



Universidad Central de Venezuela

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA EXCENTRICIDAD DEL
REVESTIDOR SOBRE EL ESTADO DE ESFUERZOS DEL ANILLO
DE CEMENTO EN POZOS DE PETRÓLEO Y GAS**

Br. Manuel Alejandro Oropeza Gomez

Dr. John Mantilla, Tutor Académico

MSc. Geralf Pineda, Tutor Industrial

Caracas, 25 de Julio de 2012.

**Estudio de la influencia de la excentricidad del revestidor sobre el estado de esfuerzos
del anillo de cemento en pozos de petróleo y gas**

Copyright © 2012

Universidad Central de Venezuela

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA EXCENTRICIDAD EN EL REVESTIDOR
SOBRE EL ESTADO DE ESFUERZOS DEL ANILLO DE CEMENTO EN POZOS
DE PETRÓLEO Y GAS**

Br. Manuel Alejandro Oropeza Gomez

Trabajo especial de grado presentado
ante la ilustre Facultad de Ciencias de
la Universidad Central de Venezuela como
requisito parcial para optar al título de:
Licenciado(a) en Física.

Dr. John Mantilla, Tutor Académico

Fecha

MSc. Geralf Pineda, Tutor Industrial

Fecha

Quienes suscriben, miembros del jurado que examinó el trabajo presentado por el Br. Manuel Alejandro Oropeza Gomez titulado: “**Estudio de la influencia de la excentricidad en el revestidor sobre el estado de esfuerzos del anillo de cemento en pozos de petróleo y gas**” para optar al título de licenciado(a) en Física, consideramos que dicho trabajo cumple con los requisitos exigidos por los reglamentos respectivos y por lo tanto lo declaramos APROBADO en nombre de la Universidad Central de Venezuela.

Dr. John Mantilla, Tutor Académico

Fecha

MSc. Geralf Pineda, Tutor Industrial

Fecha

Dr. José Jorge

Fecha

Dr. Esteban Álvarez

Fecha

Caracas, 25 de Julio de 2012

Dedico este trabajo a las tres mujeres más importantes en mi vida por brindarme su comprensión y apoyo incondicional en todo momento. Mi abuela Teresa de Oropeza, mi madre Sandra Gómez y mi hermana Alexandra Oropeza.

Agradecimientos

En primer lugar quiero darle las gracias a dios por todas las cosas buenas que me ha dado a lo largo de mi vida y por esas cosas no tan buenas que nos suceden, pero que nos dejan grandes enseñanzas a diario.

A mi tutores, por haberme brindado la oportunidad de desarrollar este trabajo, en primer lugar al Ing. Geralf Pineda por la paciencia y disposición que tuvo en todo momento al orientarme y aclarar las inquietudes que surgieron a lo largo del camino, y al Prof. John Mantilla por darme su voto de confianza y tener seguridad de mis capacidades.

A mi madre, por comprender más que nadie lo que se siente estar en la facultad y los obstáculos que aparecen en el camino (este trabajo también es tuyo). A mi abuela por siempre darme ánimos y regañarme por no tener confianza en mí mismo.

A mis hermanos, Alexandra y Edar por comprenderme día a día y brindarme su apoyo incondicional (sin ustedes no habría sido posible). A mi familia en general, tíos, tías, primos por tener fé en mi y creer siempre en mis capacidades, todos han sido testigos del esfuerzo y la dedicación empleada para el logro de esta meta. (Muchas gracias a todos).

A tres personas que se convirtieron en seres muy importantes en mi vida y a quienes considero mis hermanos por todo lo que vivimos juntos a lo largo de la carrera, Javier Martínez, Víctor Díaz y Aurimary Zoino (Su amistad es una de las mejores cosas que me sucedió en la carrera). A mis amigos de PDVSA-INTEVEP; Alejandro, Neidy, Francis, Irania por simplemente compartir el espacio y apoyarnos en este paso de gran importancia para cada uno. Por último pero no menos importante a mi mejor amigo, Johnny Pestana por alentarme día a día a seguir adelante y darme ánimos en todo momento (gracias por tenerme tanta paciencia).

Resumen

Estudio de la Influencia de la excentricidad del revestidor sobre el estado de esfuerzos del anillo de cemento en pozos de petróleo y gas.

Manuel Alejandro Oropeza Gomez

Dr. John Mantilla, Tutor Académico

MSc. Geralf Pineda, Tutor Industrial

Universidad Central de Venezuela

Las operaciones de cementación en pozos de petróleo y gas tienen como objetivo fundamental la formación de un sello hidráulico perdurable en el tiempo dentro del sistema constituido por la tubería, el cemento y la roca. Es por ello, que resulta primordial garantizar que el cemento empleado para cada actividad de cementación sea el apropiado, de forma tal, que tenga la capacidad de soportar las condiciones de carga y temperatura a las que se halla el interior del pozo. El diseño riguroso de la lechada de cemento a utilizar, es parte fundamental dentro de la planificación de las actividades de cementación. La lechada debe poseer ciertas características químicas y mecánicas que le permitan responder favorablemente a los requerimientos del pozo y que aseguren que mantendrá su integridad a lo largo del tiempo.

La excentricidad en el revestidor es considerada uno de los principales problemas que se producen en el proceso de cementación primaria, por lo que el objetivo de este trabajo es estimar la influencia de esta anomalía en la distribución de los esfuerzos que experimenta el cemento fraguado. Para alcanzar este objetivo se realizó una evaluación

numérica a través del método de elementos finitos (MEF) del sistema revestidor-cemento-formación simulando las condiciones de carga aplicada, producto de las operaciones realizadas en la construcción, mantenimiento o generadas por cambios en las condiciones intrínsecas de fondo de pozo. Entonces, tomando en cuenta la existencia de excentricidad además de las propiedades elásticas de los materiales que conforman el pozo, módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν) se determinó que el grado de excentricidad actúa como concentrador de esfuerzos en el cemento aumentando la posibilidad de que este material sufra algún tipo de daño y pierda su integridad mecánica.

Los resultados indicaron que partir de la determinación del factor de concentración de esfuerzos es posible corregir los esfuerzos determinados a partir de soluciones simplificadas, y evitar errores producto de la estimación deficiente de los esfuerzos reales a los que el pozo es sometido. Tomando en cuenta que la implementación del cálculo este factor como criterio de diseño de materiales, es de gran utilidad cuando se requiere del análisis profundo de un elemento que será sometido a esfuerzos y cuyo funcionamiento es de vital importancia.

Palabras claves: Cementación, esfuerzos, excentricidad en el Revestidor, factor de concentración de esfuerzos, método de elementos finitos.

Dr. John Mantilla, Tutor Académico

MSc. Geralf Pineda, Tutor Industrial

Índice General

Índice General	vi
Introducción	1
Capítulo 1: El problema de Investigación	5
1.1 Planteamiento del Problema	5
1.2 Objetivos	8
1.2.1 Objetivo General	8
1.2.2 Objetivos Específicos.....	8
1.3 Antecedentes	9
Capítulo 2: Marco Teórico	15
2.1 Ingeniería de Perforación.....	16
2.2 Ingeniería de Producción.....	17
2.2.1 Selección del Revestidor	17
2.2.2 Funciones de los Revestidores	18
2.2.3 Características de los Revestidores	18
2.2.4 Clasificación de los Revestidores	19
2.3 Razones de Utilización de los Revestidores	21
2.4 Centralizadores	22
2.5 Excentricidad en el Revestidor.....	23
2.6 Cemento Petrolero	24
2.6.1 Fraguado del Cemento Petrolero.....	26
2.6.2 Clasificación de los Cementos Petroleros	27
2.6.3 Cementación.....	29
2.6.4 Clasificación de las Cementaciones	30
• Cementación Primaria.....	30

• Cementación Secundaria	31
• Taponos de Cemento.....	32
2.7 Integridad Mecánica del Cemento	33
2.8 Caracterización Mecánica de un Material	35
2.8.1 Teoría de la Elasticidad.....	35
2.8.2 Esfuerzo	35
2.8.3 Deformación	37
2.9 Ley de Hooke	39
2.10 Curva Esfuerzo-Deformación	44
2.11 Termoelasticidad.....	44
2.12 Esfuerzos y Equilibrio.....	45
2.13 Esfuerzo Plano	49
2.14 Deformación Plana.....	50
2.15 Factor de Concentración de Esfuerzos.....	51
2.16 Criterios de Falla.....	53
2.16.1 Falla por Adherencia.....	54
2.16.2 Adherencia Interna (Interfaz Tubería- Cemento).....	55
2.16.3 Adherencia Externa (Interfaz Cemento- Formación)	57
2.16.4 Falla por Corte	58
2.16.5 Daño por grietas Radiales	60
2.17 Método de Elementos Finitos (MEF)	61
2.17.1 Introducción.....	61
2.17.2 Fundamentos del Método de Elementos Finitos (MEF)	62
2.17.3 Formulación Variacional	65
2.17.4 Construcción del Campo de Desplazamientos.....	68
• Discretización del Dominio	68
• Interpolación de los Desplazamientos.....	69
• Construcción de las Funciones de Forma	71
2.17.5 Formulación de las Ecuaciones en Elementos Finitos	73

2.17.6 Transformación de Coordenadas	75
2.17.7 Ensamblaje de las Ecuaciones	76
Capítulo 3: Marco Metodológico	77
3.1 Tipo y diseño de la Investigación	78
3.2 Objeto y Población de Estudio	79
3.3 Técnicas de Recolección de Datos	79
3.4 Formulación Analítica del Problema	82
3.4.1 Mecánica del Pozo Completado caso céntrico ($\epsilon=0$)	82
3.4.2 Cálculo de Esfuerzos en el Sistema Revestidor-Cemento-Formación	84
3.5 Formulación Numérica del Problema	91
3.5.1 Pre-Procesamiento	92
• Geometría	92
• Propiedades Elásticas de los Materiales	95
• Mallado del Modelo	96
• Imposición de las Condiciones de Contorno	99
Capítulo 4: Resultados y Análisis	105
4.1 Validación del Modelo	105
4.2 Modelos de Tubería Excéntrica	111
4.3 Análisis Paramétrico en el Cemento	114
4.3.1 Caso I: Concentración de Esfuerzos (K) en Función de E_c y ϵ	114
4.3.2 Caso II: Concentración de Esfuerzos (K) en Función de ν_c y ϵ	123
Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones	129
5.1 Conclusiones	129
5.2 Recomendaciones a trabajos futuros	131
Apéndice A	131
Apéndice B	136
Bibliografía	142

Índice de Figuras

Fig. 1 Evaluación de la excentricidad con respecto al ángulo de inclinación del hoyo.	12
Fig. 2 Ejemplos de barrenas PDC (Polycrystalline Diamond compact) y bicéntricas	16
Fig. 3 Esquema de un pozo completado	21
Fig. 4 Centralizadores Flexibles y rígidos	22
Fig. 5 Caso céntrico y excéntrico del revestidor	24
Fig. 6 Cambio de estado del cemento de líquido a sólido	27
Fig. 7 Clinker y algunos aditivos del cemento	29
Fig. 8 Trabajos de cementación Primaria.	31
Fig. 9 Cementación secundaria para corregir anomalías en el pozo	32
Fig. 10 Tapón de cemento para desviar la trayectoria de un pozo	33
Fig. 11 Prácticas que alteran la integridad mecánica del cemento	34
Fig. 12 Esfuerzos sobre los planos de un cubo sometido a una fuerza	36
Fig. 13 Esquema de un elemento cuadrado en el estado no deformado y deformado.....	37
Fig. 14 Estados de compresión	42
Fig. 15 (a) Comportamiento lineal y (b) comportamiento no lineal	43
Fig. 16 Volumen de un cuerpo sometido a fuerzas	46
Fig. 17 Esquema del sistema revestidor-cemento-formación geológica	48
Fig. 18 Esfuerzos que experimenta el Cemento	49
Fig. 19 Esfuerzos máximo y de campo lejano en una placa con un orificio	52
Fig. 20 Modelo representativo de falla por adherencia interna en el Cemento	55

Fig. 21 Modelo representativo de falla por adherencia Externa en el Cemento	57
Fig. 22 Modelo representativo de falla por Corte en el Cemento	58
Fig. 23 Criterio de Falla de Mohr-Coulomb	59
Fig. 24 Modelo representativo de falla por Tensión en el Cemento	60
Fig. 25 Proceso de discretización de un dominio bidimensional.....	63
Fig. 26 Esquema del proceso de modelado mediante (MEF)	65
Fig. 27 Ejemplo de mallado en donde se observa la numeración de los nodos y los elementos	68
Fig. 28 Esquema en donde se describe de manera sistemática los pasos seguidos para la realización del trabajo	81
Fig. 29 Diagrama de la sección transversal de un pozo completado	82
Fig. 30 Cilindro de pared gruesa presurizado internamente y externamente	84
Fig. 31 Sistema geométrico definido para la solución numérica del problema	92
Fig. 32 Modelo representativo de los esfuerzos alrededor del hoyo. Variables de la ecuación de Kirsch	94
Fig. 33 Evaluación de las ecuaciones de Kirsch y determinación del radio externo de la Formación	94
Fig. 34 Proceso de mallado y enumeración de los nodos en el sistema; Tubería-cemento-Formación	97
Fig. 35 Pruebas de Convergencia de malla, en función del número de elementos.....	98
Fig. 36 Representación de las condiciones de contorno en el sistema.....	99
Fig. 37 Modelo del Sistema con las condiciones de borde y de carga aplicada en temperatura	102
Fig. 38 Modelos para el análisis con el Software ABAQUS, para cada caso excéntrico.....	103
Fig. 39 Modelo Céntrico del sistema en ABAQUS	104
Fig. 40 Discretización de cada material en el modelo I.....	107
Fig. 41 Discretización de cada material en el modelo II.....	108
Fig. 42 Convergencia entre los valores de esfuerzo radial, modelo analítico y numérico.....	110
Fig. 43 Convergencia entre los esfuerzos tangenciales, modelo analítico y numérico	110
Fig. 44 Resultados de las simulaciones para cada caso de excentricidad a $T= 102^{\circ}\text{F}$	111
Fig. 45 Distribución de esfuerzos radiales en el cemento para $\epsilon=0$	112

Fig. 46 Componente radial del factor de concentración de esfuerzos $K_{int}(r)$; $K_{ext}(r)$ vs la excentricidad del revestidor en el anillo de cemento para $\nu_c = 0,10$.	116
Fig. 47 Componente Tangencial del factor de concentración de esfuerzos $K_i(\theta)$; $K_e(\theta)$ vs la excentricidad en el revestidor (ϵ) en el anillo de cemento para $\nu_c = 0,10$.	119
Fig. 48. Componente radial del factor de concentración de esfuerzos $K_{int}(r)$; $K_{ext}(r)$ vs la excentricidad del revestidor (ϵ) en el anillo de cemento para $\nu_c = 0,15$	120
Fig. 49. Componente Tangencial del factor de concentración de esfuerzos $K_{int}(\theta)$; $K_{ext}(\theta)$ vs la excentricidad del revestidor (ϵ) en el anillo de cemento para $\nu_c = 0,15$	121
Fig. 50. Componente radial del factor de concentración de esfuerzos $K_i r$; $K_e(r)$ en función del coeficiente de Poisson del cemento (ν_c) y el grado de excentricidad (ϵ).	123
Fig. 51. Influencia del coeficiente de Poisson del cemento (ν_c) en la concentración de los esfuerzos tangenciales $K_i \theta$; $K_e(\theta)$ para $E_c = 1.5 \cdot 10^5 Psi$	125
Fig.52. Influencia del coeficiente de Poisson del cemento (ν_c) en la concentración de los esfuerzos radiales $K_i r$; $K_e(r)$ para $E_c = 5 \cdot 10^5 Psi$.	126
Fig. 53. Influencia del coeficiente de Poisson del cemento (ν_c) en la concentración de los esfuerzos radiales $K_i \theta$; $K_e(\theta)$ para $E_c = 5 \cdot 10^5 Psi$	127
Fig. 54 a) Sección transversal de un cilindro de pared gruesa; b) Elemento del material en el estado inicial o no deformado y en el estado deformado	131
Fig. 55 Componente Radial del factor de concentración de esfuerzos K_r en función del módulo de Young del cemento (E_c), para $\nu_c = 0,20$	136
Fig. 56 Componente Tangencial del factor de concentración de esfuerzos K_θ en función del módulo de Young del cemento (E_c), para $\nu_c = 0,20$	137
Fig. 57 Componente Radial del factor de concentración de esfuerzos K_r en función del Coeficiente de Poisson del cemento (ν_c), para $E_c = 9 \cdot 10^5 Psi$	138
Fig. 58 Componente Tangencial del factor de concentración de esfuerzos K_θ en función del Coeficiente de Poisson del cemento (ν_c), para $E_c = 1.3 \cdot 10^6 Psi$	139
Fig. 59 Componente radial del factor de concentración de esfuerzos K_r en función del Coeficiente de Poisson del cemento (ν_c), para $E_c = 1.3 \cdot 10^6 Psi$	140
Fig. 60 Componente Tangencial del factor de concentración de esfuerzos K_θ en función del Coeficiente de Poisson del cemento (ν_c), para $E_c = 1.3 \cdot 10^6 Psi$	141

Índice de Tablas

Tabla 1 Aumento de los esfuerzos de Von Mises en función de la excentricidad	11
Tabla 2. Composición mineralógica del Clinker de Cemento.	25
Tabla 3. Clasificación de los aditivos y sus funciones	26
Tabla 4. Módulos elásticos y coeficiente de dilatación para distintos materiales .	45
Tabla 5. Geometría asociada a los elementos del sistema revestidor-cemento- formación geológica.....	95
Tabla 6. Propiedades elásticas de la formación a evaluar en los modelos numéricos	95
Tabla 7. Módulos elásticos del cemento que se consideraron para el estudio numérico	96
Tabla 8. Características geométricas y elásticas de la sección evaluada para la comprobación.....	107
Tabla 9. Esfuerzos obtenidos a partir de las simulaciones, modelo I y II y el valor teórico de cada medida	109
Tabla 10. Errores relativos entre los modelos analítico y numérico	109
Tabla 11. Esfuerzos radiales máximos en el anillo de cemento para cada caso de excentricidad	112
Tabla 12. Factor de concentración de esfuerzos radial, para el cemento $E_c =$ $1.5 \cdot 10^5$ Psi y $\nu_c = 0,10$	113

Introducción

En la actualidad los estudios desarrollados en ingeniería de perforación y producción están enfocados en la optimización de cada uno de los procesos que determinan la correcta culminación de un pozo petrolero, desde su construcción hasta su posterior explotación.

Esto surge de acuerdo al interés en nuevos proyectos de explotación en la zona de costa afuera y la faja petrolífera del Orinoco (FPO), la cual es una extensa zona rica en petróleo pesado y extra pesado, ubicada al margen izquierdo del río Orinoco, con un área total aproximada de 55.314 km² y un área de explotación actual de 11.593 km². Estos territorios comprenden parte de los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas.

La faja petrolífera del Orinoco es considerada la acumulación más grande de petróleo pesado y extra-pesado que existe en el mundo. Las reservas de petróleo original en el sitio de la Faja, según PDVSA, alcanzan hasta ahora 1,36 billones de barriles.

