usa únicamente los grados de libertad 1 y 2. Los grados de libertad asociados a cada nodo se refieren exclusivamente a los del elemento finito usado.

5.2.4 Identificación de los flujos de trabajo internos.

Siguiendo el procedimiento expuesto en el Capítulo 4 (Flujo de trabajo en ABAQUS con soporte en DATA) y ampliado en el Anexo B, para el caso de estudio se generó el archivo plano que configura el caso.

5.2.5 Simulación y análisis de resultados

En este modelo, se aprovecha la simetría en torno al eje axial y se crea solo una sección para simplificar el proceso de construcción. La ventaja que presenta es que se tiene más control sobre la zonificación y definición de áreas particulares sobre el modelo según las características del material.

En la Figura 36 se puede apreciar que se respeta a configuración planteada en el modelo anterior, contando en esta ocasión con la opción de inicializar el modelo desde la data y usando los fluidos presentes.

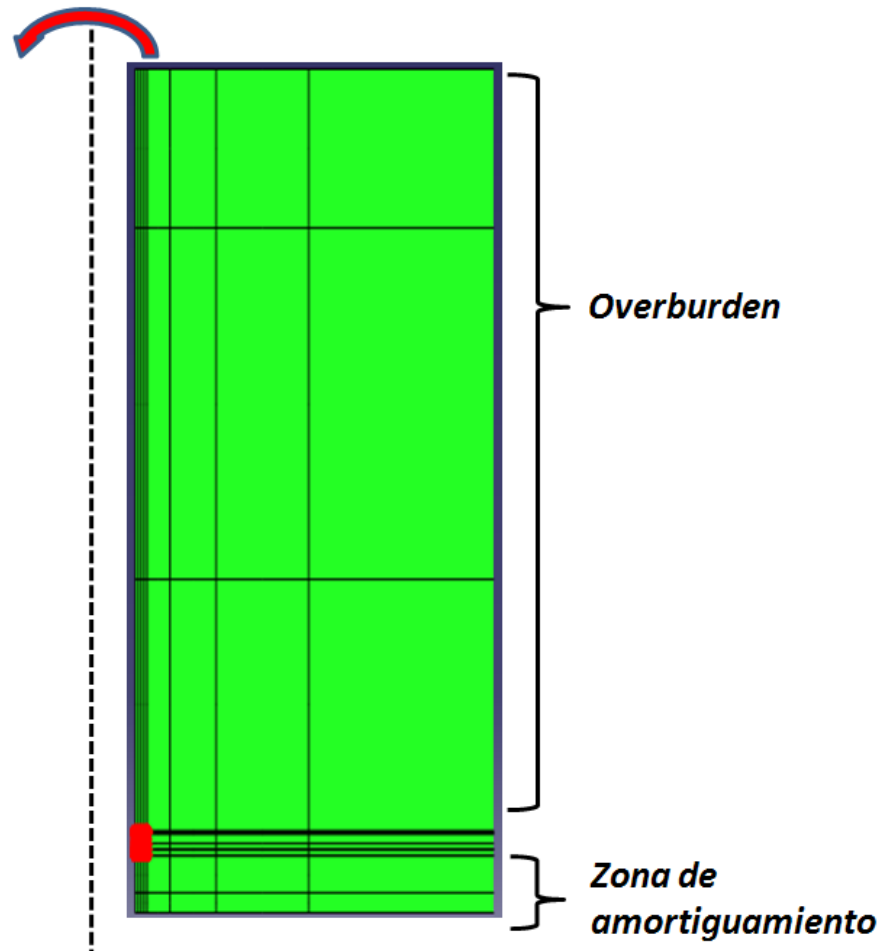


Figura 36. Detalle de la malla del modelo. Dado que es axisimétrico, el modelo en 3D se genera por rotación sobre el eje axial.

Fuente: Autor

En las Figuras 37 y 38 se puede apreciar el resultado final del proceso de modelamiento en donde se destacan los siguientes aspectos:

- Se aprecia el efecto de la sobre carga en el modelo con presencia de fluidos, gracias a la inicialización automática utilizada en el programa.
- Se observa que el perfil de presión no es constante como generalmente se asume para modelos en diferencias finitas, teniendo predominancia la presencia de un perfil.
- Pese al que el criterio de modelamiento es más robusto que el anterior, la incertidumbre asociada a las propiedades cargadas no da seguridad sobre la aplicación de un posible criterio de rotura.

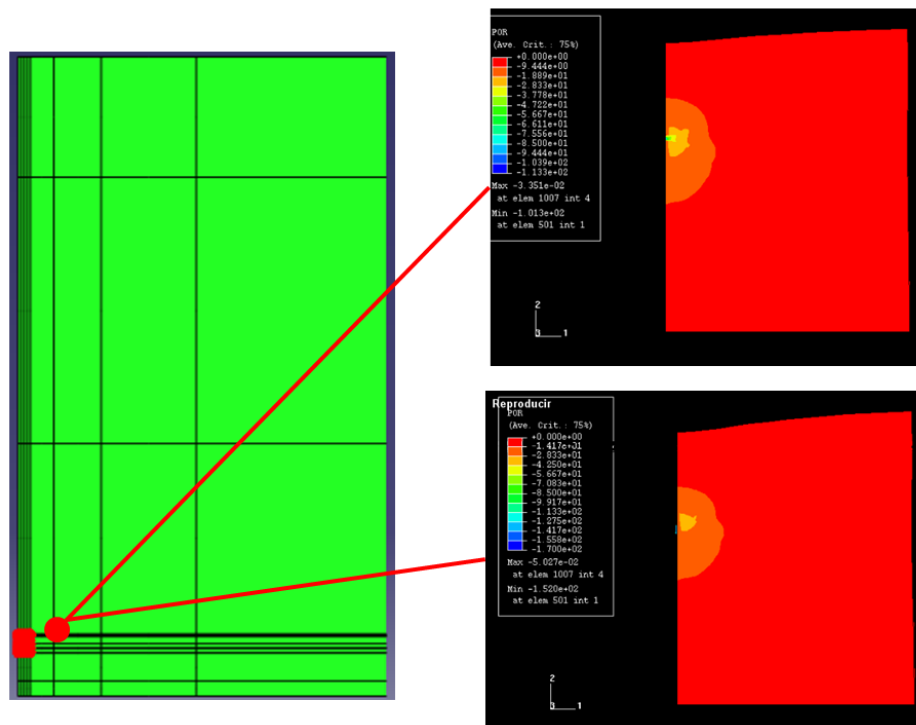


Figura 37. Resultado de la variación de los esfuerzos y la presión de poro. Se puede observar que el mapeo que se tiene de esta variable hace que no sea un valor constante como en el modelo planteado por Terán A. (14).

Fuente: Autor

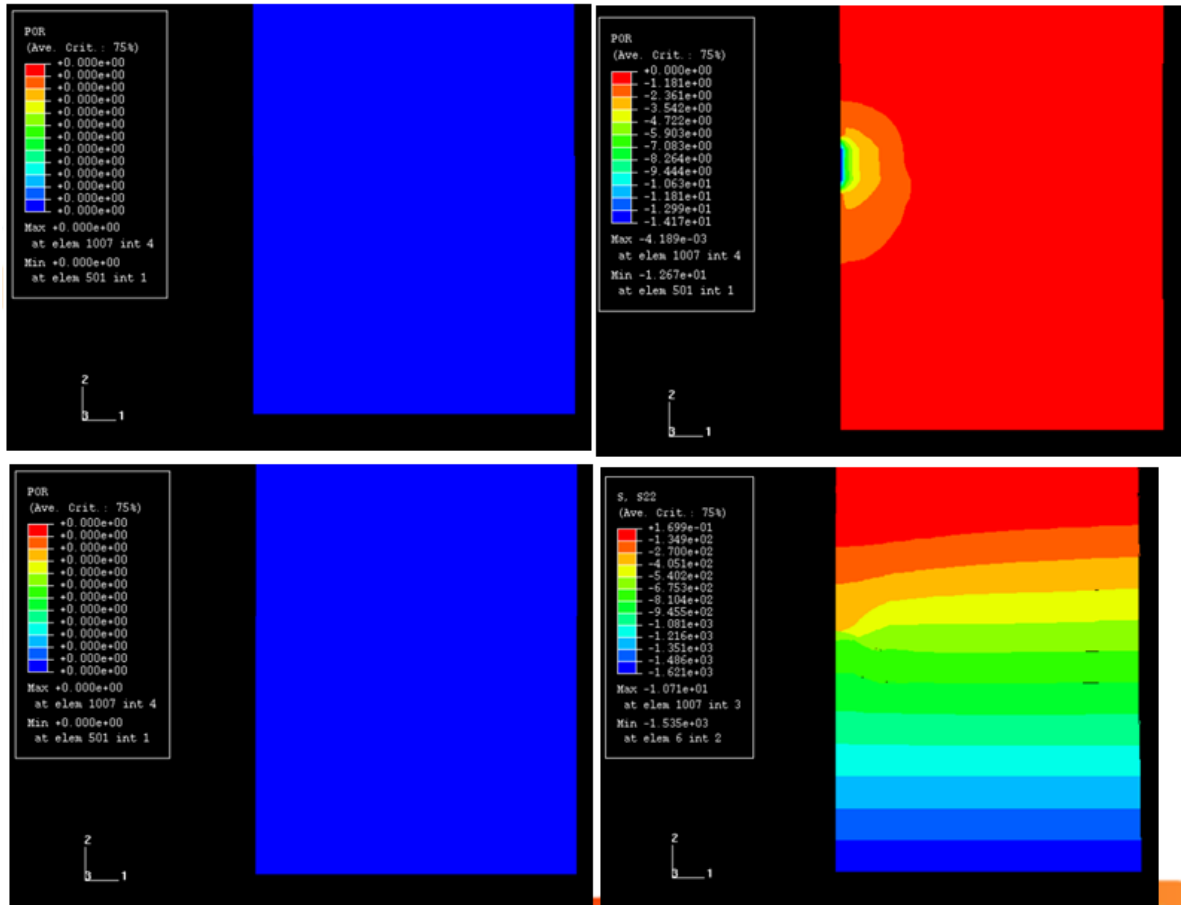


Figura 38. Perfil de esfuerzos en profundidad y variación de la presión de poro antes y después de la inicialización.