Sin embargo; la característica principal de los crudo de tipo pesado y extra-pesado es su alta viscosidad es decir, tienen una baja movilidad dentro del yacimiento; ocasionando que los métodos de recuperación de crudo convencionales no sean aplicables en este tipo de yacimiento, siendo necesario recurrir a los métodos de recuperación térmica, debido a que su función principal es disminuir la viscosidad del petróleo y optimizar su movilidad.

Dentro de los métodos de recuperación térmica una de las tecnologías mayormente aplicadas para el tratamiento de pozos con estas características se conoce por sus siglas en inglés como SAGD (Steam Assisted gravity drainage), y consiste en la perforación de un par de pozos horizontales en el reservorio, donde uno de ellos se encuentra a pocos metros por encima del otro.

Introducción

El Vapor a baja presión se inyecta continuamente en el pozo superior para calentar el petróleo y así reducir su viscosidad, permitiendo de esta forma que el mismo drene por gravedad hacia el pozo productor que se encuentra abajo donde será recolectado y bombeado.

Las desventajas que generan la aplicación de métodos de recuperación térmica están asociadas a la magnitud de los esfuerzos a los que el pozo es sometido, siendo estos mayores a los que sufre cuando se usan métodos de recuperación convencionales, por ejemplo debido a la dilatación volumétrica que sufre la tubería causada por el incremento de la temperatura.

En el proceso de construcción de un pozo una de las etapas más importantes es la cementación, debido a que su correcta implementación determina el buen funcionamiento del pozo a lo largo de su vida productiva. El cemento tiene como objetivo proveer soporte estructural al hoyo en conjunto con el revestidor y la formación además de garantizar el aislamiento de las distintas zonas a fin de evitar la migración indeseada de fluidos.

El aislamiento zonal puede ser garantizado si el proceso de cementación primaria se realiza de la manera más eficiente posible, por lo que el propósito general de este trabajo de investigación es estudiar uno de los mayores problemas que se presenta durante los trabajos de cementación primaria es decir, la existencia de excentricidad en el revestidor; este efecto es el producto de la deficiente colocación del revestidor en el centro del hoyo al final de la operación de la corrida o bajada del mismo.

El mayor inconveniente que genera la existencia de este efecto en la colocación del revestidor se debe a que los cálculos y el diseño de la cementación primaria se hacen generalmente bajo la suposición de un espacio anular concéntrico, lo que conduce a resultados erróneos o inexactos (Agkun F, et al. 2004). El grado de excentricidad presente ocasiona posteriormente un incorrecto desplazamiento de la lechada de cemento alrededor

Introducción

del revestidor en el espacio anular, conduciendo a la aparición de anomalías que comprometen su integridad mecánica.

Debido a la importancia del material cementante dentro del esquema de funcionamiento de un pozo, es necesario crear criterios de diseño que permitan obtener un material con las características adecuadas, es decir, que ofrezca un comportamiento mecánico capaz de soportar las diferentes condiciones de esfuerzos en el pozo, ya sean por causas operacionales o por condiciones intrínsecas de fondo de pozo (presión y temperatura); para lograr dicho objetivo es primordial realizar los cálculos y formular los modelos asociados al anillo de cemento, evitando simplificaciones en el modelo que no reproduzcan las condiciones reales a las que éste será sometido y así no obtener resultados poco confiables, que puedan generar la necesidad de realizar trabajos de cementación remedial o en casos aun más extremos ocasionar la pérdida total del pozo.

Es importante notar como a medida que las condiciones de almacenamiento y las características del crudo almacenado en los yacimientos no explotados en nuestro país y a nivel mundial se han hecho más complejas, ha sido necesario optimizar todas las metodologías existentes para la perforación, construcción y mantenimiento de un pozo petrolero para así lograr los márgenes más altos de recuperación posibles de ese recurso no renovable de gran importancia en el desarrollo económico y energético del país, cumpliendo siempre los requerimientos de rentabilidad.

Para el desarrollo de la investigación planteada el presente trabajo ha sido estructurado en cinco capítulos. En el primer capítulo se plantea e introduce el problema de investigación, los objetivos y antecedentes del mismo; posteriormente en el segundo capítulo se desarrollan las bases teóricas necesarias para la comprensión del problema de estudio; y seguidamente en el capítulo tres se describe la metodología o serie de pasos implementados para el alcance de los objetivos de la investigación de manera sistemática.

Introducción

Para finalizar el capítulo cuatro y cinco respectivamente, contienen los resultados obtenidos con su respectiva interpretación, además de las conclusiones del estudio y recomendaciones a trabajos de investigación posteriores en corrientes de investigación afines.

Capítulo 1

El problema de investigación

1.1 Planteamiento del Problema

La cementación es un proceso que consiste en mezclar cemento seco (Clinker), además de ciertos aditivos y agua, para formar lo que se denomina una lechada de cemento, la cual es bombeada al pozo a través de la tubería de revestimiento y colocada en el espacio anular existente entre el hoyo y el diámetro externo del revestidor, siendo el objetivo principal de dicha operación proporcionar un aislamiento zonal completo y duradero.

La calidad de los trabajos de cementación tiene un impacto directo en la integridad y buen funcionamiento del pozo, desde el momento en que se inicia la producción hasta que el mismo es abandonado, por lo que un apropiado diseño de la lechada de cemento y de las técnicas de colocación afectará la productividad del pozo, tanto física como económicamente.

Durante la vida productiva de un pozo, el cemento esta sujeto a condiciones severas que pueden afectar su integridad generando dos tipos de anomalías, las cuales pueden ser de agrietamiento o de pérdida de adherencia.

Estas anomalías pueden aparecer tanto en la fase de construcción como en la de producción y pueden asociarse a lo siguiente:

- Movimientos en el revestidor durante su corrida o bajada
- Contracción o encogimiento del cemento en el tiempo

Capítulo 1: El problema de Investigación

- Fluctuaciones de presión y temperatura
- Prácticas de estimulación, como fracturamiento hidráulico o inyección de vapor

La existencia de excentricidad en el revestidor puede ocasionar la pérdida de aislamiento entre las zonas del pozo, poniendo en peligro la integridad y vida productiva del pozo.

A fin de contrarrestar el desplazamiento del revestidor se utilizan unas herramientas denominadas centralizadores, las cuales son usadas para seguir el proceso de colocación del revestidor y ubicarlo en el centro del pozo. El lugar y el número de centralizadores en un revestidor son muy importantes, y esta cifra va a depender de: el ángulo del hoyo o inclinación, el peso de la tubería de revestimiento y el peso del lodo de perforación. Sin embargo, si muchos centralizadores son instalados en el revestidor puede producirse el atascamiento de la tubería debido a la obstrucción que estos dispositivos ejercen cuando entran en contacto con la formación tomando en cuenta que la misma en general presenta irregularidades. Por otro lado, si el número de centralizadores es muy bajo, el revestidor no estará centrado en el pozo generando problemas subsecuentes.

Sin embargo, estos dispositivos no proporcionan una concentricidad perfecta entre el agujero y la tubería, pero incrementan sustancialmente las condiciones de separación, debido a que una tubería sin centralizadores se apoyará contra la pared del agujero. Entonces, aunque estos accesorios aparentan ser obstrucciones innecesarias, son efectivos y deben usarse donde sean aplicables.

La utilización de los centralizadores esta pensada para optimizar la cementación, la cual es realizada mediante la circulación de un volumen de lechada a través del revestidor para colocarse en el espacio anular, es decir, el volumen entre el revestidor y el hoyo, por lo que esta debe completar en su totalidad el espacio anular desde el fondo hasta la superficie en algunos casos; lo que se denomina en ingeniería de perforación retorno del cemento.

Capítulo 1: El problema de Investigación

Una de las razones por la que la lechada de cemento no llega a la superficie (el cemento no retorna) es la ampliación del hoyo que ocurre frecuentemente en formaciones poco consolidadas, además, si el revestidor no está colocado en el centro del hoyo la distribución del cemento alrededor del revestidor después de la operación de cementación no será uniforme lo que lleva a problemas de seguridad y otros inconvenientes durante operaciones en el pozo.

Para estimar el efecto de la excentricidad del revestidor es necesario estudiar el comportamiento mecánico del sistema bajo esta condición a fin de caracterizar su respuesta.

El comportamiento mecánico de un material es determinado mediante el uso de las ecuaciones de la teoría de la elasticidad, las cuales a través de un modelo matemático asociado al problema de deformación, hacen posible determinar el comportamiento de un sistema físico el cual es sometido a una serie de esfuerzos. Ese modelo matemático se fundamenta en los principios de la mecánica clásica a través de la cual es posible formular ecuaciones gobernantes del sistema físico, siendo estas ecuaciones por lo general de tipo diferencial, estas ecuaciones diferenciales son desarrolladas y resueltas utilizando los diferentes métodos destinados para ello como por ejemplo, métodos de Fourier, cálculo variacional, transformaciones integrales, variable compleja, etc.

Sin embargo, muchas veces los métodos analíticos de resolución a estos problemas son inadecuados debido a la complejidad del problema que se desea tratar, por lo que hay que recurrir a la implementación de métodos de análisis numérico que permitan obtener una solución aproximada, siendo esta solución muy cercana a la exacta permitiendo así poder describir el comportamiento físico del sistema en estudio y a su vez obtener la información necesaria para evaluar la situación de interés.

Capítulo 1: El problema de Investigación

En general, los criterios de diseño convencionales para el revestidor y el cemento están basados en la existencia de una distribución uniforme de las cargas a las que estos son sometidos, sin tomar en cuenta las interacciones entre el revestidor, el cemento y la formación, por lo que dichos criterios fallan en los casos de una distribución de cargas no uniforme; la excentricidad del revestidor es una de las causas principales de la distribución desigual de las cargas en el sistema, ocasionando a su vez una distribución no uniforme del estado de esfuerzos; por lo tanto, es necesario cuantificar el factor de variación de los valores de esfuerzos para los casos de existencia de un espacio anular céntrico y espacio anular excéntrico respectivamente, a fin de incluir dicho efecto en los procesos de diseño del cemento de acuerdo a las condiciones de carga a los que será sometido, para finalmente lograr que la respuesta mecánica del sistema sea óptima.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Evaluar la influencia de la excentricidad del revestidor, a través de un análisis paramétrico, sobre el estado de esfuerzos (integridad mecánica) del anillo de cemento, utilizando un modelado numérico por elementos finitos; con la finalidad de incluir dicho parámetro en el proceso de diseño de lechadas de cemento a ser utilizadas en pozos de petróleo y gas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Plantear el modelo físico asociado al problema de esfuerzos-deformaciones del sistema revestidor-cemento-formación geológica, a través de las ecuaciones de la teoría de la elasticidad.

Capítulo 1: El problema de Investigación

- Resolver analíticamente el problema de esfuerzos-deformaciones del sistema revestidor-cemento-formación geológica, para el caso de la existencia de un espacio anular céntrico ($\epsilon=0$).
- Describir los fundamentos del método de los elementos finitos (MEF), como herramienta de solución aproximada a problemas de ecuaciones diferenciales mediante su implementación a través del software de simulación ABAQUS.
- Validar el buen funcionamiento del modelo desarrollado en ABAQUS, comparando la solución analítica obtenida al problema de esfuerzos-deformaciones para el caso de un espacio anular céntrico con las obtenidas a través del uso del software.
- Plantear un modelo del sistema revestidor-cemento-formación geológica, para el caso de un espacio anular excéntrico ($0 < \epsilon < 1$), usando el método de elementos finitos (MEF) a través del software de simulación ABAQUS.
- Evaluar a través de un estudio paramétrico el problema de esfuerzos-deformaciones asociado al sistema revestidor-cemento-formación geológica, para distintas condiciones de excentricidad en el revestidor y distintas propiedades físicas de los materiales que conforman la estructura del pozo.

1.3 Antecedentes

Debido al rápido crecimiento de la explotación petrolera como actividad comercial de gran impacto en el desarrollo económico y su importancia en el abastecimiento energético a nivel mundial, además del constante cambio en las condiciones de exploración y explotación de este valioso recurso natural, cada año se llevan a cabo una gran serie de investigaciones en cada una de las áreas que comprenden cada etapa del proceso de

Capítulo 1: El problema de Investigación

exploración y explotación de un yacimiento a fin de optimizarlas, esto con miras de aumentar la productividad y buen funcionamiento del pozo petrolero.

La excentricidad en el revestidor es un efecto que ha sido estudiado con anterioridad debido a los inconvenientes que puede generar su existencia en el buen funcionamiento del pozo durante su completación y posterior vida productiva; de acuerdo a los objetivos de este trabajo de investigación tenemos los siguientes:

Berger A, et al. (2004), tomaron en cuenta el efecto de una carga no uniforme en la resistencia de colapso del revestidor usando el método de elementos finitos (MEF), en donde una de las condiciones de carga no uniforme consideradas es producto de la existencia del revestidor excéntricamente centrado.

Ellos construyeron un modelo bidimensional del espacio anular completamente lleno con cemento. La excentricidad fue variada desde 10% a 90%, en simulaciones con dos tipos de cementos cuyas propiedades elásticas eran muy distintas; uno de tipo blando o espuma de cemento ($E=8.06 \text{ e}06 \text{ psi}$; $\nu= 0.42$) y otro de tipo duro ($E= 2.40 \text{ e}06$; $\nu = 0.14$), y por último fue aplicada una presión de 800 psi. Los resultados indicaron que el máximo esfuerzo de Von Mises no es afectado significativamente por las propiedades del cemento. La excentricidad tiene un efecto pequeño en la resistencia de colapso del revestidor, asumiendo un anular completamente cementado.

Capítulo 1: El problema de Investigación

Tabla 1. Incremento de los esfuerzos de Von Mises en función de la excentricidad. Tomado de Berger A, et al. (2004)

<i>Excentricidad (%)</i>	<i>Espuma de cemento</i>		<i>Cemento duro</i>	
	<i>Máximo esfuerzo (VMS) psi</i>	<i>Incremento (%)</i>	<i>Máximo esfuerzo (VMS) psi</i>	<i>Incremento (%)</i>
0	53,763	0	64,723	0
5	53,880	0	64,739	0
10	54,004	0	64,756	0
15	54,137	1	64,773	0
30	54,596	2	64,834	0
50	55,407	3	64,938	0
70	56,613	5	64,099	1
90	58,581	9	65,326	1

La espuma de cemento produce una variación de los esfuerzos mayor que en el caso de un cemento duro. Por lo que los valores del esfuerzo máximo de Von Mises en el revestidor son menores (la diferencia entre 0% y 90 % de ϵ es de 9%), en el caso de un cemento duro el cambio del valor máximo del esfuerzo de Von Mises es muy pequeño, debido a que variaciones desde 0% a 90% de ϵ sólo generan un incremento del esfuerzo máximo de Von Mises del 1%. Esto se debe a que las propiedades del cemento y la formación son similares.

Akgun F, et al. (2004), Realizaron una simulación para estimar la excentricidad del revestidor tomando en cuenta diferentes ángulos de inclinación del hoyo y fuerzas de tensión usando el MEF. Además del ángulo de inclinación, ellos tomaron en cuenta la influencia de la longitud del revestidor y la fuerza de tensión aplicada. Usaron revestidores con longitudes de 102 pies, 204 pies y 300 pies respectivamente, en cuanto a los ángulos de

Capítulo 1: El problema de Investigación

inclinación barrieron los valores de; 15° , 30° , 45° , 60° , 70° y 90° y por último fuerzas de tensión de 20000 lb_f , 40000 lb_f y 60000 lb_f .

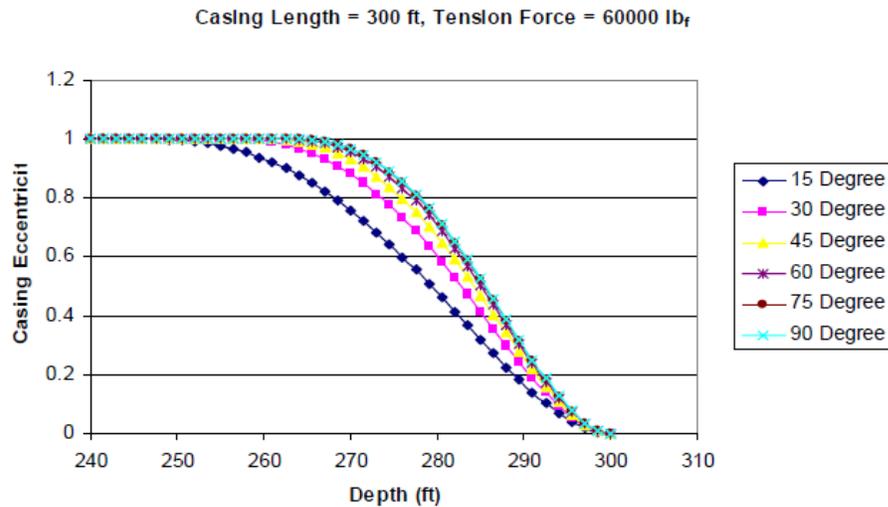


Fig.1 Evaluación de la excentricidad con respecto al ángulo de inclinación del hoyo.

Tomado de Akgun F, et al. (2004)

Los resultados indicaron que el incremento del ángulo de inclinación, incrementa a su vez la excentricidad en el revestidor. El ángulo de inclinación tiene un mayor efecto en la excentricidad del revestidor cuando esta entre 0° (pozo vertical) y 30° y cambia el efecto cuando esta entre 45° y 90° (pozo horizontal).

Estos resultados también mostraron que a medida que aumenta la tensión aplicada, la excentricidad en el revestidor se reduce. Además, concluyeron que la longitud del revestidor no tiene efecto en los valores calculados de excentricidad en el revestidor.

Ozbayoglu M.E, et al. (2006), realizaron una evaluación del efecto que ejerce la excentricidad en el revestidor en el proceso de flujo y desplazamiento de fluidos no-newtonianos usando el método de elementos finitos (MEF).

Capítulo 1: El problema de Investigación

Estos autores definieron un modelo de pozo y tres tipos de fluidos no newtonianos (lodos de perforación), los cuales fueron evaluados a diferentes valores de excentricidad, los valores obtenidos en estas simulaciones, en las que se usó el programa ANSYS, fueron comparadas con los resultados que se obtienen usando los métodos convencionales disponibles en la literatura como por ejemplo; la ley de Bingham para fluidos plásticos, o las ecuaciones de Navier-Stokes.

Los resultados que obtuvieron mostraron que cuando los valores de excentricidad van en aumento, el método de elementos finitos puede estimar de manera más exacta la disminución de presión en comparación con los métodos convencionales; observaron que si la excentricidad aumenta, la caída en la presión disminuye. Estos resultados fueron comprobados experimentalmente.

Singh Ajay, et al. (2009), Estudiaron el efecto de la excentricidad en el revestidor y la rotación del mismo en la disminución de la presión en el anular, evaluaron el efecto de varios parámetros geométricos de los dispositivos de uso común, la velocidad de flujo y las propiedades reológicas del fluido en el anular a través de un modelo computacional de dinámica de fluidos (CFD). Usaron las ecuaciones de Navier-Stokes 3-dimensional, en el caso de flujo turbulento usaron el modelo $k - \omega$.