Fuente: Autor

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se pudo comparar a escala cualitativa el efecto de la porosidad y la saturación sobre el perfil de esfuerzos en las rocas haciendo sensibilidad respecto al peso del lodo y respecto al modelo de material utilizado, obteniendo mejores resultados cuando al involucrar la porosidad y la saturación de fluidos.

La técnica de MEF como herramienta de aproximación, mostró ser de utilidad a la hora de emular el comportamiento de un medio granular saturado con soporte en el modelo de Drucker – Prager extendido, en problemas estáticos.

Del Caso I se pudo establecer que, con el cambio de lodo, la zona de interés experimentó un nivel de mayor deformación con un peso de lodo más bajo debido al peso de la columna litostática presente. Las deformaciones presentes fueron mayores pero dado que el modelo era elástico, la capacidad de disipación de energía fue más elevada.

Del Caso I se pudo establecer que, con el cambio de lodo, la zona de interés experimentó un nivel de mayor de esfuerzos con el peso de lodo más alto siendo el orden de magnitud de la fuerza en la cara del pozo determinante para el nivel de penetración de los esfuerzos en dirección radial.

En el Caso II se pudo establecer que existe un perfil más detallado de la presión de poro. Los desplazamientos presentes tendieron a ser mayores y los esfuerzos en sitio se vieron afectados considerablemente por efecto de la presencia del fluido.

En el Caso II, la inclusión proceso de geoequilibrio inicial hizo más real la inicialización del modelo, permitiendo que se generen distribuciones de fuerzas que realmente obedecen a la presencia de fluidos en sitio.

Se logró establecer una metodología general para modelar pozos en medios poroelásticos saturados. Como derivación de esto, se logró definir dos flujos de trabajo dependiendo del nivel de profundidad en el análisis que se desee realizar. Sin embargo, también se encontraron limitaciones principalmente en la cantidad de información requerida para cargar los modelos.

Pese a que los modelos de material fueron suficientemente robustos y en 3D, no se logró modelar desviación de la trayectoria. Se aprovechó la simetría axial para generar por revolución los modelos sólidos en 3D.

7. RECOMENDACIONES

Desarrollar un programa que facilite la construcción de la DATA para casos donde el modelo es granular saturado.

Generar una metodología en ABAQUS que permita el modelaje geométrico de trayectorias más reales.

Alimentar un modelo con una base de datos más real y consecuente. Esta tarea puede ser complicada debido a que para ciertos parámetros se requieren pruebas triaxiales.

Explorar la interfaz de contacto usuarios y desarrollo de flujos de trabajo auxiliares en Python.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. http://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_de_medios_continuos
2. http://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_del_s%C3%B3lido_r%C3%ADgido
3. http://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_de_s%C3%B3lidos_deformables
4. http://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_de_fluidos
5. **Addis MA**; “The Stress-Depletion Response of Reservoirs”, artículo SPE 38720.
6. **Gertsma J**; “Land Subsidence Above Compacting Oil and Gas Reservoirs”; Artículo SPE 3730.
7. **Addis T, Last N, Boulter D, Roca-Ramisa L y Plumb D**; “The Quest for Borehole Stability in the Cusiana Field, Colombia,” Oilfield Review 5, no. 2 y 3 (Abril/Julio de 1993): 33–43.
8. **Aoki T, Tan CP y Bamford WE**; “Stability Analysis of Inclined Wellbores in Saturated Anisotropic Shales,” en Siriwardane HJ y Zaman MM (eds): Computer Methods and Advances in Geomechanics: Proceedings of the Eighth International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics; Morgantown, Virginia Oeste, EUA; 22 al 28 de mayo de 1999.
9. **McCann GD y Wilts CH**; “A Mathematical Analysis of the Subsidence in the Long Beach-San Pedro Area,” informe técnico, Instituto de Tecnología de California, Pasadena (Noviembre de 1951).

10. **Ali AHA, Brown T, Delgado R, Lee D, Plumb D, Smirnov N, Marsden R, Prado-Velarde E, Ramsey L, Spooner D, Stone T y Stouffer T**; “Observación del cambio de las rocas: modelado mecánico del subsuelo”; Oilfield Review 15, no. 2 (Otoño de 2003); 22–41.
11. **Sánchez, M. y Vásquez, A.** Introducción a la Geomecánica Petrolera; Caracas Venezuela; 1997.
12. **Tiab, D.** Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties. Gulf Publishing Co,1996
13. **Abass Hazim, Justo Neda**; ROCK MECHANICS IN WELLBORE CONSTRUCTION; 2003.
14. **Terán Julio, Claudia Patricia**; Acoplamiento de un modelo de flujo de fluidos y geomecánica con el análisis de estabilidad mecánica de pozos en yacimientos naturalmente fracturados. Aplicación a un caso colombiano; Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga; 2006.
15. **Zambrano, E.** Análisis geomecánico de un pozo de petróleo usando el método de elementos finites; Universidad Francisco de Paula Santander; San José de Cúcuta; 2008.
16. **Hutton, D. V**; Fundamentals of FINITE ELEMENT ANALYSIS. Singapore: McGraw-Hill; 2004.
17. **Maury, V. y Sauzay, J**; Boreholes Instability: Case Histories, Rock Mechanics Approach and Results”.; Artículo SPE 16051; 1987

18. **Chen, X. C.P Tan and C.M Haberfield**; A Comprehensive Practical Approach for Wellbore Instability Management; SPE 48898; 1998.

19 **Chen, X. C.P Tan and C.M Haberfield**; Wellbore Stability Analysis Guidelines for Practical Well Design; SPE 20058; 1996

20 **Santafé Rangel, Elkin Rodolfo**; Seminario de Mecánica Computacional orientada a la ingeniera de Petróleos. Universidad de Antioquia. Instituto Tecnológico Metropolitano; Medellín 2010

ANEXO A

DESCRIPCIÓN GENERAL DE ABAQUS

Abaqus 6.9 Student Edition fue el software utilizado en este trabajo. Abaqus es una suite de aplicaciones de software para el análisis por elementos finitos para la ingeniería asistida por ordenador. El nombre y el logotipo de este software se derivan de ábaco y la palabra griega, "abax" (ἄβαξ), que significa "tablero cubierto con arena".

Fue desarrollado hace más de 20 años por la empresa Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. (HKS)*. En la actualidad ABAQUS se utiliza en la industria automotriz, aeroespacial, otras industrias, y en el desarrollo de productos industriales. También el software es popular con las instituciones académicas y de investigación debido a la amplia capacidad de modelado de diferentes materiales y la capacidad del programa para personalizar los modelos desarrollados. ABAQUS puede ser utilizado para resolver problemas de resistencia de materiales, mecánica de fractura, ingeniería forense, procesos de conformado de metales, transferencia de calor, entre otros. En el caso del presente trabajo, sus capacidades en geotecnia han sido orientadas a la aplicación en problemas de industria de los hidrocarburos.

* <http://www.simulia.com/>

ABAQUS se encuentra dividido en cuatro módulos:

- **ABAQUS/CAE**, módulo interactivo para la creación de modelos de elementos finitos. A través de este módulo se puede implementar un modelo de forma sencilla y rápida.
- **ABAQUS/Standard**, para resolución de problemas de propósito general. Incluye todas las posibilidades de análisis excepto el análisis dinámico.
- **ABAQUS/Explicit**, para resolución de problemas de tipo dinámico. Es poderoso por su eficiencia computacional en grandes modelos, y también altamente efectivo para aplicaciones cuasi-estáticas.
- **ABAQUS/Viewer**, módulo de visualización de soluciones. Muestra los resultados obtenidos una vez resuelto el problema.

Los bloques de ABAQUS utilizan el código abierto de lenguaje Python para secuencia de comandos y la personalización. ABAQUS / CAE se soporta en [Fox-toolkit](#)* para el desarrollo de entorno gráfico GUI**.

* http://en.wikipedia.org/wiki/Fox_toolkit

** Interfaz gráfica con el usuario (del inglés *Graphical User Interface*)

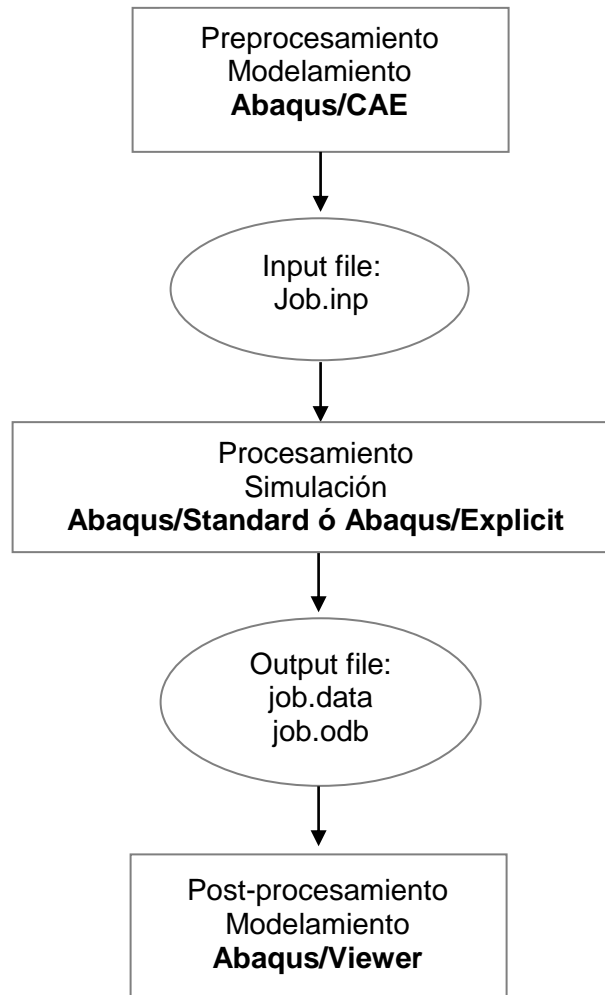


Figura A1. Diagrama que asocia las etapas básicas de un proyecto de mecánica computacional con la suite ABAQUS.

ABAQUS está estructurado en tres grandes bloques, en correspondencia con las tres etapas en que se divide un problema para ser analizado por el Método de Elementos Finitos (preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento Figura A1).

Preprocesamiento

En esta etapa se introduce el archivo de entrada, que se puede crear de forma interactiva utilizando Abaqus/CAE, que genera internamente el archivo de texto, o mediante un editor de texto, donde el archivo es escrito directamente por el usuario.

Los archivos *.data que se utilizan para definir el modelo de elementos finitos son:

- **Geometría.** La geometría es lo primero que se introduce y debe representar lo más fielmente posible el cuerpo real que se va a estudiar. ABAQUS permite realizar modelos de geometría muy compleja, gracias al módulo ABAQUS/CAE. La geometría, así como el mallado de un modelo, se define mediante los elementos y sus nodos.
- **Material.** El modelo que se va a implementar puede estar formando de varios materiales. Se deben definir las propiedades de los distintos materiales de los que está formado nuestro modelo, y se deben asociar a las partes de la geometría a las que correspondan.
- **Partes y ensamblaje.** La geometría del modelo se puede definir organizándola en partes, por lo tanto, hay que introducir en el archivo de entrada la relación que existe entre esas partes, además de la posición relativa de unas respecto de las otras. Esto se lleva a cabo a través de un procedimiento conocido como ensamblaje.
- **Condiciones iniciales.** Se deben especificar las condiciones iniciales del modelo. En ocasiones, es necesario especificar condiciones iniciales distintas de cero para tensiones, temperaturas, velocidades, entre otros.

- **Condiciones de contorno.** El modelo puede estar sometido a ciertas imposiciones por parte de su entorno que deben ser especificadas en el archivo de entrada. Se pueden imponer restricciones del movimiento, valores de desplazamientos y rotaciones o condiciones de simetría.
- **Interacciones.** En ocasiones el modelo que se desea estudiar puede estar formado por varios cuerpos que en un momento dado sufren una interacción o un contacto. Abaqus permite también realizar modelos de este tipo.
- **Definiciones de amplitud.** Ciertos estados de carga y condiciones de contorno pueden estar definidos en función del tiempo, por lo tanto se deben introducir los parámetros de las curvas que definen esos estados de cargas y condiciones de contorno.
- **Propiedades del entorno.** Se pueden definir las características del entorno, como puede ser la humedad, temperatura, presión, entre otros.
- **Continuación de análisis.** Consiste en introducir resultados de análisis previos para continuar buscando resultados con el nuevo modelo.

Procesamiento

Después de introducir el archivo de entrada en el programa, se procede a la resolución del modelo. Se hace mediante Abaqus/Standard ó Abaqus/Explicit. Esta fase es interna y en ella Abaqus no interacciona con el usuario.

Postprocesamiento

Una vez que Abaqus ha resuelto el modelo, los resultados de la simulación se ven a través del módulo de visualización, el cual lee el archivo de datos de salida (*output file*), y es capaz de crear animaciones de la simulación, gráficas X - Y,

tablas de resultados, etc. La visualización de los resultados es una de las actividades más comunes de cualquier tarea del post-proceso. Se puede hacer en Abaqus/CAE, ó Abaqus/ Viewer, siendo este último el realmente orientado para esta tarea.

Tabla A1. Caracterización de los tipos de archivos en ABAQUS

Tipo de Archivo	Definición	Observación
Archivo de entrada		
<i>Inputname.inp</i>	Archivo de entrada	No hay observación
Archivos de Salidas		
<i>Job.dat</i>	Archivo de impresión de las salidas	Creados por defecto, pero sus contenidos son controlados por el usuario
<i>Job.msg</i>	Archivo de mensajes	
<i>Job.sta</i>	Archivo de estatus	
<i>Job.obd</i>	Archivo para la base de datos de salida	
<i>Job.log</i>	Archivo de registro	No hay observación
<i>Job.fin</i>	Archivo de resultados en formato ASCII	No hay observación
<i>Job.fil</i>	Archivo de resultados en formato binario	
<i>Job.abq</i>	Archivo para restaurar un proceso	Archivos para Abaqus/Explicit
<i>Job.sel</i>	Archivo de resultados seleccionados	
Archivos para la recuperación de resultados		
<i>Job.res</i>	Archivo para restaurar un proceso	Son creados automáticamente por el programa
<i>Job.stt</i>	Archivo para recuperar una solución	
<i>Job.prt</i>	Archivo para recuperar una solución	
<i>Job.mdl</i>	Archivo para recuperar una solución	
Archivos necesarios para ejecutar un proceso		
<i>Job.com</i>	Archivo de escritura usado para correr el análisis	No hay observación
<i>Job.ipm</i>	Archivos del programa	
Archivos temporales		
<i>Job.cid</i>	Archivos temporales	Creados durante el análisis y una vez concluido son borrados
<i>Job.lck</i>	Archivos temporales	
<i>Job.023</i>	Archivos temporales	

El método de los elementos finitos supone que el comportamiento mecánico de un continuo, está conformado por un número finito de partes o elementos. Sobre estas partes o elementos son consideradas las propiedades del material y las relaciones constitutivas, donde a su vez, estos elementos se encuentran

conectados entre sí por un número discreto de puntos llamados nodos, localizados en sus contornos.

ABAQUS presenta una extensa librería de elementos finitos que proporciona una herramienta robusta para la solución de una gran variedad de problemas. A continuación se describirá las características más resaltantes de algunos elementos.

CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS

Cada elemento finito en Abaqus tiene un único nombre que caracteriza su comportamiento, a través de las siguientes definiciones:

- ❖ Familia
- ❖ Grados de libertad
- ❖ Números de nodos
- ❖ Formulación
- ❖ Integración

Las *familias* de elementos que son usadas en un análisis de esfuerzos es la siguiente: Elementos sólidos continuos, elementos shell, elementos tipo viga, elementos rígidos, elementos de membrana, elementos infinitos, elementos conectores tales como muelles y amortiguadores, elementos Truss. La primera letra o letras del nombre de un elemento de la librería indican la familia a la que pertenece.

Los *grados de libertad* son variables fundamentales calculadas durante un análisis. Estos grados de libertad están íntimamente relacionados con la familia del elemento.

El orden de interpolación es determinado por el *número de nodos* usados en el elemento, por ejemplo, los elementos que tienen nodos solo en las esquinas usan interpolación lineal y son llamados elementos lineales o elementos de primer orden, Figura A2(a). En Abaqus/Standard los elementos con nodos intermedios usan interpolación cuadrática y son llamados elementos cuadráticos o elementos de segundo orden, Figura A2(b). Los elementos triangulares o tetraédricos modificados, usan interpolación de segundo orden modificado.

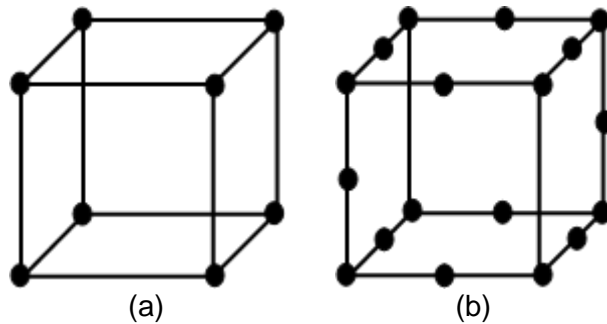


Figura A2. Elementos lineales y cuadráticos.

Tabla A2. Orden de interpolación de los elementos

Elementos de primer orden	Elementos de segundo orden	Elementos modificados
<p>Estos elementos deben ser usados con cautela, ya que los elementos triangulares y tetraédricos serán evitados en problemas de análisis de esfuerzos. Estos elementos presentan una baja convergencia con el refinamiento de la malla, el cual es especialmente un problema con los tetraedros. Si estos elementos son usados, una malla extremadamente fina debe ser usada para obtener resultados confiables.</p>	<p>En Abaqus/Standard estos elementos son más exactos que los de primer orden para problemas uniformes que no involucren condiciones de contacto complejas, impacto o varios elementos distorsionados. Para problemas de concentración de esfuerzos son más efectivos y son mejor para el modelado de la geometría, por ejemplo una superficie curva puede ser modelada con menos elementos</p>	<p>En Abaqus/Standard los elementos triangulares y tetraédricos modificados serán usados en problemas de contacto que usen por defecto "Hard contac". Estos también funcionan mejor en análisis de impacto, análisis que involucren respuesta incomprensible del material, y en análisis que requieren grandes elementos distorsionados, como por ejemplo respuesta de componentes de goma. Estos elementos son incompatibles con el elemento sólido de segundo orden.</p>

La *formulación* del elemento se refiere a la matemática usada para definir su comportamiento. Abaqus presenta dos opciones, la primera es usada para los análisis de esfuerzos/desplazamientos y está basada en la formulación *Lagrangiana*. El segundo tipo de formulación es la *Euleriana* o espacial, la cual se usa para análisis de mecánica de los fluidos.

En cuanto a la *integración* Abaqus emplea técnicas numéricas para integrar sobre el volumen de cada elemento, la cuadratura Gaussiana es la más usada para los elementos. ABAQUS evalúa la respuesta del material para cada punto de

integración en cada elemento. Algunos elementos continuos pueden usar integración completa o reducida, y esta decisión puede tener un significativo efecto sobre la exactitud de los resultados. ABAQUS usa la letra R al final del nombre del elemento para identificar a los elementos que usan integración reducida.