Los resultados obtenidos mostraron que entre los dispositivos usados comúnmente como los centralizadores pueden contribuir significativamente en la caída de la presión en el anular y moderar las altas velocidades de los fluidos, por otra parte, encontraron que la caída de presión en el anular no se veía afectada por la naturaleza newtoniana o no-newtoniana del fluido implementado cuando no se realizaba la rotación del revestidor, en cuanto al efecto de la excentricidad encontraron que la misma disminuye el gradiente de caída de presión en el anular.

Capítulo 1: El problema de Investigación

Por otra parte; Salehabadi M, et al. (2010), Estudiaron el efecto de la excentricidad del revestidor en la estabilidad del mismo, analizando un pozo perforado en una formación con sedimentos en presencia de un gas hidratado; este tipo de ambientes se encuentran típicamente cerca del fondo marino en aguas profundas, formaciones suaves muy pocas consolidadas, siendo la ampliación del hoyo y el proceso de lavado problemas durante las etapas de perforación en estos tipos de formación. En consecuencia, la excentricidad en el revestidor es inevitable en el caso del lavado del pozo.

Para este estudio ellos consideraron un modelo de revestidores con excentricidades de 20% y 40% respectivamente, usando el software ABAQUS, además en dicho modelo le asociaron propiedades termoelásticas al cemento.

Los resultados de las simulaciones mostraron que cuando se considera la formulación de cemento con buenas propiedades termoelásticas (alta conductividad térmica), el esfuerzo máximo no aumenta significativamente al aumentar el grado de excentricidad, y en el caso en que se considera un cemento con una conductividad térmica muy baja el esfuerzo aumenta drásticamente con el valor de la excentricidad.

De acuerdo a estos resultados los autores concluyeron que la excentricidad es un factor importante en el análisis de estabilidad del revestidor de los pozos perforados en formaciones con gases hidratados. Un alto grado de excentricidad, aumenta la magnitud del esfuerzo generado en el revestidor durante operaciones subsecuentes, que puedan llevar al colapso del revestidor.

Capítulo 2

Marco Teórico

La exploración petrolera se puede definir como el conjunto de actividades realizadas que tienen como objetivo la búsqueda y localización de yacimientos petroleros. Dependiendo de la forma en que se obtiene la información, los métodos de exploración se dividen en dos grandes grupos, los directos y los indirectos. En los primeros se adquieren datos del subsuelo desde la superficie y se interpretan para obtener hipótesis sobre las formaciones, su estructura, clasificación de las rocas, todo lo cual lleva a establecer la existencia de trampas capaces de contener hidrocarburos.

En los métodos directos, la información proviene del análisis de las muestras de roca obtenidas durante la perforación de los pozos; así como del registro e interpretación de los perfiles obtenidos a través de sondas eléctricas, electrónicas o sónicas que se introducen en los pozos durante su perforación.

Una vez que se tiene toda la información, la única manera de confirmar los resultados de los estudios es mediante la perforación de un primer pozo, llamado pozo exploratorio el cual nos presentara de manera física todas las predicciones que arrojaron los estudios anteriores. Si el resultado es bueno, se tienen que perforar más pozos para delimitar el yacimiento y poder pasar a la etapa de ingeniería de yacimientos.

La ingeniería de yacimientos hace la evaluación de los campos, donde se realizan los estudios necesarios para conocer con mayor seguridad la anatomía del yacimiento, la cantidad de reservas de petróleo que contiene la estructura descubierta, así como la forma más rentable y racional para extraer los hidrocarburos (simulación).

2.1 Ingeniería de perforación

La perforación de un pozo en tierra o mar consiste en la penetración de las diversas capas de roca hasta llegar al yacimiento.

Antiguamente ese proceso se realizaba mediante el golpeteo del suelo y la roca con algún material duro hasta desgastarlos, se retiraban los recortes del material y se continuaba con la operación de golpeo.

Esta operación de perforar un pozo se lleva a cabo mediante una herramienta denominada barrena o mecha, la cual está localizada en el extremo inferior de la sarta de perforación que se utiliza para cortar o triturar la formación penetrando el subsuelo terrestre. La acción de corte de sus dientes, el movimiento rotatorio, la carga ejercida por las tuberías que soporta, el flujo de fluido a alta velocidad son los elementos que provocan el corte de las diferentes capas de roca.



Fig. 2. Ejemplos de Mechas PDC (Polycrystalline Diamond compact) y bicéntricas Tomado de Diseños de la perforación de pozos 2003

2.2 Ingeniería de producción.

Durante la perforación de los pozos se atraviesan formaciones geológicas con situaciones y problemáticas diferentes, entre las que se tienen: zonas de bajos gradientes de fractura, intervalos con presiones anormalmente altas, formaciones inestables, yacimientos depletados, etc. Esto origina que a medida que se profundiza, se tenga que ir aislando intervalos con características diferentes mediante la introducción y cementación de las tuberías de revestimiento.

Entonces, la fase de producción de un pozo petrolero se inicia con la introducción de una tubería a través de la cual se extrae el petróleo a la superficie.

Los revestidores (TR) son tuberías especiales que se introducen en el hoyo perforado y que luego son cementadas para lograr la protección del hoyo y permitir posteriormente el flujo de fluidos desde el yacimiento hasta superficie (Rahman S, et al. 1995).

2.2.1 Selección del revestidor

La selección apropiada de las tuberías de revestimiento es uno de los aspectos más importantes en la programación, planificación y operaciones de perforación de pozos. La capacidad de la tubería seleccionada para soportar las presiones y cargas para una serie de condiciones de operación, es un factor importante en la seguridad y economía del proceso de perforación y en la futura vida productiva del pozo.

2.2.2 Funciones de los revestidores

La razón primaria de colocar una tubería de revestimiento en un pozo, es proporcionar protección al hoyo en una forma segura, confiable y económica.

Entre las funciones más importantes de las tuberías de revestimiento están:

- Evitar derrumbes en el pozo durante la perforación
- Evitar contaminaciones de aguas superficiales
- Suministrar un control de las presiones de formación
- Prevenir la contaminación de las zonas productoras con fluidos extraños
- Al cementarlo, se puede aislar la comunicación de las formaciones de interés
- Confinar la producción del pozo a determinados intervalos
- Facilitar la instalación del equipo de superficie y de producción

2.2.3 Características

Las tuberías de revestimiento se fabrican de acero de la más alta calidad y bajo estrictos controles de seguridad en los procesos de fabricación. Son del tipo sin costura, obtenidas por fusión en horno y soldadas eléctricamente. En la API (American Petroleum Institute) se han desarrollado especificaciones para la tubería de revestimiento, aceptadas internacionalmente por la industria petrolera. Entre las especificaciones incluidas para los revestidores y las conexiones están características físicas, propiedades de resistencias a los

diferentes esfuerzos y procedimientos de pruebas de control de calidad. En los diseños se deben tomar en cuenta tales especificaciones para minimizar las posibilidades de fallas.

2.2.4 Clasificación de los revestidores

En general, los revestidores se pueden clasificar en conductor, superficial, intermedio y de producción.

➤ Tubería conductora

Es la primera tubería revestidora que puede ser hincada o cementada; sirve para sentar el primer cabezal en el cual se instalan las conexiones superficiales de control y las conexiones de circulación del lodo de perforación. Es la de mayor diámetro que se utiliza en el pozo. La profundidad de asentamiento varía de 20 m a 250 m. Su objetivo principal es establecer un medio de circulación y control de fluidos de perforación que retorna del pozo hacia el equipo de eliminación de sólidos. Permite continuar perforando hasta alcanzar la profundidad de asentamiento del revestidor de superficie. Ver Fig. 3

➤ Revestidor de superficie

La función principal de esta tubería es proporcionar soporte a las formaciones no consolidadas que podrían derrumbarse y caer dentro del hoyo ocasionado problemas, proveer aislamiento zonal entre las zonas contenedoras de agua (acuíferos) y prevenir su contaminación con los fluidos de completación. Estas tuberías se introducen a profundidades que varían entre 500m y 1000m; cabe destacar que los diámetros se seleccionan de acuerdo a la profundidad del pozo. Ver fig. 3

➤ **Revestidor intermedio**

Estas tuberías se introducen con la finalidad de aislar zonas que contengan presiones normales de formación, flujos de agua y pérdidas de circulación: en si se utiliza como protección del hoyo descubierto, para tratar, en la mayoría de los casos, de incrementar la densidad de los fluidos de perforación y controlar las zonas de alta presión. Dependiendo de la profundidad del pozo o de los problemas que se encuentren durante la perforación, será necesario colocar una o más tuberías de revestimiento intermedia, que aislaran la zona problema. (Fig. 3)

➤ **Revestidor de producción**

Tienen como meta primordial aislar el yacimiento de fluidos indeseables en la zona productora y en otras zonas del pozo, también para la instalación de empacadores de producción o accesorios utilizados en la terminación del mismo. En el diseño de esta tubería se deberá tener especial atención considerando todos los elementos que intervienen en su programación. Las profundidades a las que se coloca este tubo pueden variar desde 1500 hasta por encima de 25000 pies (460m a 7620m).

➤ **Liners**

Constituyen una instalación especial que evita utilizar una tubería desde la superficie hasta el fondo del pozo; estas tuberías son suspendidas desde el fondo de la tubería revestidora anterior, quedando una parte solapada dentro de la última tubería que puede variar de 50 a 150 m, y que en ocasiones se emplea una longitud mayor, dependiendo del objetivo de su introducción.

2.3 Razones de utilización

- Aislar zonas de alta o baja presión y terminar de continuar la perforación con fluidos de alta o baja densidad
- Economía en los revestidores; debido a que es posible realizar pruebas de producción de horizontes cercanos al final de la última tubería de revestimiento, a un costo muy bajo, no comparable con una tubería llevada hasta la superficie
- Rápida instalación; este tipo de tubería puede colocarse en el intervalo deseado mucho más rápido que las tuberías normales.

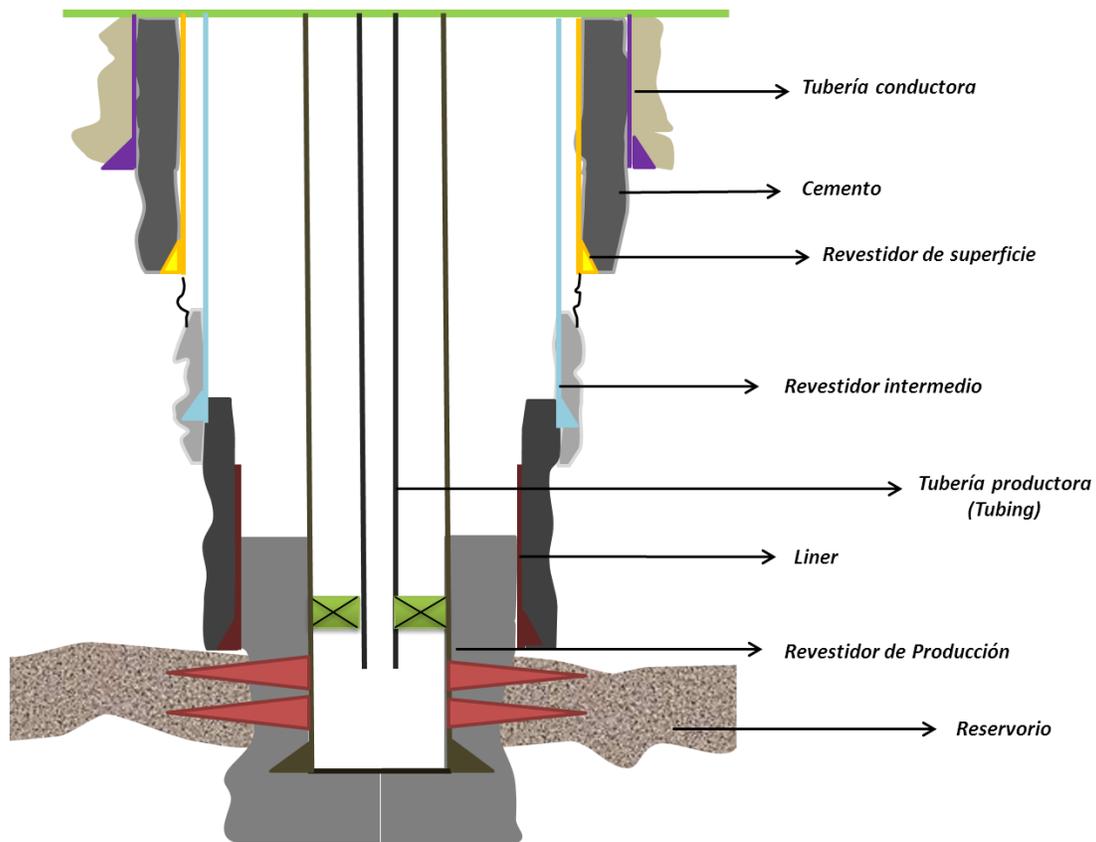


Fig.3 Esquema de un pozo completado; en donde se muestra la distribución típica de los Revestidores. (Tomado y modificado de Rahman S, et al. 1995)

2.4 Centralizadores

Los centralizadores son herramientas usadas para seguir el proceso de colocación del revestidor y ubicarlo en el centro del pozo. Este tipo de accesorios crea un área anular de flujo uniforme y minimiza la variación de las resistencias de las fuerzas de arrastre, a través de esa área de flujo. Los centralizadores no proporcionan una concentricidad perfecta entre el agujero y la tubería, pero incrementan sustancialmente las condiciones de separación, mientras que una tubería sin centralizadores se apoyará contra la pared del agujero. Aunque estos accesorios aparentan ser obstrucciones innecesarias, son efectivos y deben usarse donde sean aplicables.

Los centralizadores pueden ser de tipo flexible o rígido (ver Fig.4); el tipo flexible posee una habilidad mucho mayor para proporcionar la separación en el lugar en que el pozo se ha ampliado. El tipo rígido provee una separación más positiva donde el diámetro del pozo está más cerrado.



Fig.4 Centralizadores Flexibles y rígidos. Fuente: oildrilling.es

Las consideraciones de mayor importancia son: la posición, método de instalación y distancia. Los centralizadores deberán ser los adecuados y en número suficiente para que, de acuerdo a su colocación en los intervalos que presenten un interés especial, se obtenga la cementación requerida. En tuberías superficiales, intermedias y de explotación se

recomienda colocar dos centralizadores en los tres primeros tramos y después alternados en cada tercer tramo. En la tubería de explotación se requiere ubicarlos frente a las zonas productoras y extenderlos 30 m por encima y hacia abajo de ésta.

La correcta ubicación requiere consultar el registro de calibración del hoyo, ya que permite colocar los centralizadores donde el hoyo presente las mejores condiciones para su buen funcionamiento, y que no queden en donde existan derrumbes o cavernas mayores a su diámetro. En las cementaciones primarias, el éxito de una buena operación esta en función de la centralización de la T.R para obtener un desplazamiento uniforme de los fluidos. En algunos casos, los centralizadores pueden incrementar las posibilidades de bajar la tubería hasta el fondo.

2.5 Excentricidad en el revestidor

Se define como el efecto no colocación del revestidor en el centro del hoyo al final de la operación del corrimiento del mismo. Este efecto es considerado un gran problema en el proceso de diseño de las operaciones de cementación primaria, particularmente en pozos horizontales e inclinados.

Por lo general los cálculos que se realizan están basados en la existencia de un espacio anular céntrico, lo que conlleva comúnmente a resultados erróneos que no reproducen las condiciones reales a las que esta sometido el pozo en estudio. El principal problema que genera la excentricidad esta asociado con el desplazamiento incorrecto de la lechada de cemento alrededor del revestidor en el espacio anular, generando problemas de canalización de gas por ejemplo; lo que hace necesaria la implementación de trabajos de cementación secundaria correctiva. Por lo tanto, es importante que los diseños sean realizados con la mayor precisión, es decir, usando consideraciones reales y no un modelo ideal de revestidor concéntrico en las derivaciones y la aplicación de las ecuaciones utilizadas. Por lo que se requiere la estimación precisa de la excentricidad

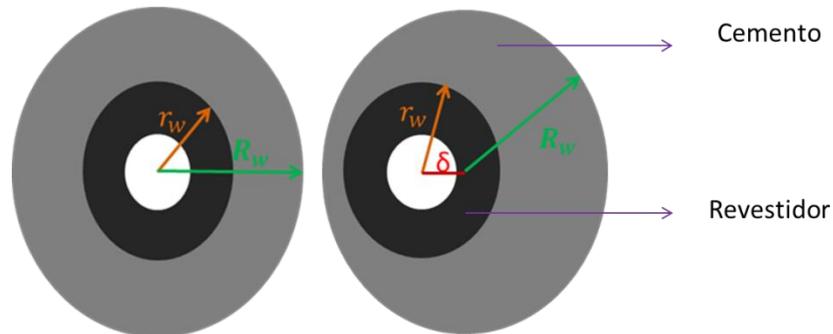


Fig. 5 Caso céntrico y excéntrico del revestidor. Modificado de: SPE 131236

El grado de excentricidad se estima a través de la siguiente expresión:

$$\epsilon = \frac{\delta}{(R_w - r_w)} \quad (2.1)$$

Donde:

δ = distancia entre el centro geométrico del revestidor y el centro geométrico del hoyo o la perforación.

R_w = Radio del hoyo

r_w = Radio externo del revestidor

2.6 Cemento petrolero

El cemento petrolero o cemento Portland como es conocido, ha sido el principal constituyente para cementar la mayoría de los pozos petroleros, su nombre proviene de su similitud con una piedra de construcción que se encontró en la isla de Portland, cerca de las costas de Inglaterra. Es un producto de calcinación y sus principales constituyentes son: caliza, barro, esquistos, bauxita y diversos materiales que contienen hierro. En la

manufactura del cemento Portland, se mezclan las cantidades apropiadas de materiales y se calientan en un horno hasta aproximadamente 1350 °C; después de someterlo a esta temperatura el material se convierte en lo que se denomina el Clinker de cemento. La composición química del cemento varía, pero en general, esta compuesto de diferentes materiales como el silicato tricálsico, aluminato tricálsico, el silicato dicálsico, ferro-aluminato tetracálsico, yeso y magnesio.

Tabla 2. Composición mineralógica del Clinker de cemento. Tomada de Guillot. N, et al. (2006)

Nombre común	Formula química	Notación en cementación	Concentración (%)
Alita	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	55-65
Belita	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	15-25
Aluminato	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	8-14
Fase ferrosa	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8-12

El cemento Portland es el constituyente principal de la mayoría de los materiales de cementación, es el cemento ordinario que ha sido usado por muchos años para la industria de construcción. Sin embargo, para su aplicación en las tuberías de revestimiento para los pozos petroleros; debido a la necesidad de bombeabilidad a más altas temperaturas y presiones, fue necesario variar las especificaciones y propiedades.