Tabla A3. Comparación entre los tipos de integración asociada a los elementos

Elementos con integración completa o Reducida	Elementos con integración reducida de primer y segundo orden
<p>La integración reducida usa un orden de integración menor que la completa. Permite reducir el tiempo de análisis, especialmente en 3D. Por ejemplo el C3D20 tiene 27 puntos de integración, mientras que C3D20R tiene solo 8, por lo tanto el ensamblaje es aproximadamente 3.5 veces más costoso para el C3D20 que para el C3D20R.</p>	<p>Los elementos con integración reducida de segundo orden en Abaqus/Standard generalmente producen más exactitud en los resultados que los correspondientes elementos con integración completa. Para elementos de primer orden, la exactitud lograda frente a la completa o reducida depende de la naturaleza del problema.</p>
<p>En Abaqus/Standard el usuario puede elegir entre integración completa o reducida para elementos cuadriláteros o hexaédricos.</p>	<p>En Abaqus/Explicit solo los elementos continuos cuadriláteros o hexaédricos de primer orden con integración reducida están disponibles.</p>

ELEMENTOS SEGÚN EL TIPO DE ANÁLISIS

Elementos para el análisis de esfuerzos/desplazamiento

Son usados en el modelado de análisis mecánico lineal o no lineal con posibilidad de involucrar contacto, plasticidad y grandes deformaciones. También puede ser usado para análisis de esfuerzos térmicos, donde la historia de temperatura puede ser obtenida desde un análisis de transferencia de calor. Los tipos de análisis son:

- Estáticos y cuasi-estáticos.
- Dinámicos implícito, dinámicos explícitos, análisis dinámico modal.
- Acústicos, shock, análisis acústicos – estructurales.
- Mecánica de la fractura.

Estos elementos están disponibles para las siguientes aplicaciones: Elementos Continuos, estructurales, rígidos, conectores, elementos de propósitos especiales y de contacto.

Elementos de presión de poros

Se usan para modelar completa o parcialmente un fluido saturado fluyendo a través de un medio poroso deformado. Estos elementos no pueden ser usados con elementos hidrostáticos. Los tipos de análisis son:

- Análisis geostáticos.
- Análisis de esfuerzos con difusión de fluidos.

Los elementos de presión de poros solo pueden ser usados en la siguiente familia de elementos: Elementos sólidos continuos.

Elementos acoplados de temperatura - desplazamiento

Se usan para problemas en los cuales el análisis de esfuerzos depende de la temperatura y el análisis térmico depende del desplazamiento. Los tipos de análisis son:

- Análisis de temperatura – desplazamiento.

Estos elementos están disponibles para: Elementos Continuos, truss, shell, contacto Gap y contacto de líneas de deslizamiento.

Elementos transferencia de calor

Disponibles para Abaqus/Standard, permite almacenar (heat storage) calor así como conducirlo. Los tipos de análisis son:

f Análisis de transferencia de calor, incluyendo el modelado de “Cavity Radiation”.

Elementos piezoeléctricos

Se usan para problemas en los cuales un acoplamiento entre esfuerzos y potencial eléctrico es requerido. Los tipos de análisis son:

- Análisis piezoeléctricos.

Estos elementos son variables en las distintas familias de elementos: Elementos Continuos y elementos truss.

Elementos acústicos

Se usan para modelar un medio acústico bajo pequeños cambios de presión. La solución en un medio acústico está definida por una variable de presión. Los tipos de análisis son:

- Acústico, shock.
- Análisis acoplado acústico – estructural.

Estos elementos son variables en las distintas familias de elementos: Elementos Continuos, elementos infinitos y elementos con interfaces acústicas.

Materiales

Los materiales son definidos a partir de la selección del material y la definición de los requerimientos necesarios para establecer su comportamiento, además está permitido combinar comportamientos de materiales como por ejemplo Elasticidad – Plasticidad.

Abaqus ofrece una amplia librería de materiales que permiten la simulación de modelos con características lineales, no-lineales, materiales isotrópicos y anisotrópicos. El uso de integración numérica en los elementos incluye integración numérica a lo largo de la sección transversal en Shells y Vigas, proporcionando mayor flexibilidad para analizar estructuras más complejas.

El comportamiento del material es definido dentro de las siguientes categorías generales:

- Propiedades generales (Amortiguamiento del material, densidad, expansión térmica).
- Propiedades elásticas.
- Propiedades inelásticas.
- Propiedades térmicas.
- Propiedades acústicas.
- Propiedades para fluidos hidrostáticos.
- Propiedades de difusión de masa.
- Propiedades eléctricas.
- Ecuaciones de estado.

Propiedades elásticas

La librería de Abaqus para definir los diferentes tipos de materiales incluye varios modelos que permiten representar el comportamiento elástico. Los materiales se clasifican en las siguientes categorías:

- Elasticidad lineal
- Elasticidad en materiales porosos
- Hipoelasticidad
- Hiperelasticidad
- Viscoelasticidad
- Histéresis
- Ecuación de estado

Propiedades inelásticas

La mayoría de los materiales usados en la ingeniería inicialmente responde elásticamente, el comportamiento elástico significa que la deformación es completamente recuperable cuando la carga es removida, es decir, el espécimen retorna a su forma original, si la carga excede algún límite (carga de cedencia) la deformación no es completamente recuperada, alguna parte de la deformación permanece cuando la carga es removida. Las teorías presentadas en Abaqus han sido desarrolladas y validadas en metales, sin embargo pueden ser aplicadas en sólidos, concreto, roca, hielo, etc., ya que los conceptos fundamentales de dichas teorías son suficientemente generales que los modelos basados sobre estos conceptos han sido desarrollados satisfactoriamente para un amplio rango de materiales. La gran mayoría de los modelos en Abaqus son incremental donde la tasa mecánica de deformación está dividida en una parte elástica y una parte inelástica. Los modelos de plasticidad son usualmente formulados en términos de: Superficie de cedencia, regla de flujo y leyes de evolución.

La librería de Abaqus para definir los diferentes tipos de materiales incluye varios modelos los cuales se clasifican en las siguientes categorías:

- Plasticidad clásica en metales
- Modelos para metales sujetos a cargas cíclicas
- Rate-dependent yield
- Annealing ó Melting
- Creep y Swelling
- Plasticidad de Jonson-Cook
- Modelos de falla dinámicos
- Plasticidad de metal poros
- Plasticidad de hierro fundido
- Viscoplasticidad
- Modelo constitutivo ORNL
- Deformación plástica
- Modelo de plasticidad de Drucker-Prager extended.
- Modelo de plasticidad de Drucker-Prager/Cap modificado.
- Modelo de plasticidad de Mohr-Coulomb.
- Modelo de plasticidad de Clay.
- Plasticidad de espuma deformable.
- Material articulado.
- Concreto.
- Daño progresivo y falla

Ecuaciones para análisis de tensiones y deformaciones

A continuación se expondrán las ecuaciones de las cuales parte el método para el análisis de tensiones y deformaciones, y la manera de transformarlas para llegar a su resolución. Se parte de las ecuaciones que definen el problema elástico para un sólido deformable:

Equilibrio:

$$\sigma_{ij,j} + X_i = 0$$

Compatibilidad:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$$

Comportamiento:

$$2G\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij}$$

Donde ε_{ij} es el tensor de deformaciones, $\sigma_{ij,j}$ es el de tensiones, u son los desplazamientos, X son las fuerzas por unidad de volumen, y G, λ constantes del material.

A este conjunto de ecuaciones habrá que sumarle unas condiciones de contorno para que el problema quede definido. Dichas condiciones son:

$$u_i = \bar{u}_i \text{ en } \partial D_u$$

$$T_i^{n^e} = \bar{t}_i \text{ en } \partial D_t$$

$$\partial D = \partial D_t + \partial D_u$$

Donde ∂D_u es la parte del contorno en la que imponemos condiciones en desplazamientos, y ∂D_t es la parte donde imponemos condiciones de contorno en tensiones. $T_i^{n^e}$ es la tensión según la normal exterior n^e , y u_i el desplazamiento. Las magnitudes con barra son las conocidas, es decir, las que se imponen en el contorno. Por otra parte, si se define un campo de funciones de desplazamientos ψ sobre el dominio D , se puede obtener la siguiente expresión del Teorema de los Trabajos Virtuales, en notación matricial:

$$\int_D \varepsilon \psi^T \sigma dv = \int_D \psi^T X dv + \int_{\partial D} \psi^{cT} t^c ds$$

Donde σ , X y t^c constituyen un sistema de tensiones, fuerzas de volumen y vectores tensión sobre el contorno en equilibrio, y ε^ψ , ψ y ψ^c un sistema de deformaciones y desplazamientos en el volumen y en el contorno compatibles entre sí, aunque no necesariamente relacionado con el sistema de tensiones en equilibrio.

El resultado es una única ecuación en forma matricial, y en función únicamente de los desplazamientos. Dichos desplazamientos se pueden poner de la forma:

$$u = \Phi \cdot a$$

Donde ϕ es una de las funciones de forma llamadas de pequeño soporte, es decir, son funciones especiales distintas de cero solo en las proximidades del nodo en cuestión, y que tienen la ventaja de que pueden ser aplicadas a cualquier tipo de dominio una vez que sobre este se ha definido una malla. Esta versatilidad de las funciones de pequeño soporte tiene suma importancia en el caso 3D donde encontrar funciones definidas sobre todo el dominio que permitan satisfacer las condiciones de contorno resulta prácticamente imposible. Aproximando por tanto los desplazamientos por esta expresión, y una vez elegidas las funciones ψ y ϕ (iguales en elementos isoparamétricos) se llega a una expresión del tipo:

$$K \cdot a = F$$

El vector solución a representa los desplazamientos de cada uno de los nodos, y la matriz K se corresponde con las distintas rigideces elementales. De este modo, la submatriz K_{ij} relaciona las fuerzas que aparecen en el nodo i al dar un desplazamiento unidad en el nodo j . Este sistema de ecuaciones está formado por $n \cdot m$ ecuaciones e incógnitas, siendo n el número de nodos de la discretización, y m el número de grados de libertad por nodo.