Para variar las propiedades del cemento Portland y adaptarlo al uso de las cementaciones de pozos petroleros de acuerdo a las condiciones que se espera que este sea capaz de soportar; se recurre al uso de ciertos aditivos o sustancias capaces de reaccionar con cada uno de los componentes principales, obteniendo un material con nuevas propiedades reológicas, filtrantes y de densidad. Estas sustancias o aditivos se clasifican de acuerdo al efecto que producen al ser adicionados al cemento Portland; como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3. Clasificación de los aditivos sus funciones y el tipo de sustancia implementada. (Nelson, et al. 2006)

Tipo de Aditivo	Función	Mas usados
Aceleradores	Reducen el tiempo de fraguado y aumentan el porcentaje de desarrollo la resistencia a la compresión del material	Cloruro de calcio $CaCl_2$ Silicato de sodio Na_2SiO_3 Cloruro de sodio $NaCl$ Ácido oxálico $H_2C_2O_4$
Retardantes	Retrasan el tiempo de fraguado y contrarrestan los efectos de aumento de la temperatura en el cemento.	Lignitos Ácidos Hidroxicarboxílicos Azúcares Derivados celulósicos
Extensores	Disminuyen la densidad reduciendo la cantidad de cemento por unidad de volumen de producto fraguado	Bentonita Silicato de sodio Na_2SiO_3 Materiales puzolánicos, etc.
Densificantes	Incrementan la densidad del cemento	Barita Hematita Ilmenita
Dispersantes	Reducen la viscosidad, mejorando la colocación y cohesión del cemento	Polinaftaleno sulfonado Polimelamina sulfonado Lignosulfonatos Polímeros celulósicos
Control de filtrado	Reducen las pérdidas excesivas de agua hacia la formación	Polímeros orgánicos Reductores de fricción
Especiales	Sustancias complementarias	Éteres, Poliglicoles, Siliconas

2.6.1 Fraguado del cemento petrolero

Se conoce como fraguado al proceso mediante el cual el cemento experimenta el cambio del estado fluido al estado rígido. Químicamente el fraguado es una secuencia de reacciones exotérmicas entre los componentes del Clinker y el agua. Cuando el cemento reacciona con el agua se produce una disminución del volumen; esto ocurre debido a que la densidad absoluta del material hidratado es menor que la del reactante inicial (Nelson, et al. 2006). En las condiciones de confinamiento de un pozo, ese incremento en el volumen absoluto puede afectar la transmisión de la presión hidrostática a la formación (Ver fig.6),

lo que afecta a su vez la habilidad del cemento para prevenir la migración de fluidos en el espacio anular.

Por otro lado la temperatura es uno de los factores que más afecta el proceso de fraguado, por ejemplo, una elevación de la temperatura acelera el proceso de hidratación del cemento disminuyendo el tiempo de fraguado. En general la velocidad de hidratación del cemento, su naturaleza, estabilidad y la morfología de los productos terminado el fraguado son fuertemente dependientes de este parámetro.

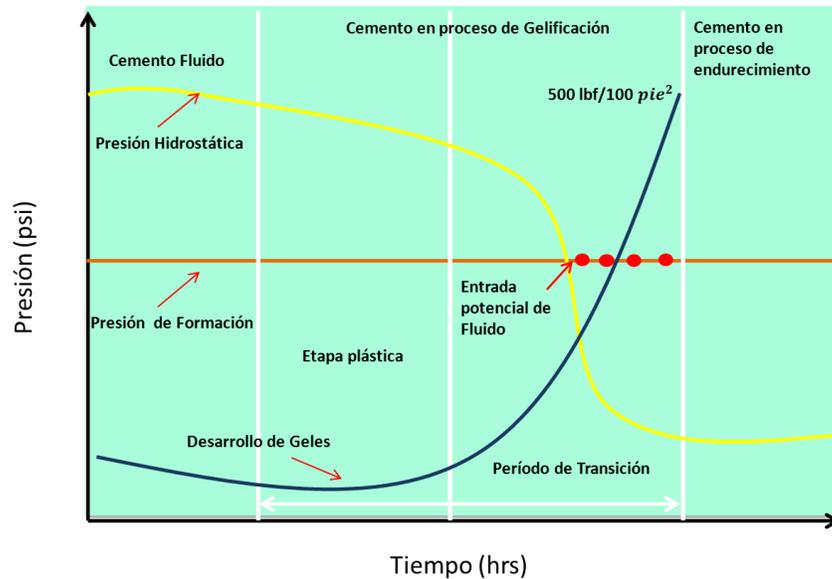


Fig.6 Cambio de estado del cemento de líquido a sólido.

Fuente: tecnologiadelaconstruccionuss.blogspot.com

2.6.2 Clasificación de los cementos petroleros

La clasificación de los cementos petroleros se hace de acuerdo a los criterios determinados por la API y a partir de esta clasificación se derivan todas las lechadas

utilizadas en los campos petroleros. Estos criterios de clasificación están basados de acuerdo a la resistencia del material a los sulfatos (CIED-PDVSA, 1997).

- **Cemento clase A:** Esta diseñado para emplearse a 1830m de profundidad como máximo, con temperaturas de 77°C, y donde no se requieran propiedades especiales.
- **Cemento clase B:** Diseñado para emplearse hasta 1830m de profundidad, con temperaturas hasta 77°C, y en donde se requiera una resistencia moderada a los sulfatos.
- **Cemento clase C:** Esta diseñado para ser empleado hasta 1830m de profundidad como máximo, con temperatura de 77°C, donde se requiere alta resistencia a la compresión; se fabrica en moderada y alta resistencia a los sulfatos.
- **Cemento clase D:** Este cemento se emplea de 1830m a 3050 m de profundidad con temperatura de hasta 110°C y presión moderada. Se fabrica en alta y moderada resistencia a los sulfatos.
- **Cemento clase E:** Este cemento se usa de 1830 a 4270m de profundidad con temperatura de 143 °C y alta presión. Se fabrica en alta y moderada resistencia a los sulfatos.
- **Cemento clase F:** Se usa desde 3050 a 4880m de profundidad con temperaturas de 160 °C, en donde existe alta presión. Se fabrica en alta y moderada resistencia a los sulfatos.
- **Cementos clase G Y H:** Son básicos para emplearse desde la superficie hasta 2240 m tal como se fabrican. Pueden modificarse con aceleradores y retardadores para usarlos en un amplio rango de condiciones de presión y temperatura.

2.6.3 Cementación

La cementación es un proceso que consiste en mezclar cemento seco (Clinker) el cual contiene todos los componentes del cemento y el yeso que se le agrega como ingrediente final, además de ciertos aditivos y agua, para formar lo que se denomina una lechada de cemento la cual es bombeada al pozo a través de la tubería de revestimiento y colocarlo en el espacio anular entre el hoyo y el diámetro externo del revestidor.

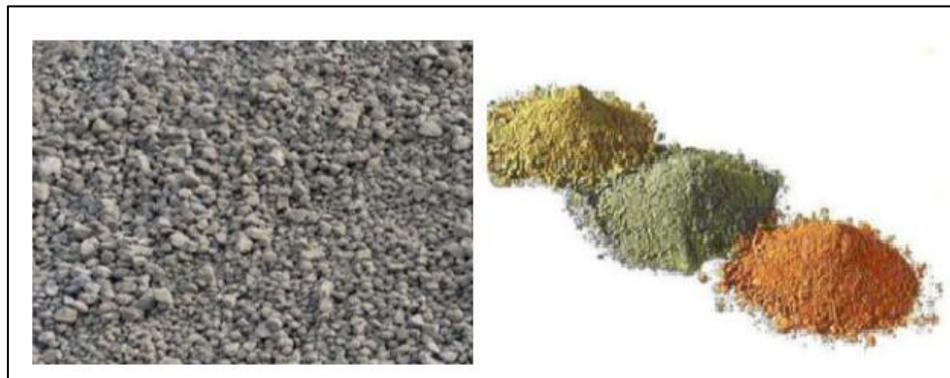


Fig. 7 Clinker y algunos aditivos del cemento. Fuente: tecnologíadelaconstruccionussblogspot.com

El volumen a bombear es predeterminado para alcanzar las zonas críticas (alrededor del fondo de la zapata, espacio anular, formación permeable, hoyo desnudo, etc.). Luego se deja fraguar y endurecer, formando una barrera permanente e impermeable al movimiento de fluidos detrás del revestidor.

Entre los propósitos principales de la cementación se pueden mencionar los siguientes:

- Proteger y asegurar la tubería de revestimiento en el hoyo.

- Aislar zonas contenedoras de diferentes fluidos; como zonas contenedoras de agua superficial y evitar la contaminación de las mismas por el fluido de perforación o por los fluidos del pozo, y evitar o resolver problemas de pérdida de circulación y pega de tuberías.

2.6.4 Clasificación de las cementaciones: Se clasifican de acuerdo a los objetivos que se persiguen en:

- Cementación primaria
- Cementación secundaria o cementación forzada.
- Tapones de cemento.

✓ **Cementación primaria**

Es el proceso que consiste en colocar el cemento en el espacio anular, entre la tubería de revestimiento y la formación expuesta del agujero, asegurando un sello completo y permanente.

✓ **Objetivos de la cementación primaria:**

- Proporcionar aislamiento entre las zonas del pozo que contiene agua, aceite y gas.
- Soportar el peso de la propia tubería de revestimiento.
- Reducir el proceso corrosivo de la tubería de revestimiento con los fluidos del pozo y con los fluidos inyectados de estimulación.

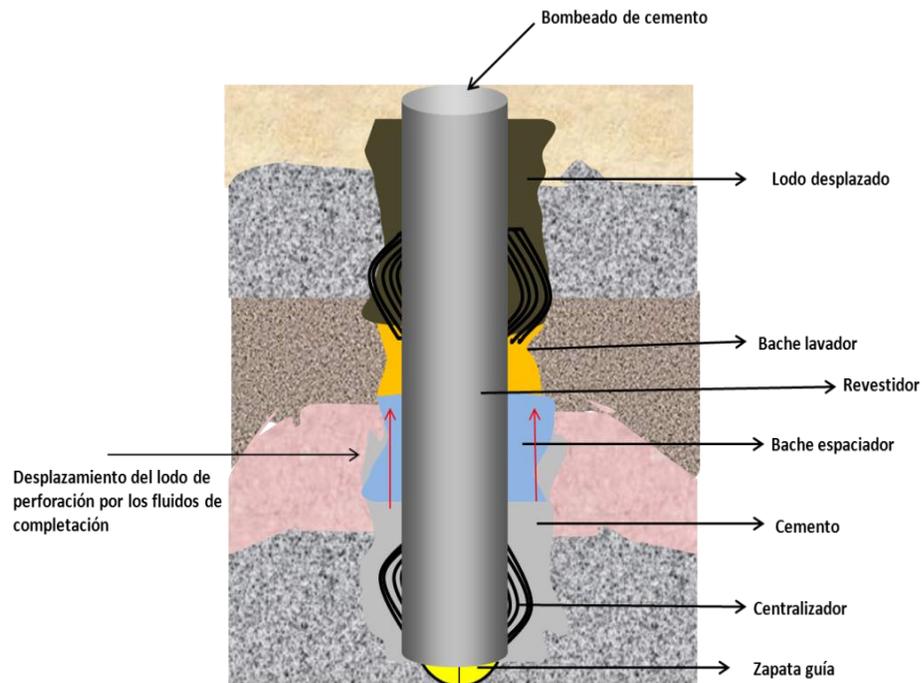


Fig.8 Trabajos de cementación Primaria. Modificado de Nelson B, et al. (2006)

El reto es obtener sellos hidráulicos efectivos en las zonas que manejan fluidos a presión. Para lograrlo es indispensable mejorar el desplazamiento del lodo de perforación en el tramo de espacio anular que se va a cementar consiguiendo así una buena adherencia sobre las caras de la formación y de la tubería de revestimiento, sin canalizaciones en la capa de cemento y con un llenado completo.

✓ **Cementación secundaria o forzada**

Es el proceso que consiste en inyectar cemento a presión a través de disparos o ranuras en la tubería hacia el espacio anular. Ésta es una medida correctiva a una cementación primaria defectuosa.

✓ **Objetivos de la cementación secundaria:**

- Mejorar el sello hidráulico entre dos zonas que manejan fluidos
- Eliminar la intrusión de agua al intervalo productor
- Corregir una canalización en la cementación primaria

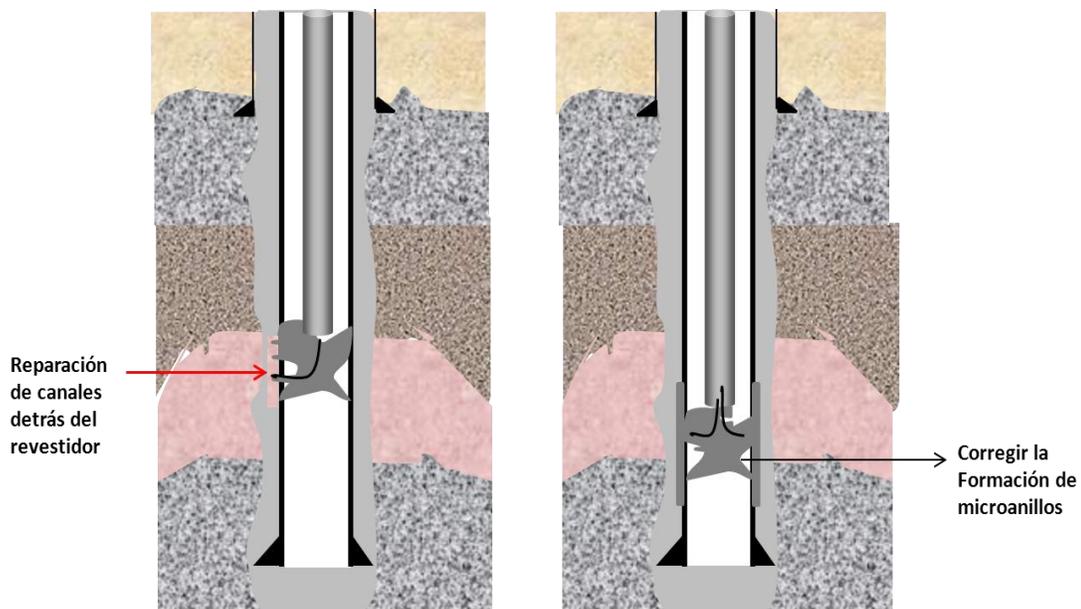


Fig.9 Aplicación de la cementación secundaria para corregir anomalías en el pozo. Modificado de Nelson B, et al. (2006)

✓ **Tapones de Cemento**

Comprenden un cierto volumen de lechada de cemento, colocado en el hoyo o en el interior del revestidor.

✓ **Objetivos de los tapones de cemento:**

- Desviar la trayectoria del pozo para iniciar una perforación direccional
- Taponar una zona del pozo o taponar el pozo
- Resolver un problema de pérdida de circulación en la etapa de perforación

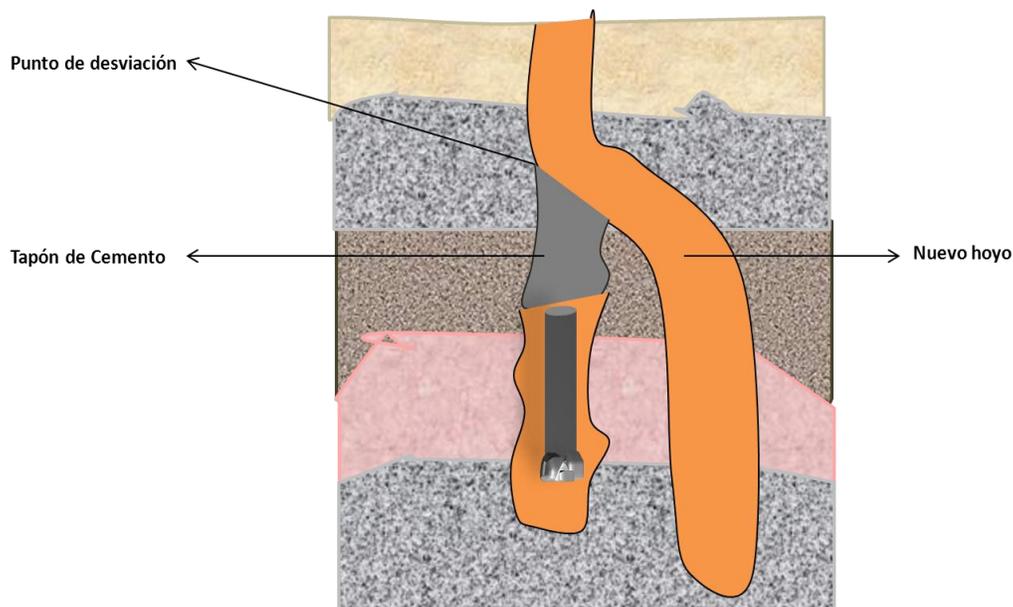


Fig.10 Utilización de un Tapón de cemento para desviar la trayectoria de un pozo.

Modificado de Nelson B, et al. (2006)

2.7. Integridad mecánica del cemento

Actualmente en el proceso de construcción de pozos petroleros, los criterios de diseño del cemento se basan en las condiciones de carga a las que el mismo será sometido; ya sean por condiciones operacionales (prácticas de estimulación) o de acuerdo a las condiciones intrínsecas de presión y temperatura en fondo de pozo.

Debido a estas condiciones de carga la integridad mecánica del cemento se puede ver comprometida, por lo que se hace necesario estudiarlas individualmente y estimar los esfuerzos que generan en la capa de cemento fraguado en el pozo, estas condiciones se resumen en las siguientes:

- **Cambios de temperatura:** Asociados a prácticas de estimulación como inyección de vapor (tecnología SAGD) y variaciones asociadas a las condiciones de fondo de pozo (aumento de temperatura con la profundidad).
- **Cambios de presión interna:** Se asocian a la utilización de fluidos de perforación y completación de distintas densidades y a las prácticas de estimulación como fracturamiento hidráulico.
- **Cambio de esfuerzos en situ:** Ocurre desde el momento en que se perfora el subsuelo, en donde el estado de esfuerzos primario de la roca es alterado, el cual es producto de la presión ejercida por la columna de roca suprayacente, cuya magnitud varía con la profundidad desde el punto de ubicación a la superficie; por otro lado, cerca de la superficie estos esfuerzos primarios son influenciados por fuerzas tectónicas, fracturamiento y cambios en las propiedades elásticas de la roca.