ANEXO B

FLUJOS DE TRABAJO EN ABAQUS

FLUJO DE TRABAJO EN ABAQUS GUI

I - Sistema coordenado

El sistema coordenado usado por el programa de elementos finitos es el sistema cartesiano, cuyo convenio de signo positivo se muestra en la figura xxxxxxxx, y debe coincidir con la regla de la mano derecha. Abaqus permite elegir otro sistema localmente, ya sea para las salidas referidas a variables nodales (desplazamiento, aceleración, esfuerzos, etc.), condiciones de carga, restricciones y especificaciones de material de las secciones.

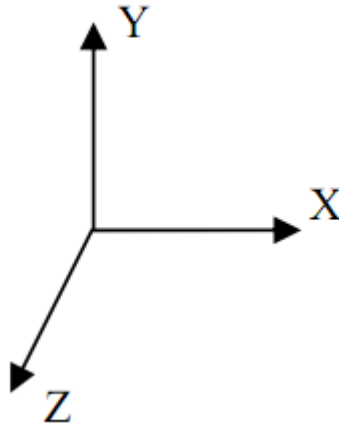


Figura B1. Sistema coordenado

II - Grados de libertad

El programa considera los grados de libertad que se muestran a continuación.

1. Desplazamiento en x
2. Desplazamiento en y
3. Desplazamiento en z
4. Rotación a través del eje x
5. Rotación a través del eje y
6. Rotación a través del eje z
7. Distorsión de amplitudes (para secciones abiertas de elementos de viga).
8. Presión de poro
9. Potencial eléctrico
10. Temperatura (ó concentración normalizada en análisis de difusión de masiva)
11. Segunda temperatura (para elementos Cascaron o Vigas)
12. Tercera temperatura (para elementos Cascaron o Vigas)

Para Abaqus las direcciones $x - y - z$, coincide con las direcciones globales $X - Y - Z$, respectivamente; sin embargo, si una transformación local es definida a un nodo, las direcciones globales coinciden con las direcciones locales definidas.

III - Creando una parte

Se usa el módulo *Part* para crear cada una de las partes que se han de analizar. Se comienza creando un cuerpo sólido unidimensional, bidimensional o tridimensional. Después automáticamente se abre el *Sketcher*, ventana cuadriculada en donde se dibujan los perfiles de las partes a extruir.

Nota: ABAQUS/CAE a menudo muestra un corto mensaje ó *Prompt* en el área de aviso indicando cual es el próximo paso que se debe seguir

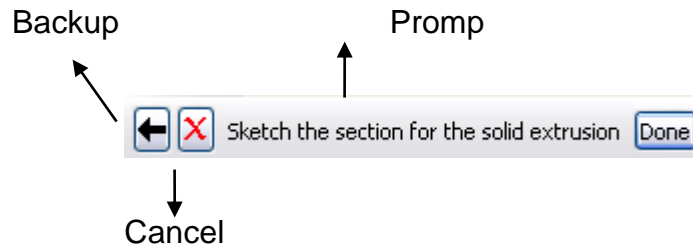


Figura B2. Mensajes e instrucciones desplegadas en el área de aviso
Fuente: Autor

Si se hace clic en el botón Cancel, se cancela la tarea en ejecución. Si se hace clic en el botón Backup, cancela el paso en ejecución y retorna al paso previo.

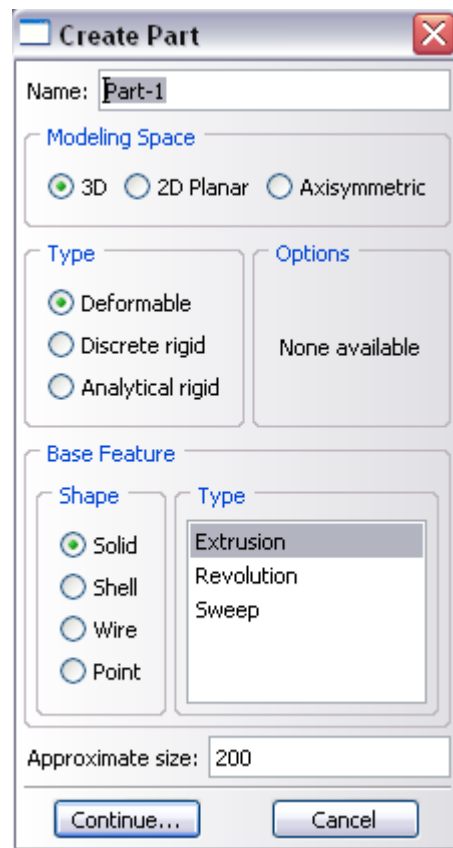


Figura B3. Caja de diálogo para crear la parte

IV - Creando un material

Se usa el módulo *Property* para crear un material y definir sus propiedades.

1. En la lista de módulos que se encuentra en la barra de herramientas, seleccionar *Property* para entrar en el módulo de propiedades.
2. En la barra del menú, seleccionar Material → Create para crear un material nuevo; el cuadro de diálogo *Edit Material* aparece.
3. En la caja de diálogo *Edit Material*:

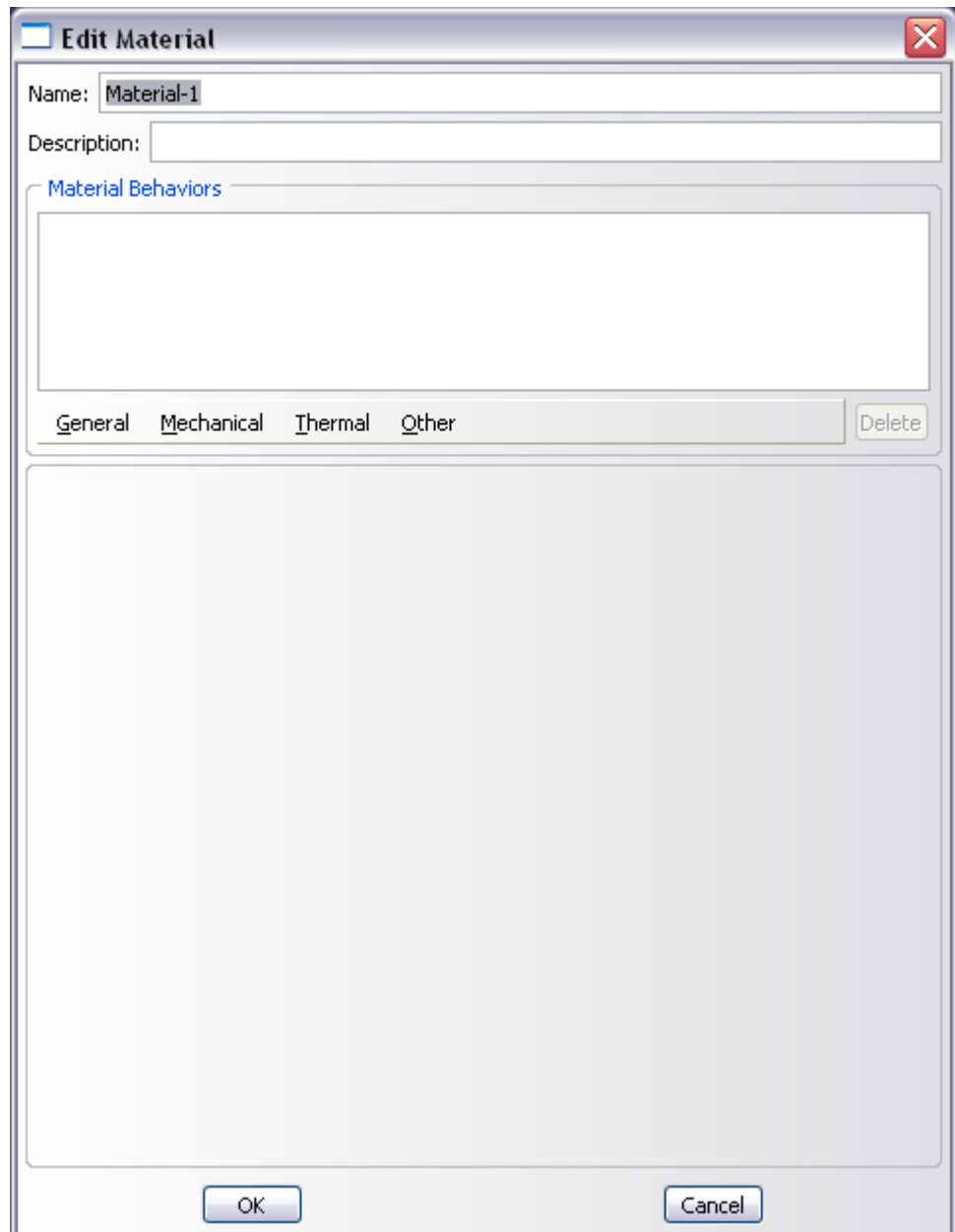


Figura B4. Caja de dialogo de crear un nuevo material

- a. Nombrar al material.
- b. Usar la barra del menú del editor del material que aparece dentro del área de opciones de material (Material → Options). Algunos de los items contienen submenús.
- c. Después de escoger el material a usar se escriben las propiedades necesarias para cada tipo de material.

V - Definiendo y asignando las propiedades a la sección

Se definen las propiedades de la sección de un modelo creando secciones en el módulo *Property*. Después de crear la sección, se puede usar uno de los siguientes dos métodos para asignar la sección a la parte creada.

- Se puede simplemente seleccionar una región de la parte creada y asignar la sección a la región seleccionada, ó
- Se puede hacer uso del conjunto de herramientas para crear un grupo homogéneo que contenga la región y asignar la sección al grupo.