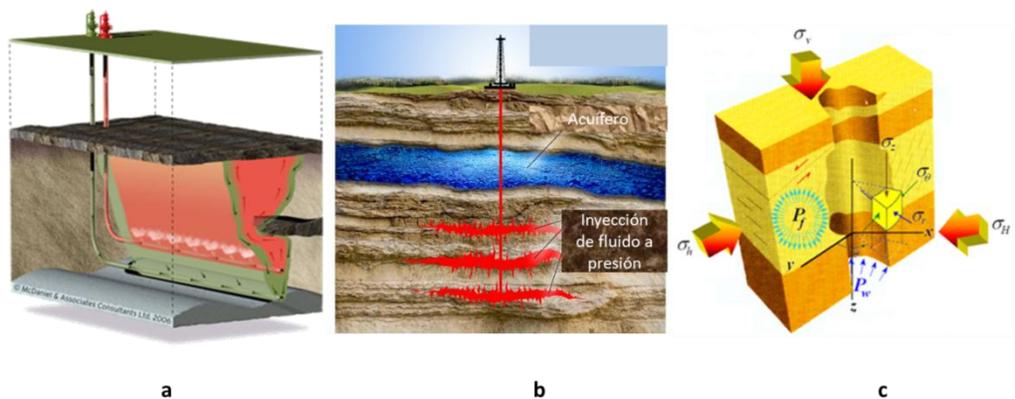


Fig. 11 Prácticas que alteran la integridad mecánica del cemento; (a) Tecnología SAGD; (b) Fracturamiento Hidráulico; (c) cambio de esfuerzos in situ. Modificado de: a5.photos.ak.fbcdn.net, oilproduction.net

2.8 Caracterización mecánica de un material

2.8.1 Teoría de la elasticidad

El término elasticidad designa la propiedad 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 deformables describe cómo un sólido se mueve y deforma como respuesta a fuerzas exteriores. En general se dice que un sólido elástico está deformado cuando la distancia relativa entre dos puntos del cuerpo ha cambiado, esto es opuesto a la definición de un cuerpo rígido donde los puntos del cuerpo permanecen constantes.

2.8.2 Esfuerzo

El esfuerzo en un punto se define como el límite de la fuerza aplicada en una pequeña región sobre un plano que contenga al punto dividida del área de la región, es decir, el esfuerzo es la fuerza aplicada por unidad de superficie y depende del punto elegido, del estado tensional de sólido y de la orientación del plano escogido para calcular el límite. Por ejemplo tomando el vector fuerza sobre el plano $X=0$; $\Delta\mathbf{F} = (\Delta F_x, \Delta F_y, \Delta F_z)$.

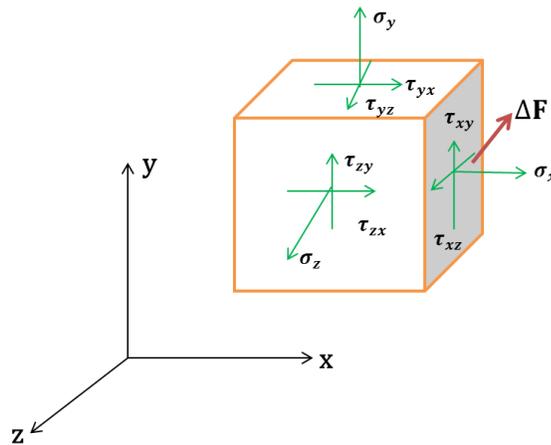


Fig.12 Esfuerzos normales y cortantes sobre los planos de un cubo sometido a una fuerza.

Modificado de Tirupathi . R, et al. (1999)

Los esfuerzos promedios:

$$\sigma_x = \frac{\Delta F_x}{\Delta A} ; \quad \tau_{xy} = \frac{\Delta F_y}{\Delta A} ; \quad \tau_{xz} = \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad (2.2)$$

Si $\Delta A \rightarrow 0$ tenemos los esfuerzos instantáneos.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} = \frac{dF_x}{dA} \\ \tau_{xy} &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} = \frac{dF_y}{dA} \\ \tau_{xz} &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} = \frac{dF_z}{dA} \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.8.3 Deformación

Es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo, en general se dice que un sólido elástico está deformado cuando la distancia relativa entre los puntos del cuerpo ha cambiado. (Martin, S. 2005)

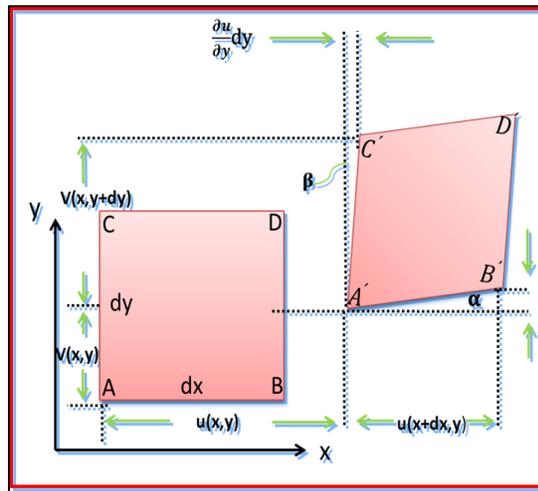


Fig.13 Esquema de un elemento cuadrado en el estado no deformado y deformado respectivamente. Modificado de Martin S. (2005)

La deformación normal en una dirección n se define como el cambio de longitud por unidad de longitud de las fibras del cuerpo orientadas en la dirección n; tomando x en este caso:

$$\epsilon_x = \frac{A'B' - AB}{AB} \quad (2.4)$$

Y de la geometría se obtiene:

$$A'B' = \sqrt{\left(dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} \approx \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right) \quad (2.5)$$

Sustituyendo se tiene que:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.6)$$

Por otro lado, la deformación cortante se define como el cambio del ángulo entre dos direcciones originalmente ortogonales.

De la figura:

$$\gamma_{xy} = \frac{\pi}{2} - \angle C'A'B' = \alpha + \beta \quad (2.7)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx}{dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx} + \frac{\frac{\partial u}{\partial y} dy}{dy + \frac{\partial v}{\partial y} dy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.8)$$

Las componentes de esfuerzos y deformaciones pueden ser representadas en forma de un tensor de rango 2 de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Con:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.10)$$

Donde $u_i; u_j$ son las componentes del denominado tensor gradiente de desplazamiento el cual viene dado por:

$$\mathbf{u}_{i,j} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

2.9. Ley de Hooke

Las relaciones entre las componentes de los esfuerzos y las deformaciones fueron establecidas experimentalmente por lo que se conoce hoy en día como la ley de Hooke.

Las ecuaciones constitutivas Lamé-Hooke tienen la forma:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l} C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2.12)$$

C_{ijkl} es un tensor de cuarto orden, en donde sus componentes incluyen todos los parámetros necesarios para caracterizar el material. En general este tensor tiene 81 componentes, sin embargo al considerar la simetría de los esfuerzos y las deformaciones;

ademas de introducir el concepto de energia de deformación; este número se reduce a 21 componentes.

Por otra parte tenemos que si el material es homogéneo su comportamiento elástico no varía espacialmente por lo que dichas componentes serán constantes. A cada uno de estos parámetros se les conoce como módulos elásticos; de acuerdo a esto las relaciones constitutivas de un material homogéneo e isótropo se escriben de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \lambda (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2\mu\varepsilon_x \\
 \sigma_y &= \lambda (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2\mu\varepsilon_y \\
 \sigma_z &= \lambda (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2\mu\varepsilon_z \\
 \tau_{xy} &= 2\mu\varepsilon_{xy} \quad \tau_{yz} = 2\mu\varepsilon_{yz} \quad \tau_{zx} = 2\mu\varepsilon_{zx}
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

En estas ecuaciones λ y μ representan la constante de Lamé y el módulo de corte o de rigidez respectivamente., cabe acotar entonces que solo son necesarios dos modulos elasticos para describir el comportamiento de un material homogéneo e isótropo.

Otra forma de expresar estas ecuaciones muchas veces mas conveniente que la mostrada anteriormente se obtiene al invertir las relaciones obteniendo las deformaciones en funcion de los esfuerzos; pudiendo escribir lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\
 \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\
 \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_y + \sigma_x)]
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xy} &= \frac{1+\nu}{E} \tau_{xy} = \frac{1}{2\mu} \tau_{xy} \\ \varepsilon_{yz} &= \frac{1+\nu}{E} \tau_{yz} = \frac{1}{2\mu} \tau_{yz} \\ \varepsilon_{zx} &= \frac{1+\nu}{E} \tau_{zx} = \frac{1}{2\mu} \tau_{zx}\end{aligned}\tag{2.15}$$

Donde: $E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{(\lambda+\mu)}$; $\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$ se conocen como módulo de elasticidad o módulo de Young; y coeficiente de Poisson respectivamente.

El módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal (E) es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Este comportamiento fue observado y estudiado por el científico inglés Thomas Young. Para un material elástico lineal e isótropo, el módulo de Young tiene el mismo valor para una tracción que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda el límite elástico, y es siempre mayor que cero.

Cuando se estira longitudinalmente un material elástico lineal e isótropo y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento, El coeficiente de Poisson (ν) proporciona una medida del estrechamiento de sección en un material elástico lineal e isótropo. El nombre de dicho coeficiente se le dio en honor al físico francés Simeón Poisson. El valor máximo de este parámetro es de 0.5 para un material incompresible, por ejemplo los cementos convencionales presentan un coeficiente de Poisson de 0.15

2.10. Curva esfuerzo - deformación

El método más común para estudiar el comportamiento mecánico de un cuerpo o una roca en particular se realiza a través de ensayos de laboratorio; para lo cual se someten a compresión axial muestras del material, en donde dependiendo de la dirección en la que se aplique el esfuerzo es posible obtener tres tipos de configuración.

Si la superficie lateral del material se encuentra libre de tracción, tenemos un cuerpo sometido a compresión uniaxial (ver Fig.14.a). En este caso el estado de esfuerzos resultantes es $\sigma_1 > 0$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. Para el caso en que hay presencia de tracciones laterales y que además son iguales (ver Fig. 14, b), se dice que el material está bajo una presión de confinamiento, en donde el estado de esfuerzos viene dado por $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$. Por último la configuración más general es aquella en donde los esfuerzos tienen valores diferentes, a este estado se le conoce como compresión triaxial (ver Fig. 14.c), siendo el estado de esfuerzos respectivo $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$,

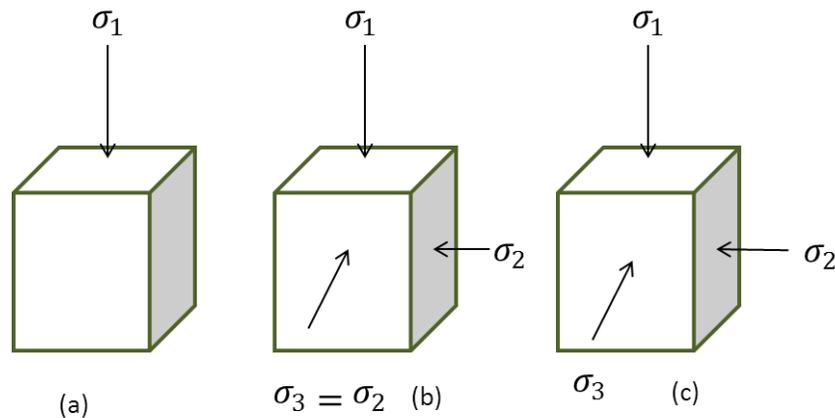


Fig.14 Estados de compresión (a) uniaxial;(b) de confinamiento y (c) compresión triaxial respectivamente. Modificado de Jaeger J.C, et al. (2007)

La respuesta del material en cada una de estas configuraciones se representa mediante una curva esfuerzo-deformación, en donde σ se grafica en función de ϵ . El

comportamiento o la respuesta más simple de un material ocurre cuando la deformación incrementa linealmente con el esfuerzo (Jaeger. et al, 2007), terminando en una falla abrupta en un punto P; este tipo de comportamiento es conocido como elasticidad lineal (Fig.15.a).

Bajo esta definición el comportamiento del material es el mismo durante la carga y la descarga. Para el caso de un material con comportamiento no lineal la pendiente de la curva varia con el valor del esfuerzo (Fig.15.b). Por lo que es necesario definir dos tipos de módulos elásticos. El modulo secante el cual se define como la razón entre el esfuerzo total y la deformación total, y es igual a la pendiente de la línea OP, como sigue:

$$E_{sec} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.16)$$

Por otro lado tenemos el modulo tangente, el cual se define como la pendiente de la línea PQ (Fig.15.b).

$$E_{tan} = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad (2.17)$$

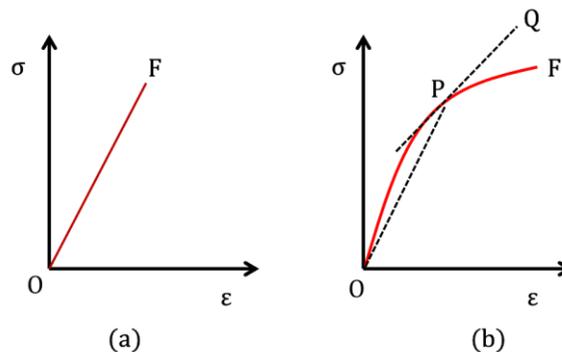


Fig.15 (a) Comportamiento lineal con falla abrupta en F y (b) comportamiento no lineal.

Tomado de Jaeger J.C, et al. (2007)

2.11 Termoelasticidad

La teoría de termoelasticidad toma en cuenta el efecto de cambios en la temperatura de un cuerpo sobre su estado de esfuerzos y desplazamientos, en general el campo de deformaciones es el resultado de acciones tanto mecánicas como térmicas; por otra parte, dentro del contexto de la teoría de elasticidad lineal, la deformación total se puede descomponer como la suma de una componente mecánica y una componente térmica como sigue:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^M + \varepsilon_{ij}^T \quad (2.18)$$

Si T_0 es tomada como la temperatura de referencia y T es una temperatura arbitraria, la deformación asociada a efectos térmicos en un sólido no deformado puede ser escrita como se muestra a continuación:

$$\varepsilon_{ij}^T = \alpha_{ij}(T - T_0) \quad (2.19)$$

Donde α_{ij} es el tensor de dilatación térmica, tenemos que si la variación en la temperatura genera una deformación normal, si el material es isotrópico el tensor α_{ij} será un tensor simétrico de segundo orden y es posible escribirlo como sigue:

$$\varepsilon_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\delta_{ij} \quad (2.20)$$

δ_{ij} Es la delta de Kronecker la cual se anula cuando los índices son distintos y se hace uno cuando son iguales, y la constante α se denomina coeficiente de dilatación térmica; en la siguiente tabla se muestran las constantes elásticas de diferentes materiales

usados comúnmente en aplicaciones de ingeniería en donde se incluye el coeficiente de dilatación térmica para cada uno.

Tabla 4. Módulos elásticos y coeficiente de dilatación térmica para distintos materiales. Tomado de Martin. S (2005)

<i>Material</i>	<i>E (Gpa)</i>	<i>ν</i>	<i>α (10^6 /$^{\circ}\text{C}$)</i>
Aluminio	68.9	0.34	25.5
Concreto	27.6	0.20	11
Cobre	89.9	0.34	18
Vidrio	68.9	0.25	8.8
Nylon	28.3	0.40	102
Acero	207	0.29	13.5

Finalmente tomando en cuenta la elasticidad lineal y la termoelasticidad en el comportamiento de los materiales, se hace posible expresar las componentes del desplazamiento \mathbf{u} como una combinación lineal de las componentes del tensor deformación del sólido como sigue:

$$\mathbf{u} = u\varepsilon_x + v\varepsilon_y + w\varepsilon_z + \alpha\Delta T \quad (2.21)$$

Las componentes del desplazamiento son obtenidas mediante la solución de las ecuaciones diferenciales asociadas a la condición de equilibrio en el cuerpo.

2.12. Esfuerzos y equilibrio

Sea un cuerpo tridimensional que ocupa un cierto volumen V y que tiene una superficie S , sobre la superficie se aplica una tracción T^n , y una fuerza distribuida por unidad de volumen, por ejemplo, el peso del cuerpo F .

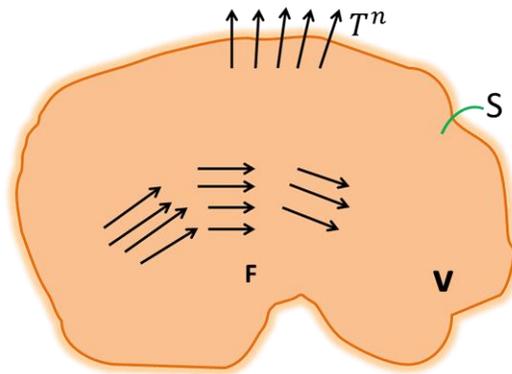


Fig. 16 Volumen de un cuerpo sometido a fuerzas, Sin embargo el mismo esta en equilibrio estático.

Modificado de Martin S. (2005)

Considerando la condición de equilibrio estático sobre dicho cuerpo se debe cumplir lo siguiente:

$$\iint_S T^n dS + \iiint_V F_i dV = 0$$

(2.22)

$$\iint_S \sigma_i \cdot \vec{n} dS + \iiint_V F_i dV = 0$$

Donde: $T^n = \sigma_i \cdot n$

Aplicando el teorema de la divergencia es posible escribir lo siguiente:

$$\iiint_V (\nabla \cdot \sigma_{ji} + F_i) dV = 0$$

(2.23)

Debido a que la región de integración es arbitraria y el integrando es continuo:

$$(\nabla \cdot \sigma_{ji} + F_i) = 0 \quad (2.24)$$

De donde es posible escribir lo siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z &= 0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

En estas ecuaciones al introducir las relaciones entre las componentes de los esfuerzos y las deformaciones, tomando en cuenta que $\mu = E / (2(1+\nu))$ y $\lambda = E\nu / ((1+\nu)(1-2\nu))$ tenemos finalmente:

$$\begin{aligned} \mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + F_x &= 0 \\ \mu \nabla^2 v + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + F_y &= 0 \\ \mu \nabla^2 w + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + F_z &= 0 \end{aligned} \quad (2.26)$$

En forma vectorial queda:

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) + \vec{F} = 0 \quad (2.27)$$

Esta forma de escribir el sistema de ecuaciones se conoce como formulación en desplazamiento de Navier, en donde tenemos tres ecuaciones con tres incógnitas, es decir, las componentes del tensor desplazamiento.

Por otra parte, tenemos que de acuerdo a la geometría del pozo, es conveniente describir las ecuaciones en coordenadas cilíndricas, en donde tenemos un sistema conformado por tres cilindros concéntricos asociados a la estructura del pozo; es decir, la tubería, el cemento y la formación: la siguiente figura muestra lo descrito anteriormente:

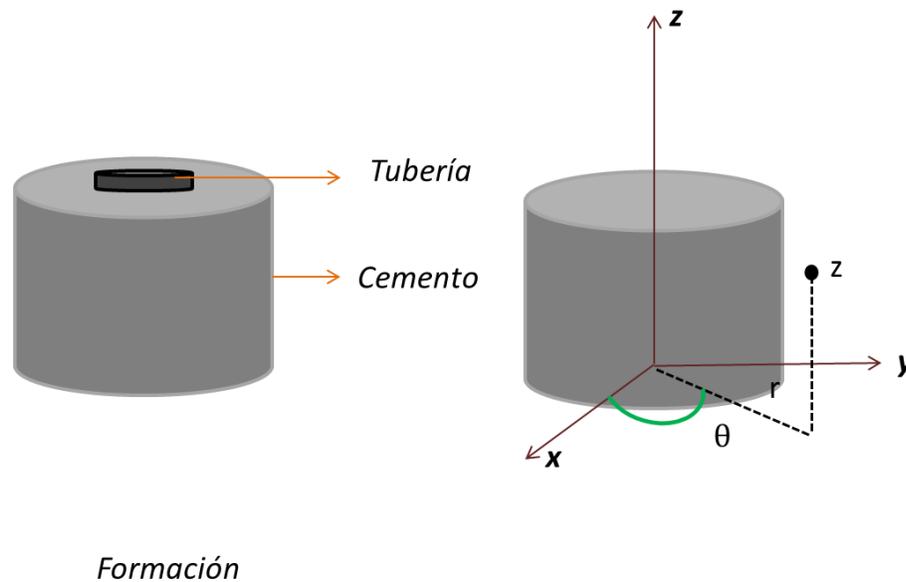


Fig.17 Esquema del sistema revestidor-cemento-formación geológica a través de cilindros concéntricos acoplados entre sí.

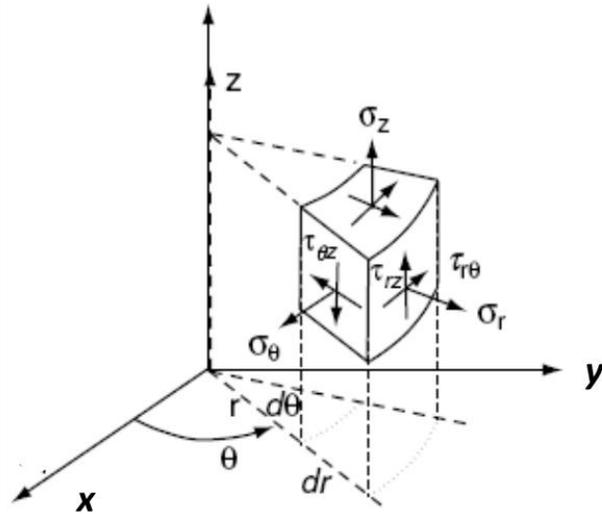


Fig.18 Esfuerzos que experimenta el Cemento; expresados en coordenadas cilíndricas.

De acuerdo a la configuración del problema que se desee resolver existen condiciones de simetría en los esfuerzos y las deformaciones, producto de las cargas aplicadas que permiten reformular el sistema de forma bidimensional; estas condiciones se conocen como esfuerzo plano y deformación plana, en cada caso las ecuaciones se pueden expresar como se muestra a continuación:

2.13 Esfuerzo plano

Consiste en la ausencia de esfuerzo en una dirección; por ejemplo el eje z, es decir, $\tau_{xz} = 0, \tau_{yz} = 0, \sigma_z = 0$; de acuerdo a esta condición la relación entre esfuerzos y deformaciones quedan:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{yx} \end{pmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} = \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{yx} \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

2.14 Deformación Plana

Se produce cuando el cuerpo no experimenta deformaciones a lo largo de una dirección; por ejemplo el eje z ; $\varepsilon_z = 0, \gamma_{zx} = 0, \gamma_{yz} = 0$, Para este caso las ecuaciones se transforman de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{yx} \end{pmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} = \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{yx} \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

Donde E es el módulo de Young y ν es el coeficiente de Poisson.

Tomando en cuenta la condición de deformación plana, es posible reescribir las ecuaciones de Navier como sigue:

$$\begin{aligned} \mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + F_x &= 0 \\ \mu \nabla^2 v + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + F_y &= 0 \end{aligned} \quad (2.30)$$

De acuerdo a la geometría del problema que se va a resolver, es conveniente utilizar un sistema de coordenadas polares (r, θ) ; en la cual al realizar la correspondiente transformación se obtiene que:

$$\mu \nabla^2 u_r + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) + F_r = 0$$

(2.31)

$$\mu \nabla^2 u_\theta + (\lambda + \mu) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) + F_\theta = 0$$

El problema consiste en hallar u_r y u_θ ; para lo cual a que recurrir a métodos de resolución a este tipo de ecuaciones ya sean de forma analítica o numérica.

2.15. Factor de concentración de esfuerzos

Las ecuaciones elementales usadas en el diseño y construcción de estructuras se basan en la simplificación de que todos los elementos constan de una sección transversal constante o que el cambio en la misma es gradual. Estas condiciones, sin embargo, difícilmente se encuentran en la realidad debido a los requerimientos o las características de los elementos que conforman las máquinas o las estructuras actuales. La presencia de surcos, agujeros o cambios drásticos en la geometría, etc. Provocan modificaciones en la distribución de los esfuerzos. Por lo que aparecen esfuerzos mayores en algunas zonas, este fenómeno se conoce como concentración de esfuerzos. (Pilkey, W. 2008).

La concentración de esfuerzos se define como la discontinuidad en la distribución de esfuerzos que se produce en la sección transversal de una pieza en la que tiene lugar alguna discontinuidad geométrica o de la carga aplicada, tal como un taladro, o un cambio de sección, una carga concentrada, etc.

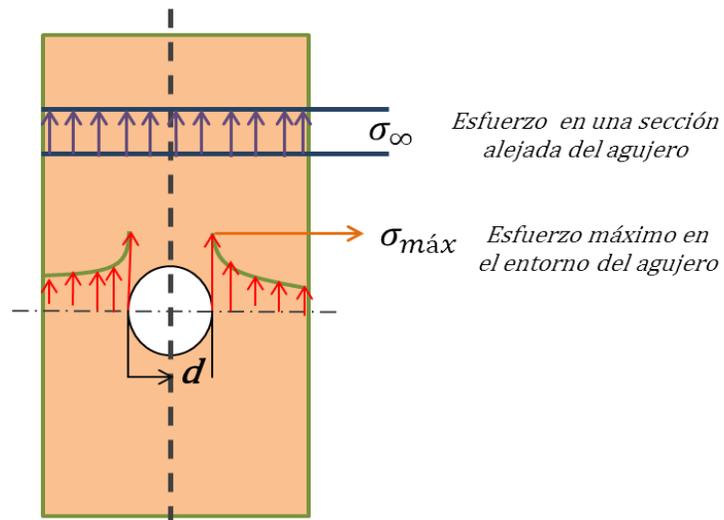


Fig.19 Esfuerzos máximo y de campo lejano en una placa con un orificio.

Modificado de Pilkey, W. (2008)

La concentración de esfuerzos se mide a través del cálculo del factor de concentración de esfuerzos K , el cual se obtiene como la razón entre el esfuerzo máximo que experimenta el cuerpo en la zona perturbada, entre lo que se denomina esfuerzo de referencia o nominal, siendo esta cantidad el esfuerzo base correspondiente a la geometría con respecto a la cual se quiere comparar el aumento del esfuerzo por la presencia de la discontinuidad; dicha relación se escribe como sigue:

$$K = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{\infty}} \quad (2.32)$$

Con:

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo máximo en el entorno a la discontinuidad.

σ_{∞} : Esfuerzo de referencia o nominal.

Los factores de concentración de esfuerzos, históricamente han sido y actualmente son muy útiles para poder emplear metodologías de cálculo tradicionales (Resistencia de Materiales) sin incurrir en graves errores de representatividad del estado tensional.

Para la obtención de los factores de concentración de esfuerzos usualmente se recurría a ensayos de foto-elasticidad o termo-elasticidad radiométrica los cuales son métodos costosos en términos generales. Sin embargo, hoy en día con el avance computacional es mucho más fácil obtener los factores concentradores de esfuerzos mediante el empleo de plataformas de cálculo por elementos finitos bidimensionales y/o tridimensionales, con las cuales se puede hallar en forma precisa el valor de los esfuerzos en los puntos de interés.

Este parámetro es ampliamente usado en los métodos de diseño de estructuras, ya que cuando el trabajo experimental es realizado con suficiente precisión, se obtienen resultados muy útiles que hacen posible determinar en que grado la presencia de discontinuidades en el material comprometen la integridad del mismo (Ferdinand, et al. 2007).

2.16 Criterios de Falla

Se considera que un material falla cuando este se deforma y cede bajo carga estática. Con la intención de estudiar la falla en los materiales, se han desarrollado diversos criterios para predecir el punto de fractura de un material basado en las propiedades del mismo. Los criterios se aplican de acuerdo a la respuesta que se espera del material según sea frágil o dúctil.

En el caso de materiales dúctiles se aplica por lo general el criterio de Von Mises, mientras que en el caso de materiales frágiles se emplea la teoría de falla de Mohr-

Coulomb. Para efectos de estudio de las posibles fallas que se generan en el cemento petrolero se tomaran en cuentas los siguientes criterios:

- Por adherencia, en el anillo interno, interfaz cemento-tubería y en el externo, interfaz cemento-formación
- Por corte (criterio de Mohr-Coulomb)
- Por tensión

2.16.1 Falla por adherencia

La adherencia es la propiedad de la materia por la cual se unen dos superficies de sustancias iguales o diferentes cuando entran en contacto se mantienen juntas por la acción de fuerzas intermoleculares. Es necesario que esta interacción exista en el sistema tubería-cemento-formación de forma tal que se impida cualquier comunicación entre las interfaces.

En el interior de un pozo, existen, para el sistema tubería-cemento-formación, dos tipos de adherencia conocidos: cortante e hidráulica. La primera es definida como la unión que soporta mecánicamente la tubería en el interior del hoyo y es determinada midiendo la fuerza requerida para iniciar el movimiento o deslizamiento entre el revestidor y el cemento; esta fuerza es dividida por el área de la superficie de contacto entre el cemento y la tubería, obteniendo así la resistencia a la adherencia en psi. La resistencia a la adherencia hidráulica, es determinada por la aplicación de un fluido a presión (líquido o gas) en la interfaz cemento-tubería hasta que ocurra la fuga, siendo medido este valor en psig. Para generar un aislamiento zonal efectivo, la adherencia hidráulica es un factor de suma importancia que debe ser tomada en cuenta.

En tiempos recientes, el trabajo realizado por Ladva en 2004, ha permitido caracterizar mejor la adherencia presente entre el cemento y la formación. Ladva basó su investigación en formaciones que contienen arcilla; esta clase de rocas son diferentes a las

ya conocidas y desarrolladas por otros autores, como la arenisca y la caliza (Carter, et al. 1964).

Algunas de las principales consideraciones tomadas en cuenta durante el planeamiento de un trabajo de cementación desde el punto de vista de la adherencia entre cemento y tubería dentro del pozo son: a) acabado superficial de la tubería; b) fluido de perforación y c) los esfuerzos o cargas térmicas y d) las cargas por estimulación.

2.16.2 Adherencia interna (interfaz cemento-tubería)

Este tipo de adherencia considera la posibilidad de falla en la interfaz cemento-tubería por falta de adherencia entre los materiales presentes en esta zona (Figura 20).

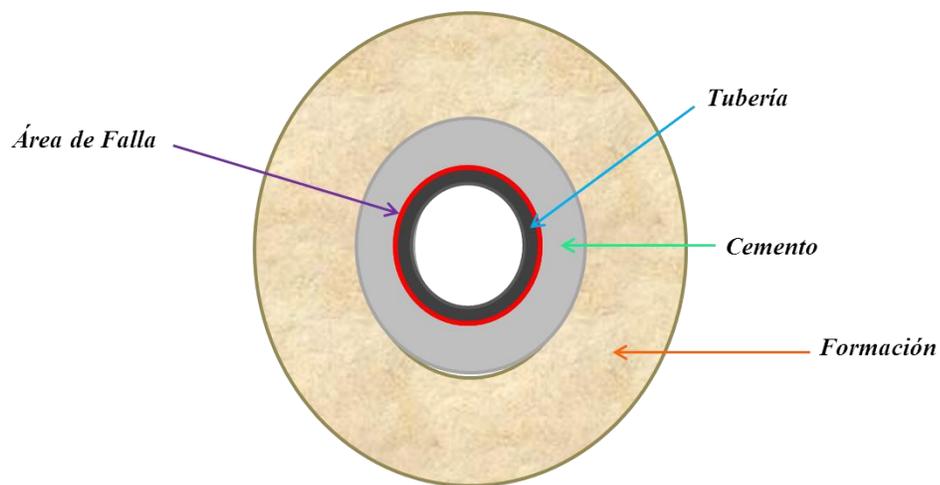


Fig.20 Modelo representativo del sistema Tubería-Cemento-Formación definiendo el área de falla por adherencia interna. Modificado de (Bois, et al. 2009)

Para su estudio se emplea la siguiente expresión, según la cual, la falla ocurre cuando el esfuerzo radial calculado en la interfaz es igual a la resistencia medida en el laboratorio:

$$\sigma_i = \sigma_R (int) \quad (2.33)$$

Y con ello estimar un índice de adherencia interna:

$$I_{a(int)} = \frac{\sigma_i}{\sigma_R(int)} \quad (2.34)$$

Donde:

σ_i = Esfuerzo en la interfaz cemento-tubería

σ_R = Valor de resistencia a la adherencia entre la tubería y el cemento

En general, si $I_{a(int)} \geq 1$ se produce la falla del cemento. El valor de σ_R se determina a través de ensayos experimentales en función a diferentes parámetros tales como: clase de cemento, tipo de tubería, características del lodo, etc.

2.16.3 Adherencia externa (interfaz cemento-formación)

Este tipo de adherencia considera la posibilidad de falla en la interfaz cemento-formación por falta de adherencia entre los materiales presentes en esta zona (Figura 21).

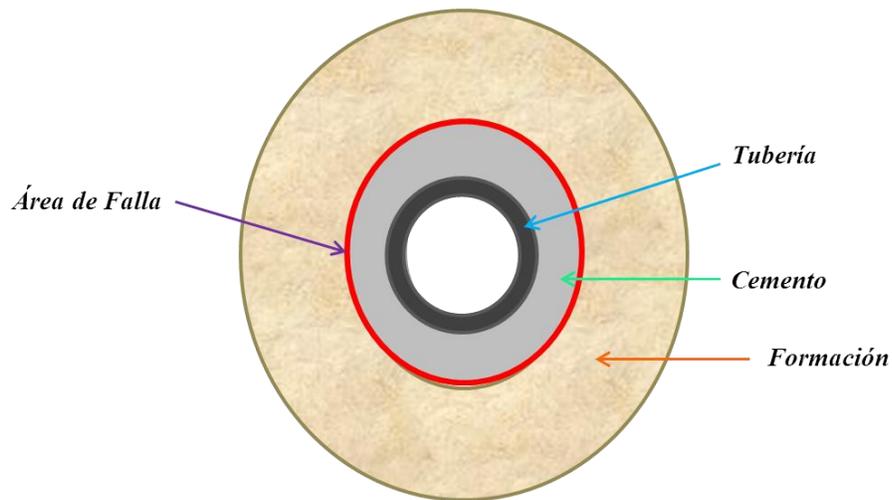


Fig.21 Modelo representativo del sistema tubería-cemento-formación definiendo el área de falla por adherencia externa. Modificado de (Bois, et al.2009)

$$\sigma_e = \sigma_R (ext) \quad (2.35)$$

Luego, se establece el índice de adherencia externa de forma similar al de adherencia interna, expresándolo como sigue:

$$I_{a(ext)} = \frac{\sigma_e}{\sigma_{R(ext)}} \quad (2.36)$$

Donde:

σ_e = Esfuerzo en la interfaz cemento-formación

$\sigma_R(ext)$ = valor de resistencia a la adherencia entre el cemento y la formación.

Si $I_{\alpha(ext)} \geq 1$ se produce la falla, el valor de $\sigma_R(ext)$ se determina de forma experimental considerando ciertos parámetros entre los cuales se hallan: tipo de formación y la clase de cemento a colocar en el interior del pozo, entre otras.

2.16.4 Falla por corte

Para analizar este caso (Figura 22), se utilizará el criterio de Mohr-Coulomb que consiste en un modelo matemático que describe la respuesta de un material tanto a esfuerzos cortantes como normales. Muchos de los materiales empleados en la ingeniería clásica siguen de alguna manera esta regla al menos en lo que respecta a su falla por esfuerzos cortantes.

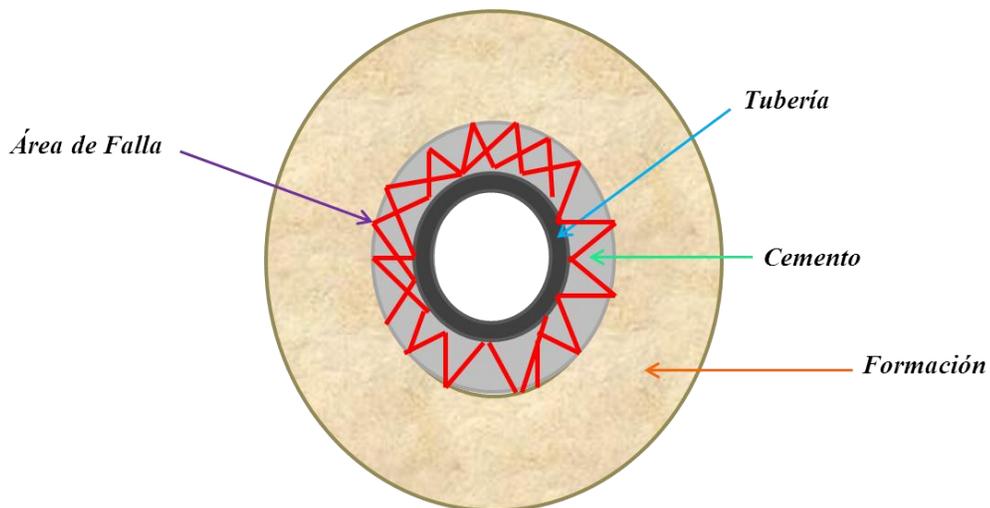


Fig.22 Modelo representativo del sistema tubería-cemento-formación definiendo el área de falla por corte. Modificado de (Bois, et al.2009)

La hipótesis de la fricción de Coulomb es usada para determinar la combinación de esfuerzos normales y cortantes que pueden causar la fractura del material. El círculo de Mohr es empleado para determinar cual de los esfuerzos principales producirá la combinación antes mencionada, así como la inclinación del plano en el que ocurrirá la fractura.

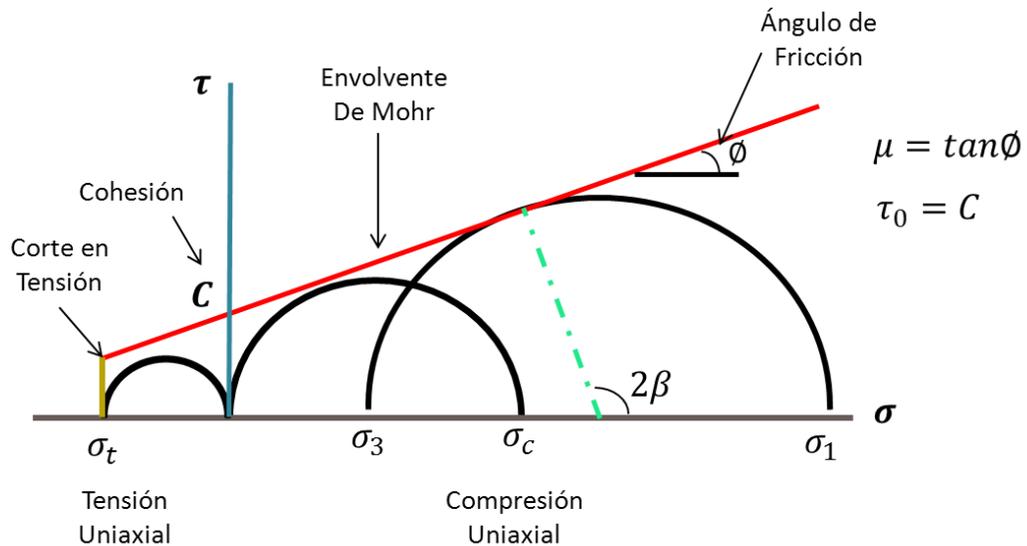


Fig.23 Representación gráfica del criterio de Mohr- Coulomb. Tomado de Jaeger, et al. (2007)

Utilizando el concepto de cohesión (fuerza cortante de la roca cuando un esfuerzo no normal es aplicado) y el ángulo de fricción interna (equivalente al ángulo de inclinación de una superficie suficiente para causar deslizamiento de un bloque de material similar situado bajo la superficie) se puede definir la envolvente de falla, la cual establece el límite del tamaño de los círculos de Mohr. En otras palabras, El criterio de Mohr-Coulomb representa la línea envolvente que es obtenida al graficar el esfuerzo cortante de un material versus el esfuerzo normal aplicado. Las coordenadas σ - τ debajo de la envolvente representan condiciones estables, coordenadas σ - τ sobre la envolvente constituyen condiciones de equilibrio y coordenadas σ - τ por encima de la envolvente, representan condiciones imposibles de alcanzar bajo carga estática. Debido a que el criterio está

desarrollado para esfuerzos de compresión, una extensión de la envolvente es utilizada para dar un valor real del esfuerzo uniaxial en tensión.