VI - Definiendo una sección sólida homogénea

Una sección sólida homogénea es el tipo de sección más simple que se puede definir; esta incluye solamente una referencia del material y un espesor del plano esfuerzo / deformación.

1. En la barra de menú, seleccionar Section → Create o de la caja de herramientas del módulo hacer clic en la herramienta para crear la sección. El cuadro de diálogo *Create Section* aparece.

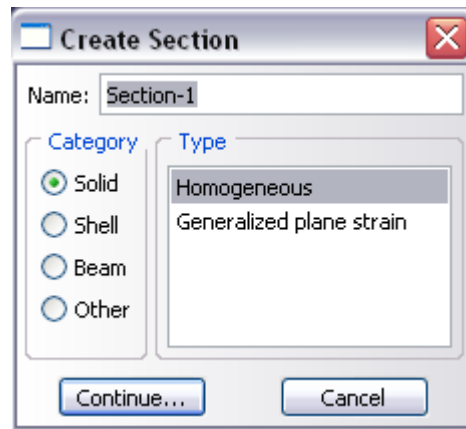


Figura B5. Caja de diálogo para crear la sección

2. En el cuadro de diálogo *Create Section*:

- a. Nombrar la sección.
- b. En la lista *Category* se escoge dependiendo de la parte creada.
- c. En la lista *Type* aceptar *Homogeneous* como la selección por omisión del tipo, o si se necesita se elige la opción más adecuada.
- d. Hacer clic sobre *Continue*.

VII - Ensamblaje del modelo

Cada parte que se crea está orientada en su propio sistema coordinado y es independiente de las otras partes en el modelo. Haciendo uso del módulo *Assembly* se puede definir la geometría del modelo finalizado, a través de la creación de instancias (*Instances*) de una parte y luego mediante la ubicación relativa de ellas con respecto a otras, ensamblarlas en un sistema global de coordenadas.

ABAQUS/CAE coloca la instancia de modo que el origen del dibujo que se definió, coincida con el sistema de coordenada global.

Para ensamblar el modelo se sigue el siguiente procedimiento:

1. En la lista de módulos, seleccionar *Assembly* para entrar al módulo de ensamblaje.
2. De la barra del menú, seleccionar Instance → Create ó de la caja de herramientas del módulo para ensamblar el modelo. El cuadro de diálogo *Create Instance* aparece.
3. En el cuadro de diálogo *Create Instance*, aceptar en *Parts* la selección por defecto si solo hay una parte y hacer clic sobre OK.

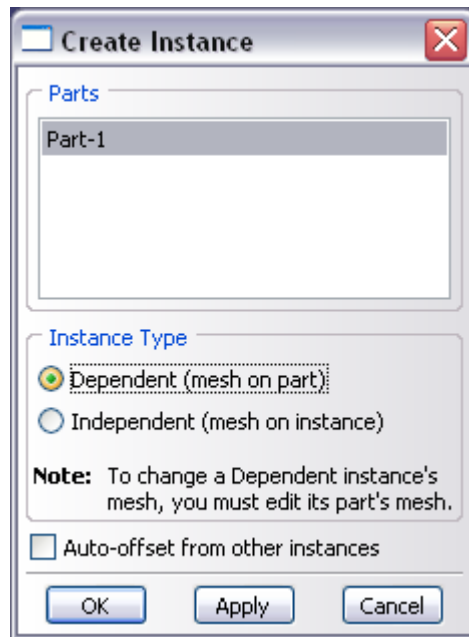


Figura B6. Caja de diálogo para ensamblar el modelo

VIII - Configurando el análisis

Ahora que se tiene la parte creada, se puede pasar al módulo *Step* para configurar el análisis. ABAQUS/CAE genera el paso inicial automáticamente, pero se debe usar el módulo *Step* para crear los demás pasos del análisis. El módulo *Step* también permite solicitar la salida para cualquier paso en el análisis.

Creando un paso de análisis

Se usa el menú *Step* para crear un paso estático general que sigue al paso inicial del análisis.

Para crear un paso estático general:

1. En la lista de módulos, seleccionar *Step* para entrar al módulo de pasos.
2. En la barra del menú principal, seleccionar *Step* → *Create*. El cuadro de diálogo *Create Step* aparece con una lista de todos los procedimientos generales y el nombre del paso por defecto *Initial*. Se debe recordar que los procedimientos de análisis general son aquellos que pueden ser usados en análisis de respuesta lineal y no lineal.

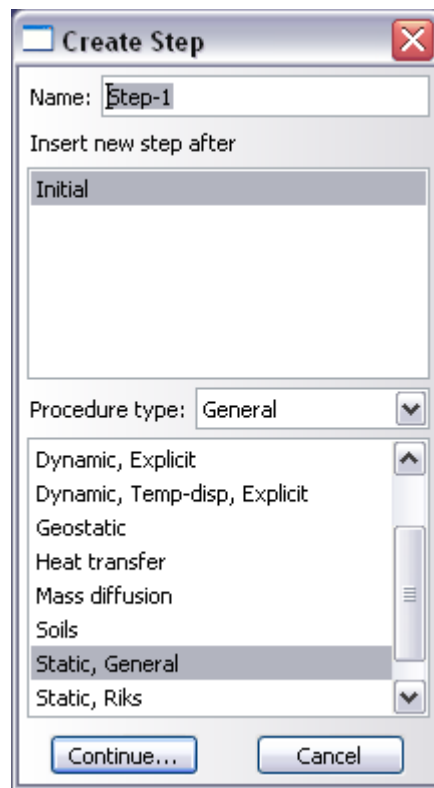


Figura B7. Caja de diálogo para crear los pasos de tiempo

3. Nombrar al paso.
4. De la lista de procedimientos generales disponibles en el cuadro de diálogo *Create Step*, seleccionar *Static General* si este no está seleccionado, y hacer clic en *Continue*.
5. El cuadro de diálogo *Edit Step* aparece con las opciones por defecto para un paso estático general.
6. Hacer clic sobre *OK* para crear el paso y salir del cuadro de diálogo *Edit Step*.

Salida de datos

Cuando el modelo es sometido al análisis ABAQUS/Standard ó ABAQUS/Explicit escribe los resultados del análisis en una base de datos de salida. Adicionalmente, si se crea un paso el programa genera automáticamente un grupo de salidas por defecto, pero necesariamente estas no tienen que ser las que el analista requiere. Por lo tanto, para cada paso creado, el usuario puede usar el Field Output Request Manager y el History Output Request Manager para hacer lo siguiente:

- Seleccionar las variables que ABAQUS escribirá en la base de datos de salida.
- Seleccionar los puntos de la sección del elemento para los cuales ABAQUS generara los datos.
- Seleccionar la región del modelo para la cual ABAQUS generara los datos.
- Cambiar la frecuencia con la que el ABAQUS escribirá la data en la base de datos

Cuando se crea un paso, ABAQUS/CAE genera por defecto una salida requerida para el paso.

IX - Aplicando condiciones de borde y cargas al modelo

Las condiciones de borde y las cargas dependen del paso, lo que significa que se debe indicar en qué paso ó pasos estas condiciones estarán activas. Una vez que se han definido los pasos del análisis, se puede usar el módulo Load para definir las condiciones específicas, como presiones, condiciones de borde, cargas, etc.

Aplicando una condición de borde

Se usa el menú BC ó las herramientas del módulo para crear una condición de borde.

Para aplicar las condiciones de borde:

1. En la lista de módulos, seleccionar Load para entrar a dicho módulo.
2. De la barra del menú, seleccionar BC → Create ó de la caja de herramienta del módulo, hacer clic en el icono correspondiente para crear la condición de borde. La caja de diálogo *Create Boundary Condition* aparece.

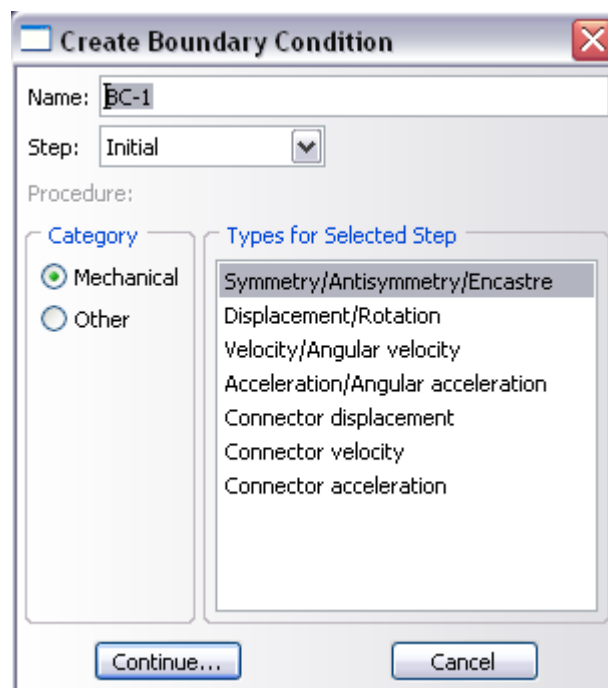


Figura B8. Caja de diálogo para crear las condiciones de borde

- a. Nombrar a la condición de borde.
- b. De la lista de pasos Step, seleccionar Initial como el paso en el cual la condición de borde será activada.

c. En la lista *Category*, elegir la categoría apropiada para el modelo que se este creando.

d. En la lista *Type for Selected Step*, elegir la condición de borde para el paso seleccionado y hacer clic en Continue.