Este criterio se expresa de la siguiente manera:

$$|\tau| = C + \mu\sigma \quad (2.37)$$

Donde:

C = Fuerza de corte inherente o Cohesión del material.

μ = Coeficiente de fricción interna.

σ = Esfuerzo normal aplicado al material

2.16.5 Daño por grietas radiales

La falla por tensión en el sistema cementante (Figura 24), será analizada de la forma siguiente:

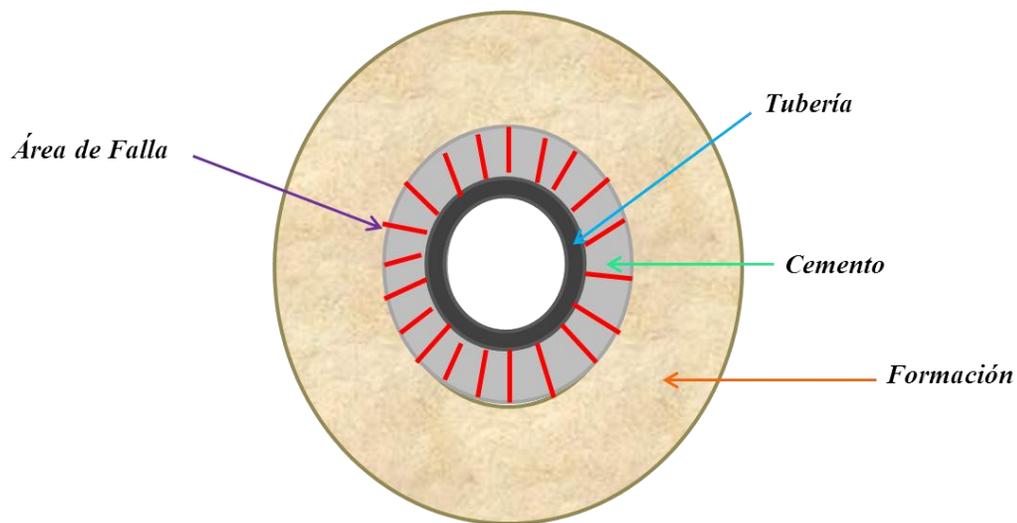


Fig.24 Modelo representativo del sistema tubería-cemento-formación definiendo el área de falla por tensión.

Para determinar el índice de falla por tensión se hará la comparación de valores de tensión máxima obtenidos de ensayos experimentales con los valores determinados a través del modelo propuesto:

$$I_t = \frac{T_{m\acute{a}x}}{R_t} \quad (2.38)$$

Donde:

$T_{m\acute{a}x}$ = Tensión máxima obtenida a través de ensayos experimentales

R_t = Resistencia de la tensión calculada.

Si $I_t \geq 1$ se produce la falla.

2.17 Método de elementos Finitos (MEF)

2.17.1 Introducción

Las ecuaciones diferenciales del tipo (2.31) pueden ser resueltas de forma analítica, cuando la geometría de la situación o problema a evaluar es relativamente simple. Esta situación de alguna manera limita la posibilidad de estudiar problemas con geometría más compleja o cuando se presentan irregularidades en los materiales. Debido a esto se hace necesario recurrir a la implementación de alguna herramienta de mayor alcance que permita dar solución a este tipo de problemas, estas herramientas se conocen como métodos numéricos y surgen de acuerdo al auge de la tecnología computacional desde la aparición de la computadora por primera vez (1945-1958).

Las ideas básicas del método de elementos finitos se originaron gracias a los avances en el análisis estructural de las aeronaves (Tirupathi.R, et al .1999). En 1943 Richard Courant, a través del método de análisis numérico desarrollado por Ritz estimó soluciones aproximadas a un problema de vibración; posterior a esto en 1956 se publicó un documento por Turner en donde se estableció una definición más general del análisis numérico. Cabe destacar que este documento se enfocaba en estudiar la rigidez y la deformación de estructuras complejas, lo que estuvo motivado a su vez con la llegada de los primeros ordenadores.

Entonces la llegada de la computadora permitió la aplicación de los métodos que se conocían desde hace siglos (Navier, Lagrange y Cauchy), pero que eran difíciles de aplicar debido que al final conducían a sistemas de ecuaciones que no podían resolverse de forma manual.

De forma resumida es posible definir el método de elementos finitos como un método numérico para la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales; ésta herramienta ha ido evolucionando desde los años cincuenta hasta ahora y actualmente puede considerarse como el método de análisis numérico más extendido en la mayoría de los ámbitos de la ingeniería.

2.17.2 Fundamentos del método de elementos finitos (MEF)

Cuando se implementa el método de elementos finitos (MEF) para resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales gobernantes de un sistema físico, el dominio es dividido en pequeñas regiones (subdominios), donde en cada uno de esos subdominios, la forma del desplazamiento se asume en forma simple a través de ciertas funciones de aproximación denominadas funciones de forma o interpolación (Jougard, C.2002). Las funciones de interpolación se definen en términos de los valores del campo de desplazamiento determinados en los puntos generados en el proceso de discretización, estos

puntos se conocen como nodos y usualmente se encuentran en los bordes que conectan a los elementos adyacentes. Entonces, los valores de los desplazamientos nodales y las funciones de interpolación definen el desplazamiento total del sistema, es decir, en el ensamble de elementos. Producto de esta aproximación el problema diferencial original se transforma en un problema algebraico dando lugar a un sistema de ecuaciones, que serán lineales o no dependiendo del problema inicial, cuyas incógnitas son los valores de los desplazamientos nodales a partir de los cuales se determinan los desplazamientos en los elementos, usando las funciones de interpolación escogidas.

Como es de esperarse, la naturaleza de la solución obtenida y el grado de aproximación de la misma a la solución exacta no sólo dependerá del tamaño y el número de elementos en los que se divida la región original, sino también de las funciones de interpolación escogidas. La selección de dichas funciones no es arbitraria, debido a que las mismas deben satisfacer ciertas condiciones de compatibilidad y continuidad entre los bordes de elementos adyacentes.

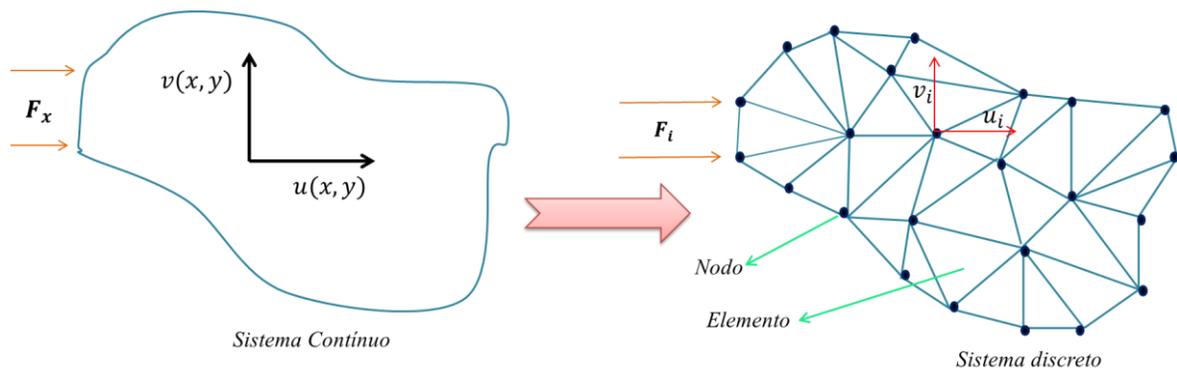


Fig.25 Proceso de discretización de un dominio bidimensional en elementos triangulares

Modificado de Jouglard C. (2002)

En general la formulación de un problema a través del método de elementos finitos puede realizarse de diversas formas; esta forma o estrategia utilizada dependerá de las consideraciones tomadas en el modelo planteado, además del procedimiento matemático escogido para estimar la solución aproximada de las ecuaciones diferenciales. Según (Huebner K. et al, 2001). Dichas estrategias pueden ser las siguientes:

- Aproximación directa
- Formulación variacional
- Residuos ponderados

El origen de la aproximación directa esta relacionado con el método de rigidez en el análisis estructural; su desarrollo se basa en el álgebra matricial además de las ecuaciones producto de la aproximación por elementos finitos. Esta aproximación puede ser usada sólo para problemas relativamente simples.

La implementación de residuos ponderados consiste en estimar la solución de la ecuación diferencial sin recurrir al uso de algún funcional. Este método usa el conjunto de ecuaciones gobernantes en el desarrollo de una forma integral (Jouglard C. 2002).

Por otra parte la aproximación variacional envuelve el cálculo de variaciones, mediante la determinación de los extremos de algún funcional por ejemplo, la energía. Esta formulación es ampliamente utilizada para problemas mecánicos de sólidos y estructuras.

En la Fig. 25 se muestra de forma simplificada los pasos en el proceso de modelado con el método de elementos finitos.

La deducción de las ecuaciones para realizar una aproximación por elementos finitos puede ser realizada implementando cualquiera de los métodos nombrados anteriormente; debido a la naturaleza mecánica del problema que se quiere evaluar a

continuación se muestra la forma de dichas ecuaciones como respuesta de la aplicación de principios variacionales.

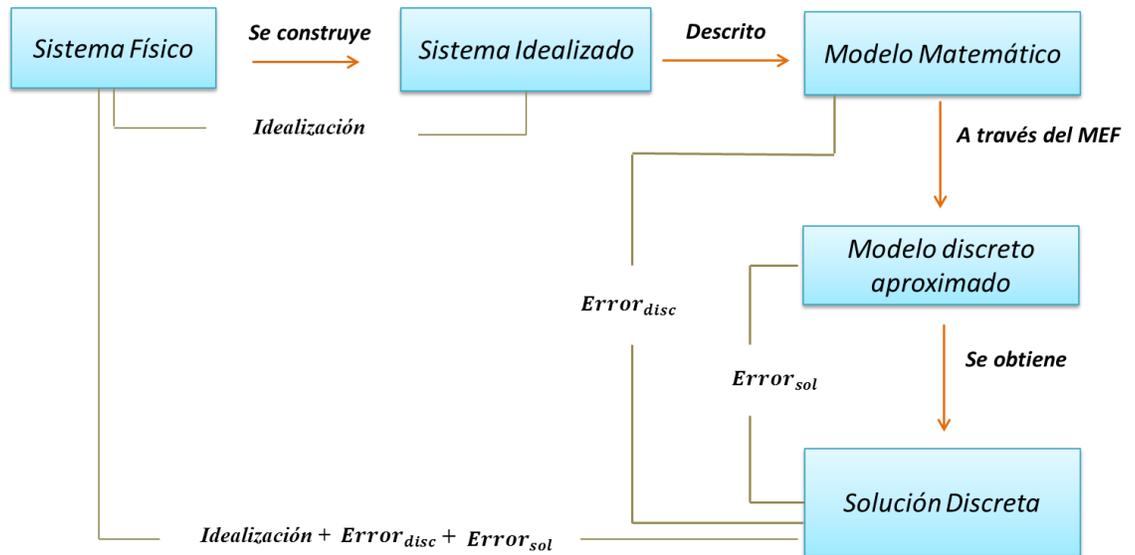


Fig.26 Esquema del proceso de modelado mediante el método de elementos finitos (MEF)

2.17.3 Formulación Variacional:

En mecánica clásica, cuando una partícula se mueve bajo la acción de un potencial $V(x)$ el movimiento real, es el dado por las ecuaciones de Newton, que expresan la aceleración de la partícula en términos de las fuerzas.

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \quad (2.39)$$

m = masa del cuerpo

F_i = fuerzas aplicadas al cuerpo

r = vector posición

Existe un principio que permite singularizar el movimiento real dado por las soluciones a las ecuaciones de Newton, entre todos los movimientos que el cuerpo podría seguir, para ir desde el punto inicial x_1 en el instante t_1 al punto final x_2 en el instante t_2 .

Este principio básico en física, en mecánica se denomina principio de Hamilton, o de mínima acción, Este principio caracteriza a los movimientos reales entre todos los movimientos imaginables que llevarían a la partícula del estado inicial (posición x_1 en el instante t_1) al estado final (posición x_2 en el instante t_2), ambos dados.

La caracterización dada por el principio de Hamilton asocia una cantidad, denominada acción a cada movimiento imaginable. La acción es una cantidad de la naturaleza bastante diferente a las cantidades que usualmente describen el estado de la partícula, como posición y/o velocidad. A diferencia de ellas, la acción no se asocia al estado, sino a la historia completa del cuerpo entre dos instantes inicial y final (Santander. M, 2003).

Resumidamente el principio de Hamilton puede enunciarse como sigue:

“De todos los posibles desplazamientos admisibles que podría seguir el cuerpo, la solución más exacta será aquella que hace que el lagrangeano del sistema sea un mínimo”.

En donde dichos desplazamientos son cinemáticamente admisibles, es decir, deben cumplir las siguientes condiciones:

- Ecuaciones de compatibilidad, esta condición implica que los desplazamientos son continuos en el dominio del problema.
- Satisfacen las condiciones de contorno.

Matemáticamente se puede escribir como sigue:

$$\delta \int L dt = 0 \quad (2.40)$$

El lagrangeano se construye considerando la energía cinética (T) y potencial (V) asociado al sistema físico en estudio:

$$L = T - V \quad (2.41)$$

La energía cinética y el potencial pueden escribirse de forma integral como se muestra a continuación.

$$T = \frac{1}{2} \int_{V_{ol}} \rho \dot{\mathbf{U}}^T \dot{\mathbf{U}} dV \quad (2.42)$$

$$V = \frac{1}{2} \int_{V_{ol}} \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} dV - \int_{V_{ol}} \mathbf{U}^T \mathbf{f}_c dV - \int_{S_f} \mathbf{U}^T \mathbf{f}_s dS_f$$

En donde

\mathbf{U} Es la matriz de desplazamiento

$\boldsymbol{\varepsilon}$ Es el tensor de deformaciones en el material

$\mathbf{f}_c ; \mathbf{f}_s$ Son las fuerzas por unidad de volumen y superficie respectivamente

$V_{ol} ; S_f$ Representan el volumen y la superficie del material

De las expresiones (5.1) es posible escribir el lagrangeano como:

$$L = \frac{1}{2} \int_{V_{ol}} \rho \dot{\mathbf{U}}^T \dot{\mathbf{U}} dV + \int_{V_{ol}} \mathbf{U}^T \mathbf{f}_c dV + \int_{S_f} \mathbf{U}^T \mathbf{f}_s dS_f - \frac{1}{2} \int_{V_{ol}} \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} dV \quad (2.43)$$

2.17.4 Construcción del campo de desplazamiento

- **Discretización del dominio**

El proceso de discretización consiste en dividir el cuerpo en N_e elementos. Esto es, lo que se conoce como generar una malla de elementos finitos que cubra todo el dominio. Ver fig. 27

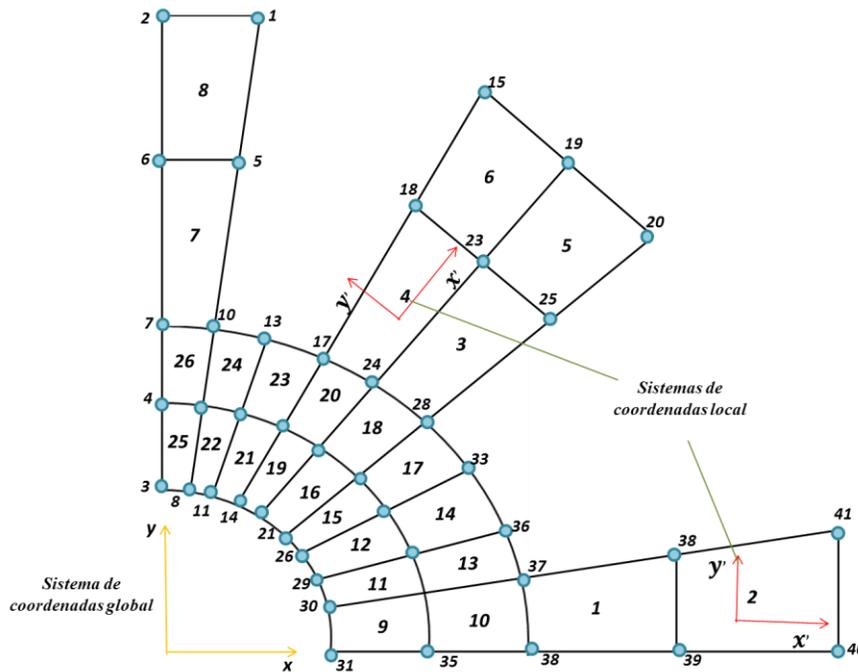


Fig.27 Ejemplo de un mallado en donde se observa la numeración de los nodos y los elementos.

Modificado de Liu. G.R, et al. (2003)

Esta operación de mallado es realizada por un pre-procesador, en donde además de la división del dominio al crear la malla se deben enumerar los nodos, o puntos a los que se le asocian las coordenadas generalizadas (desplazamientos nodales).

Entonces un elemento esta formado por la conexión de nodos entre elementos adyacentes, creando la conectividad entre elementos. Todos los elementos juntos forman el dominio del material; es posible que la región discretizada este formada por diferentes tipos de elementos con una cantidad diferente de nodos, siempre los mismos satisfagan las condiciones de compatibilidad.

La densidad de la malla utilizada dependerá del grado de exactitud en el análisis y de los recursos computacionales disponibles. Generalmente una malla mas fina dará resultados de mayor precisión, pero se incrementará el costo computacional.

Por otra parte las mallas utilizadas no son generalmente uniformes, es decir, una malla mas fina se usa en las zonas donde el gradiente de desplazamientos es mayor o cuando se requiere un alto grado de precisión en el análisis.