Aplicando una carga

Para aplicar una carga:

1. De la barra del menú, seleccionar Load → Create. La caja de diálogo Create Load aparece

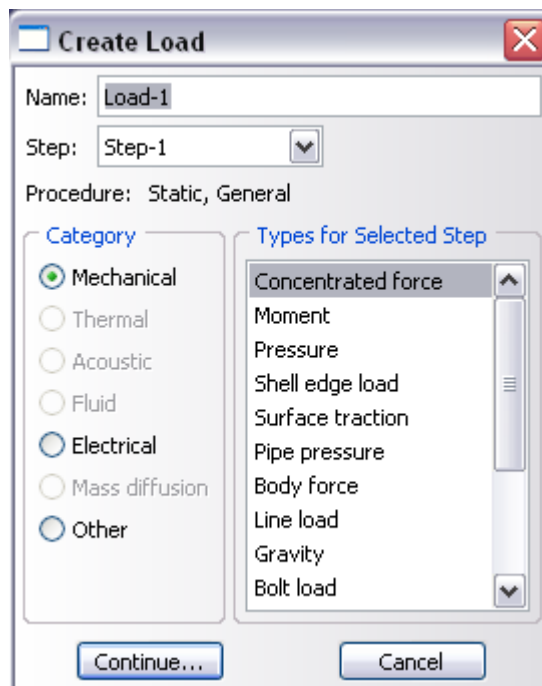


Figura B9. Caja de diálogo para crear una carga

2. En la caja de diálogo Create Load:

a. Nombrar a la carga.

b. De la lista de pasos Step, seleccionar el *Step* como el paso en cual la carga será activada.

c. En la lista Category, elegir la categoría del modelo que se este realizando.

d. En la lista Type for Selected Step, seleccionar la carga que se desea instalar para el paso seleccionado, y hacer clic en Continue.

X - Mallando el modelo

El módulo Mesh se usa para generar la malla de elementos finitos. Se puede seleccionar la técnica de mallado que ABAQUS/CAE usará para crear la malla, la forma del elemento y el tipo del elemento. ABAQUS/CAE usa diferentes técnicas para hacer el mallado. La técnica de mallado por defecto, asignada al modelo, está indicada por el color del modelo cuando se entra al módulo Mesh; si ABAQUS/CAE muestra el modelo en color anaranjado, este no puede ser mallado sin asistencia del usuario.

Para asignar los controles del mallado

1. En el listado de módulos, hacer clic sobre Mesh para entrar en el módulo de mallado.

2. En la barra del menú, seleccionar Mesh → Controls ó de la caja de herramienta del módulo, hacer clic en la herramienta correspondiente.

El cuadro de diálogo Mesh Controls aparece. ABAQUS/CAE colorea las regiones del modelo para indicar cual técnica se usara para mallar esa región.



Figura B10. Caja de dialogo para asignar los controles de mallado

3. En el cuadro de diálogo, en Element Shape, aceptar Hex como la selección de la forma del elemento por omisión. O si se requiere se elige el elemento más apropiado para el tipo de análisis que se realice.

4. Hacer clic en OK para asignar los controles del mallado y cerrar el cuadro de diálogo.

Asignando un tipo de elemento de ABAQUS

Se usa la caja de diálogo *Element Type* para asignar un elemento particular de ABAQUS al modelo.

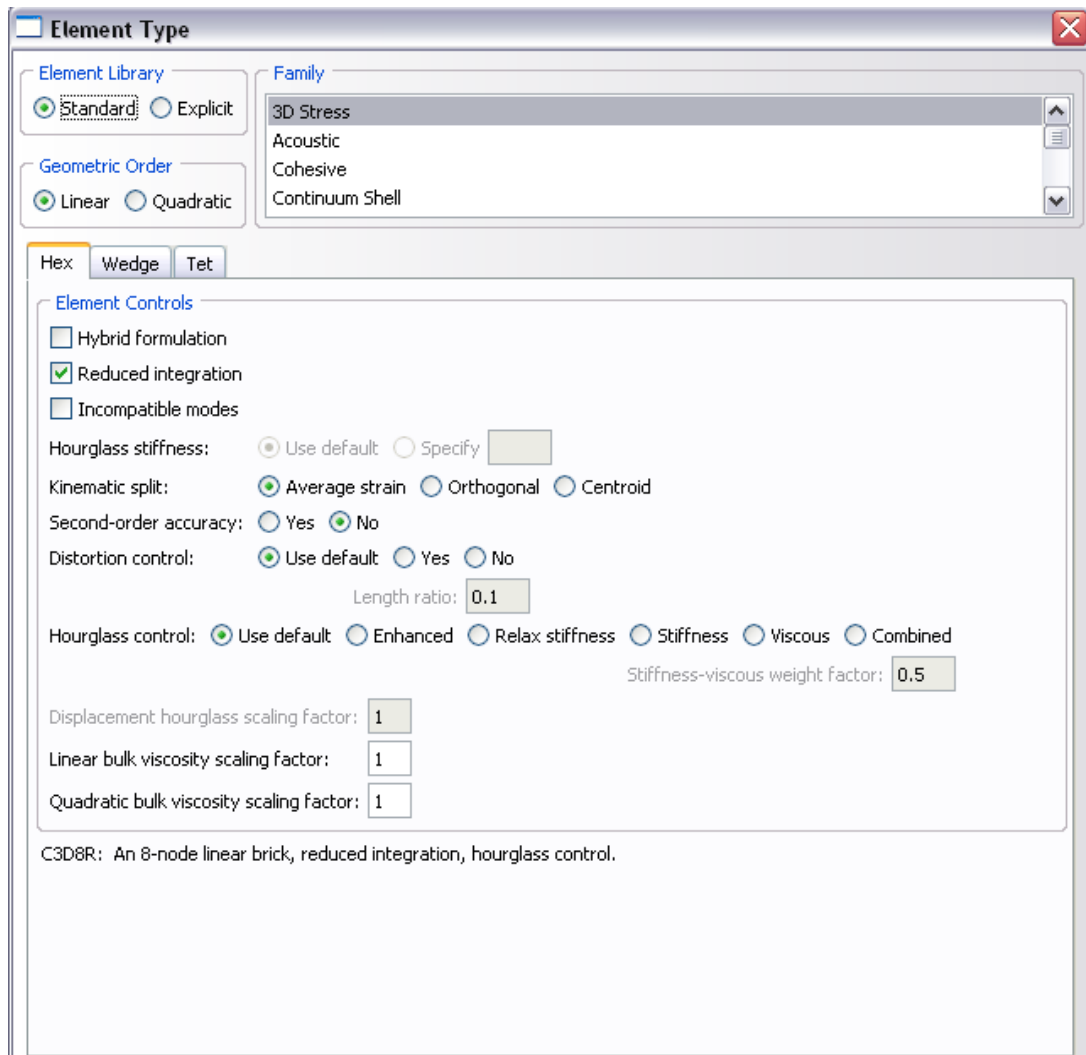


Figura B11. Caja de dialogo para asignar el tipo de elemento

Para asignar el tipo de elemento:

1. En la barra del menú, seleccionar Mesh → Element Type ó de la caja de herramienta del módulo, hacer clic en la herramienta correspondiente. Aparece el cuadro de diálogo *Element Type* (Fig. xxxxxx).
2. En el cuadro de diálogo, aceptar las siguientes selecciones por omisión:

- En Element Library, Standard como la librería de elementos a usar.
- En Geometric Order, Linear como el orden geométrico a aplicar en el elemento.
- En Family, 3D Stress como la familia de elementos a emplear en el modelo.

3. En la parte más baja del cuadro de diálogo, examinar las opciones de la forma del elemento. Una breve descripción del elemento seleccionado está disponible seguidamente a la opción *Element Controls*.

4. Hacer clic en OK para asignar el tipo de elemento y para cerrar el cuadro de diálogo.

Creando el mallado

El mallado básico es una operación de dos pasos: primero se dividen los bordes de la parte (*Seeding*), y entonces se malla dicha parte. Se selecciona el número de divisiones basado en el tamaño del elemento deseado ó en el número de elementos que se desean a lo largo de los bordes, y ABAQUS ubica los nodos de la malla en las divisiones siempre que sea posible.

XI - Creando y sometiendo un trabajo de análisis

Una vez configurado el análisis, se debe abrir el módulo Job para crear un trabajo que está asociado con el modelo y someter ese trabajo al análisis.

Para crear y someter un trabajo de análisis:

1. En la lista de módulos, hacer clic sobre *Job* para entrar al módulo de trabajo.
2. De la barra del menú, seleccionar *Job* → *Create* ó de la caja de herramienta del módulo. El cuadro de diálogo *Create Job* aparece con una lista de los modelos que están disponibles en la base de datos de modelos. Nombrar al trabajo.

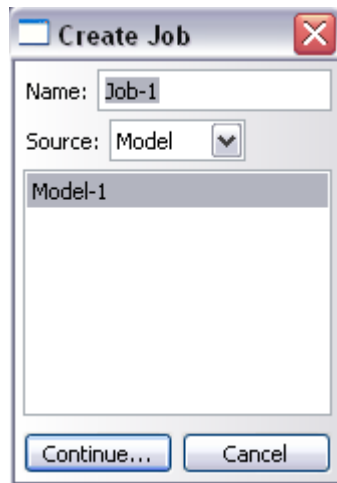


Figura B12. Caja de diálogo para crear el trabajo (job)

Hacer clic en *Continue* para crear el trabajo. La caja de diálogo *Edit Job* aparece:

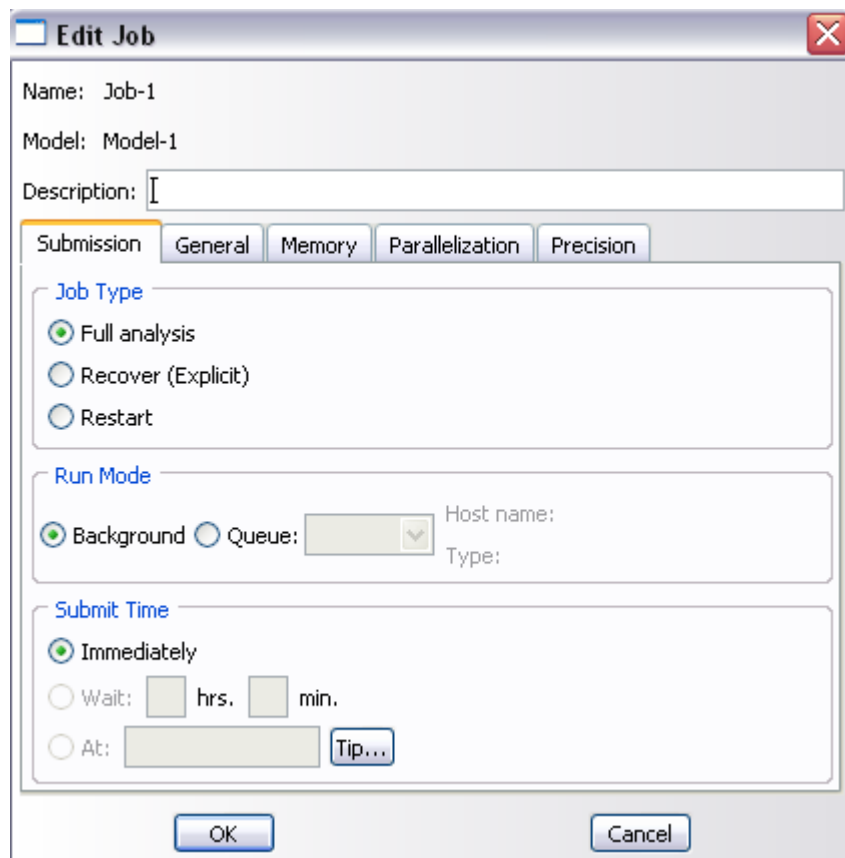


Figura B13. Caja de diálogo para editar el trabajo

3. De la barra de menú, seleccionar Job → Manager ó de la caja de herramienta del módulo, hacer clic en la herramienta correspondiente, para iniciar el Job Manager.

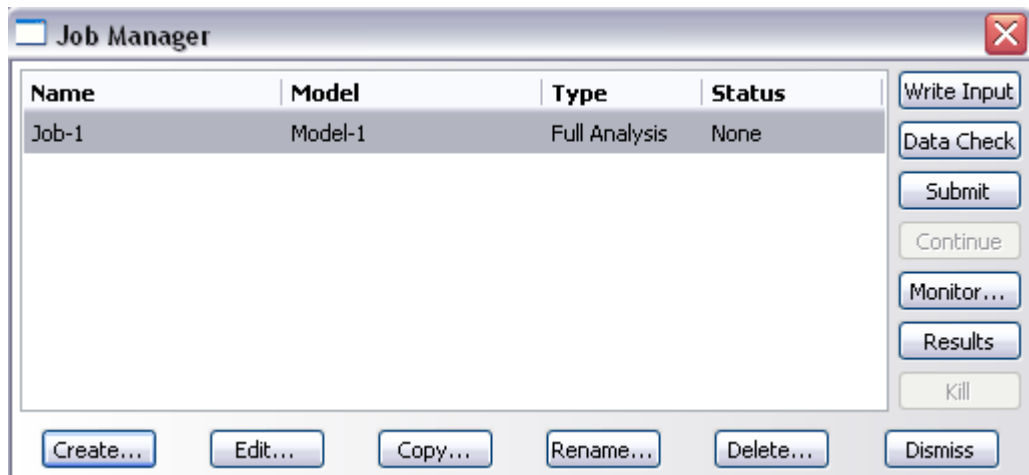


Figura B14. Caja de diálogo del Job Manager o administrador del trabajo

El Job Manager ó administrador de trabajo aparece y despliega una lista de los trabajos, el modelo asociado con cada trabajo, el tipo de análisis y el status del trabajo.

4. De los botones del lado derecho del Job Manager, hacer clic en Submit para someter el trabajo al análisis. Durante esta etapa, inicialmente se crea el archivo de entrada (*.inp) y luego este es sometido al análisis.

Después que se somete el trabajo al análisis, la información en la columna de Status se actualiza para indicar el Status del trabajo. La columna de Status para este ejemplo podrá mostrar alguno de los siguientes mensajes:

- Submitted mientras se esta generando el archivo de entrada (*.inp).
- Running mientras ABAQUS analiza el modelo.
- Completed cuando el análisis se ha completado, y la salida se ha escrito en la base de datos de salida.

- Aborted si ABAQUS/CAE encuentra un problema con el archivo de entrada ó en el análisis. Además, ABAQUS/CAE reporta el problema en el área de mensaje.

De aparecer este último tipo de mensaje, se deben chequear los archivos, <*>.dat, <*>.inp, <*>.msg, con la finalidad de encontrar la fuente que causa el problema, corregirla y después someter el modelo nuevamente al análisis.

5. Cuando el trabajo se completa exitosamente, está listo para ver los resultados del análisis con el uso del módulo Visualization (de visualización). De los botones del lado derecho del Job Manager, hacer clic en Result.

ABAQUS/CAE carga el módulo Visualization, abre la base de datos de salida creada por el trabajo, y muestra una representación grafica del modelo.

Flujo en ABAQUS con soporte en DATA

Para este flujo de trabajo se requiere trabajar directamente sobre el archivo plano para configurar el caso. A continuación se presentan las keywords más importantes utilizadas en la construcción del modelo presentado en el trabajo.

I – Definir los nodos maestros

```
*HEADING
MODELO DE POZO
UNITS: F = lbs, L = in., T = days
*NODE
  1,      0.0, 0.0, 0.0
  9,    3180.0, 0.0, 0.0
 11,    9216.0, 0.0, 0.0
 13,   21504.0, 0.0, 0.0
 15,   46080.0, 0.0, 0.0
 17,   95232.0, 0.0, 0.0
```

II – Generar las copias

```

- - - - -
*NSET,NSET=BASE
  NODOSESQUINA,
  NODOSMEDIO,
*NCOPY, CHANGE NUMBER=100, OLD SET=NODOSESQUINA,
NEW SET=MID, SHIFT
  0,1969.

*NCOPY, CHANGE NUMBER=200, OLD SET=NODOSESQUINA,
NEW SET=CORNER, SHIFT
  0,3937.
```

III – Definir las zonas de interés

```
**  
** ZONA DE INTERÉS PARA EL ANÁLISIS  
**  
*NSET, NSET=TARGET  
401,402,403,404,405,406,407,408,409  
501,502,503,504,505,506,507,508,509  
601,602,603,604,605,606,607,608,609  
701,702,703,704,705,706,707,708,709  
801,802,803,804,805,806,807,808,809  
901,902,903,904,905,906,907,908,909  
1001,1002,1003,1004,1005,1006,1007,1008,1009  
1101,1102,1103,1104,1105,1106,1107,1108,1109  
1201,1202,1203,1204,1205,1206,1207,1208,1209  
1301,1302,1303,1304,1305,1306,1307,1308,1309  
1401,1402,1403,1404,1405,1406,1407,1408,1409  
1501,1502,1503,1504,1505,1506,1507,1508,1509
```

No. del elemento



IV – Generar los elementos

```
*ELEMENT, TYPE=CAX8RP  
1, 1, 3, 203, 201, 2, 103, 202, 101  
*ELGEN, ELSET=ESOIL  
1, 7, 2, 1, 15, 200, 100  
*ELEMENT, TYPE=CINAX5R, ELSET=FAR  
8, 215, 15, 17, 217, 115  
108, 415, 215, 217, 417, 315  
208, 615, 415, 417, 617, 515  
308, 815, 615, 617, 817, 715  
408, 1015, 815, 817, 1017, 915  
508, 1215, 1015, 1017, 1217, 1115
```

V – Agrupar elementos por materiales

```
*ELSET, ELSET=C1, GENERATE
  1,7,1
*ELSET, ELSET=C2, GENERATE
 101,107,1
*ELSET, ELSET=C3, GENERATE
 201,207,1
*ELSET, ELSET=C4, GENERATE
 301,307,1
*ELSET, ELSET=C5, GENERATE
 401,407,1
```

Material 1
Material 2
...
Elementos involucrados

VI – Definir las características de cada material

```
*MATERIAL,NAME=C15
*ELASTIC
 11000000.,0.17
*DRUCKER PRAGER, SHEAR CRITERION=LINEAR
 38.,1.,0.
*DRUCKER PRAGER HARDENING
 286.,0.
 460.,0.0037
 358.,0.04
*PERMEABILITY,SPECIFIC=3.61e-2
 15.2,
```

Nombre del material
Young y Poisson
Beta, relación de flujo y dilatación
Tabla de endurecimiento
Peso específico
Infiltración

VII – Aplicar a cada grupo de elementos el material

```
*SOLID SECTION, ELSET=L1, MATERIAL=L1
*SOLID SECTION, ELSET=U1, MATERIAL=U1
*SOLID SECTION, ELSET=D7, MATERIAL=D7
*SOLID SECTION, ELSET=D6, MATERIAL=D6
*SOLID SECTION, ELSET=D5, MATERIAL=D5
*SOLID SECTION, ELSET=D4, MATERIAL=D4
*SOLID SECTION, ELSET=D3, MATERIAL=D3
*SOLID SECTION, ELSET=D2, MATERIAL=D2
*SOLID SECTION, ELSET=D1, MATERIAL=D1
```

VIII y IX – Aplicar condiciones de frontera e iniciales.

```
*BOUNDARY
FREESURF, 8,,0.
**
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=RATIO
NALL, 1.5
```

Peso en terreno

Flujo hacia el pozo

X – Inicializar el modelo

```
*GEOSTATIC
*MONITOR, NODE=2201, DOF=2
*BOUNDARY
BASE, 2
AXIS, 1
```

XI – Editar los archivos de salida

```
*EL PRINT,FREQ=0, ELSET=ESOIL
```

```
S,
```

```
CE,
```

```
PE,
```



Deformaciones

Esfuerzos

Presión de poro