- **Interpolación de los desplazamientos**

La formulación de las ecuaciones por elementos finitos se basa en la selección de un sistema de coordenadas; cuando se escriben las ecuaciones para cada elemento es conveniente usar un sistema de coordenadas local el cual define un elemento con respecto a un sistema de coordenadas global que define a todo el sistema. Basados en un sistema de coordenadas local asociado a un elemento, la forma del desplazamiento será obtenida a través de una interpolación polinomial a partir del valor del desplazamiento en los nodos (desplazamientos nodales) como sigue:

$$\mathbf{U}(x, y, z) = \sum_{i=1}^{n_d} \mathbf{N}_i(x, y, z) \mathbf{d}_i = \mathbf{N}(x, y, z) \mathbf{d}_e \quad (2.44)$$

n_d es el número de elementos que conforman el elemento , y \mathbf{d}_i representa el desplazamiento nodal en el nodo i y es la incógnita que debe ser hallada para construir el campo de desplazamiento en el elemento; \mathbf{d}_i puede ser expresada en general como se muestra a continuación:

$$\mathbf{d}_i = \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{pmatrix} \quad (2.45)$$

Por otra parte el vector \mathbf{d}_e asociado al elemento completo tiene la forma:

$$\mathbf{d}_e = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{n_d} \end{pmatrix} \quad (2.46)$$

En la ecuación (2.43), \mathbf{N} es la matriz de las funciones de forma para los nodos en el elemento, cuya expresión general tiene la forma:

$$\mathbf{N}(x, y, z) = [N_1(x, y, z) \quad N_2(x, y, z) \quad \dots \quad N_{n_d}(x, y, z)] \quad (2.47)$$

Además tenemos que N_i es una submatriz que contiene las funciones asociadas a las componentes del desplazamiento; esta matriz puede ser escrita como:

$$N_i = \begin{pmatrix} N_{i1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_{i2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{inf} \end{pmatrix} \quad (2.48)$$

n_f representa el número de grados de libertad del nodo; por ejemplo cuando el caso bidimensional $n_f = 2$.

- **Construcción de las funciones de forma**

Consideraremos un elemento con n_d nodos, donde $\mathbf{x}^T = (x, y)$ para problemas bidimensionales, para la explicación del procedimiento estándar implementado en la construcción de las funciones de forma tomaremos en cuenta una componente del desplazamiento debido a que el procedimiento es análogo para las restantes.

La construcción parte de escribir la componente del desplazamiento como una combinación lineal de n_d funciones base (polinomios) $p_i(\mathbf{x})$, es decir:

$$u(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{n_d} p_i(\mathbf{x})\alpha_i = \mathbf{p}^T(\mathbf{x})\boldsymbol{\alpha} \quad (2.49)$$

u es la aproximación de la componente del desplazamiento; $p_i(\mathbf{x})$ es el conjunto de funciones base de polinomios en el espacio de coordenadas \mathbf{x} y α_i es el coeficiente del polinomio $p_i(\mathbf{x})$. Por otra parte el vector $\boldsymbol{\alpha}$ es definido como:

$$\boldsymbol{\alpha}^T = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots, \alpha_{n_d}\} \quad (2.50)$$

La selección de los polinomios a usar en la ecuación (2.48) son obtenidos a partir del triángulo de Pascal (caso 2D); tenemos que una base completa de polinomios de orden p en el caso de un dominio bidimensional tiene la forma:

$$\mathbf{p}^T(\mathbf{x}) = p^T(x, y) = \{1, x, y, xy, x^2, y^2, \dots, x^p, y^p\} \quad (2.51)$$

Los coeficientes α_i en la ecuación (2.49) pueden ser determinados evaluando dicha ecuación en las coordenadas nodales, por ejemplo, en el nodo i tenemos que:

$$d_i = \mathbf{p}^T(\mathbf{x}_i)\boldsymbol{\alpha} \quad i = 1, 2, 3 \dots n_d \quad (2.52)$$

En esta expresión d_i representa el valor de $u(\mathbf{x})$ en $\mathbf{x} = \mathbf{x}_i$, en forma matricial (2.52) queda reescrita como:

$$\mathbf{d}_e = \mathbf{P}\boldsymbol{\alpha} \quad (2.53)$$

\mathbf{d}_e es el vector que incluye los valores de las componentes del desplazamiento en los n_d nodos en el elemento.

De la expresión (2.53) es posible definir la matriz \mathbf{P} , denominada matriz momento

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}^T(\mathbf{x}_1) \\ \mathbf{P}^T(\mathbf{x}_2) \\ \vdots \\ \mathbf{P}^T(\mathbf{x}_{n_d}) \end{pmatrix} \quad (2.54)$$

A partir de la ecuación (2.53) y asumiendo que la matriz \mathbf{P} es invertible, tenemos que:

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{d}_e \quad (2.55)$$

Finalmente sustituyendo la ecuación (2.55) en (2.49) tenemos que:

$$u(\mathbf{x}) = \mathbf{P}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{d}_e = \mathbf{N}(\mathbf{x}) \mathbf{d}_e \quad (2.56)$$

2.17.5 Formulación de las ecuaciones en elementos finitos

Una vez que se conoce la estructura de las funciones de forma es posible escribir el lagrangeano dado por la ecuación (2.43) tomando en cuenta el proceso de aproximación por elementos finitos.

Insertando en (2.43) la expresión (2.44) además de la relación constitutiva entre la deformación y el desplazamiento dado por la relación (2.10) obtenemos lo siguiente:

$$L = \mathbf{d}_e^T \mathbf{f}_e - \frac{1}{2} \mathbf{d}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{d}_e \quad (2.57)$$

Donde:

$$\mathbf{k}_e = \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{c} \mathbf{B} dV \quad (2.58)$$

Con \mathbf{B} como la matriz de deformación; esta relación se conoce como matriz de rigidez debido a que contiene las propiedades elásticas del material.

También tenemos que:

$$\mathbf{f}_e = \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_s \quad (2.59)$$

$$\mathbf{F}_b = \int_{V_e} \mathbf{N}^T \mathbf{f}_b dV \quad \mathbf{F}_s = \int_{S_e} \mathbf{N}^T \mathbf{f}_s dS$$

La cantidad \mathbf{f}_e se denomina vector de cargas nodales ya que contiene a las fuerzas que actúan en los nodos de cada elemento.

La expresión (2.57) esta asociada a un sistema de coordenadas local en un elemento, y para su obtención se debe considerar la existencia de equilibrio estático, es decir el sistema satisface las ecuaciones de equilibrio (2.25).

Por último al considerar el principio de Hamilton sobre (2.57) se obtiene finalmente el sistema de ecuaciones en función de los desplazamientos nodales o incógnitas del problema, es decir:

$$\delta L = \delta \int \left(\mathbf{d}_e^T \mathbf{f}_e - \frac{1}{2} \mathbf{d}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{d}_e \right) dt = 0 \quad (2.60)$$

Realizando las operaciones correspondientes es posible verificar que:

$$\mathbf{k}_e \mathbf{d}_e - \mathbf{f}_e = \mathbf{0} \quad (2.61)$$

2.17.6 Transformación de coordenadas

La ecuación (2.61) esta asociada a un elemento dentro del dominio original y la misma esta formulada a partir de un sistema de coordenadas local definido dentro del elemento. En general, la estructura es dividida en muchos elementos con distintas orientaciones (Fig.26).

Para obtener el conjunto de ecuaciones que describan al sistema es necesario realizar una transformación de coordenadas, esta operación permite vincular el vector desplazamiento basado en el sistema de coordenadas local y su análogo proyectado en el sistema de coordenadas global o general del sistema.

En forma matricial lo descrito anteriormente se puede escribir como:

$$\mathbf{k}_e \mathbf{d}_e - \mathbf{f}_e = \mathbf{0} \quad (2.62)$$

\mathbf{T} es la matriz de transformación, la cual tiene distintas formas dependiendo del tipo de elemento utilizado; por otra parte esta matriz también es aplicada al vector de cargas nodales \mathbf{f}_e y a la matriz de rigidez \mathbf{k}_e para obtener lo siguiente:

$$\mathbf{f}_e = \mathbf{T} \mathbf{F}_e \quad \mathbf{k}_e = \mathbf{T} \mathbf{K}_e \quad (2.63)$$

Finalmente es posible escribir la ecuación (2.61) asociada al sistema de coordenadas global del sistema:

$$\mathbf{K}_e \mathbf{D}_e = \mathbf{F}_e \quad (2.64)$$

Donde:

$$\mathbf{K}_e = \mathbf{T}^T \mathbf{k}_e \mathbf{T} \qquad \mathbf{F}_e = \mathbf{T}^T \mathbf{f}_e \qquad (2.65)$$

2.17.7 Ensamblaje de las ecuaciones

Las ecuaciones para cada elemento pueden ser ensambladas para formar un sistema de ecuaciones global, en el cual estén incluidos todos los elementos en los que ha sido dividido el dominio como sigue:

$$\mathbf{K}\mathbf{D} = \mathbf{F} \qquad (2.66)$$

En esta relación \mathbf{K} es la matriz de rigidez global, \mathbf{D} es el vector de todos los desplazamientos asociados a los nodos que conforman el dominio, y \mathbf{F} es el vector equivalente a todas las fuerzas aplicadas en los nodos. Se puede decir que el proceso de ensamblaje es una suma de todos los elementos conectados a un nodo.

Capítulo 3

Marco metodológico

De acuerdo a los objetivos planteados en este trabajo de investigación, es necesario el diseño de una metodología o estrategia a través de la cual sea posible evaluar el problema en estudio sistemáticamente, a fin de dar cumplimiento con los objetivos específicos planteados hasta englobar el objetivo general.

Esta serie de pasos fueron diseñados con la intención de realizar la descripción y lograr el entendimiento del efecto generado por la existencia de excentricidad en el revestidor sobre la distribución de los esfuerzos en el anillo de cemento, para posteriormente estimar y evaluar la manera de incluir dicho efecto en la estrategia de diseño del proceso de completación en pozos petroleros, es decir, tomar en cuenta esta nueva distribución de esfuerzos a través de la respuesta mecánica de dicho material bajo un cierto grado de excentricidad, hasta lograr que el mismo se adapte a estas condiciones, además de las condiciones a las que será sometido en las operaciones de explotación y estimulación a lo largo de la vida productiva del pozo.

En este capítulo se busca definir cada uno de los procedimientos, variables y modelos utilizados de manera detallada, esto debido a que en toda investigación científica se hace necesario que las situaciones estudiadas así como las relaciones que se establecen entre las mismas estén bien claras y delimitadas, esto para obtener de manera objetiva y confiable una respuesta a la problemática central. En primer lugar, empezaremos definiendo algunos aspectos que caracterizan todo trabajo investigativo, es decir, el tipo y diseño de la investigación, el objeto o población en estudio y por último las técnicas de recolección de datos a utilizar; posteriormente se dará de forma esquemática una

descripción general del procedimiento utilizado en el desarrollo del trabajo para dar paso a la aplicación de las herramientas escogidas, y finalmente obtener los resultados arrojados del estudio.

3.1 Tipo y diseño de la investigación

De acuerdo con el problema planteado, referido a la descentralización del revestidor en pozos de petróleo y gas, es conveniente la incorporación de un estudio de tipo experimental-evaluativo, debido a que se realizará el análisis asociado al efecto de una variable con respecto a otra; específicamente tomaremos como variable independiente de nuestro estudio la excentricidad presente en el revestidor ($0 < \epsilon < 1$), posterior a la colocación del revestidor en el pozo perforado determinando el efecto de este fenómeno sobre los esfuerzos (variable dependiente) a los que es sometido el anillo de material cementante.

El diseño de esta investigación está dividido en dos fases o etapas; en primer lugar lo que denominaremos la formulación analítica del problema y en segundo lugar la formulación numérica del mismo.

En la primera fase o formulación analítica partiremos del modelo físico asociado a las ecuaciones de la teoría de la elasticidad, a partir de las cuales es posible construir un modelo particular que describa el comportamiento mecánico de la estructura del pozo cuando es sometido a ciertas cargas o fuerzas durante su construcción, y su posterior explotación; es decir, se considera el problema elástico del sistema constituido por el revestidor-cemento y la formación geológica.

Por otra parte, la segunda fase o formulación numérica consiste en la implementación de las herramientas computacionales, específicamente a través del software de simulación por elementos finitos ABAQUS, siendo este el instrumento con el que será posible obtener los esfuerzos en el cemento para cada configuración excéntrica del sistema.

3.2 Objeto o población de estudio

En la realización de un trabajo de investigación es necesario designar con claridad la situación o fenómeno que se desea describir o estudiar, este proceso se conoce como selección de la población de estudio.

Tomando en cuenta la naturaleza de la presente investigación, se ha tomado como objeto de estudio la estructura de un pozo petrolero, la cual esta conformada por tres partes acopladas entre sí; el revestidor o tubería que proporciona protección al hoyo, el cemento o material que forma una barrera permanente entre el revestidor y la roca expuesta, y por último la formación rocosa o columna estratigráfica de roca contenedora de los hidrocarburos.

3.3 Técnicas de recolección de datos

Una vez planteado el modelo a evaluar se da inicio a la fase de recolección de datos, en el caso particular del presente trabajo los datos a recolectar son los esfuerzo radiales y tangenciales que experimenta el anillo de cemento cuando es sometido a una carga particular, tomando en cuenta la presencia de un cierto grado de excentricidad en el revestidor, observando así la respuesta de los esfuerzos en función de dicho parámetro.

La primera fase del análisis o formulación analítica consiste en la utilización de las ecuaciones obtenidas mediante la teoría de la elasticidad (Ecs 2.14), a través de las cuales es posible calcular la distribución de esfuerzos en un cilindro sometido a presión internamente y externamente. Ver Fig. 30, Usando el modelo de estas ecuaciones, y tomando en cuenta el principio de superposición es posible adaptar dicho modelo al sistema conformado por el revestidor, el cemento y la formación, considerando cada parte como un cilindro de material homogéneo e isotrópico, los cuales están perfectamente acoplados entre sí.

La solución analítica calculada representa el patrón o modelo base a partir del cual es posible validar la solución numérica obtenida en la segunda fase o formulación numérica del problema; una vez que se ha comprobado la convergencia entre las soluciones arrojadas por ambos modelos, se hace posible garantizar que los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas describen el sistema físico evaluado, en este caso, la respuesta mecánica del sistema para el caso excéntrico.

Todo el proceso descrito anteriormente permite dar paso al análisis paramétrico del problema de la excentricidad en el revestidor usando el software para la obtención de los datos de esfuerzos en el cemento, específicamente haciendo un barrido en las excentricidades, tomando en cuenta las propiedades elásticas de los materiales y su influencia en la distribución de esfuerzos finales.

En la figura 28 se realiza una descripción general del proceso de desarrollo de la investigación, cabe destacar que en la siguiente parte del presente capítulo será posible observar con detalle cada una de las consideraciones que se hacen en cada fase o formulación del problema y su solución respectiva.

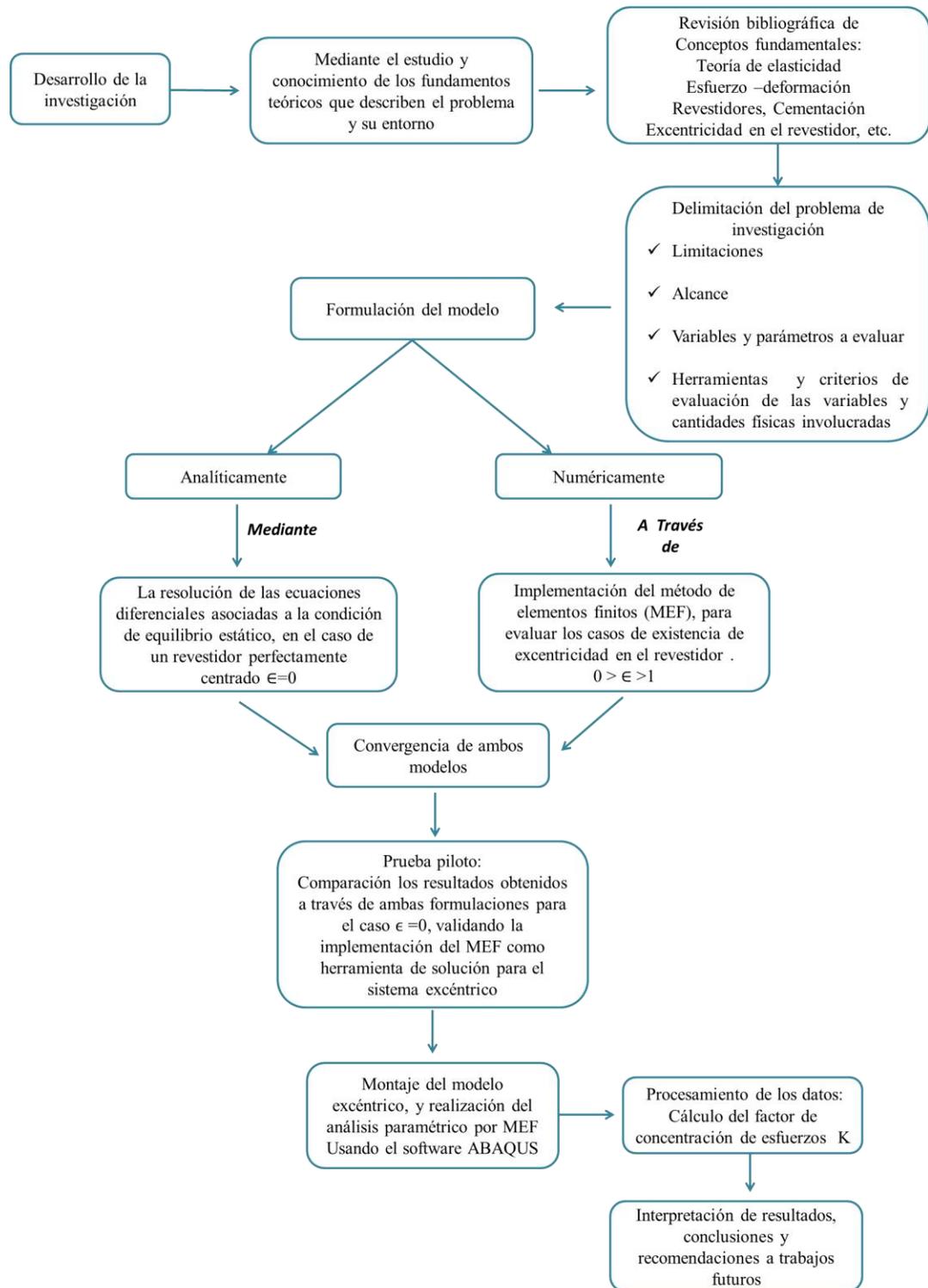


Fig. 28 Esquema en donde se describe de manera sistemática los pasos seguidos para la realización del trabajo

3.4 Formulación analítica del problema

3.4.1 Mecánica del pozo completado (caso céntrico $\epsilon=0$)

El análisis mecánico del pozo completado consiste en la evaluación de la distribución de esfuerzos que experimenta el sistema, los cuales son producto en primer lugar de la perforación de la roca, operación que genera una redistribución de los esfuerzos primarios en la roca o esfuerzos in situ, además de los trabajos subsecuentes de estimulación y producción del pozo en cuestión.

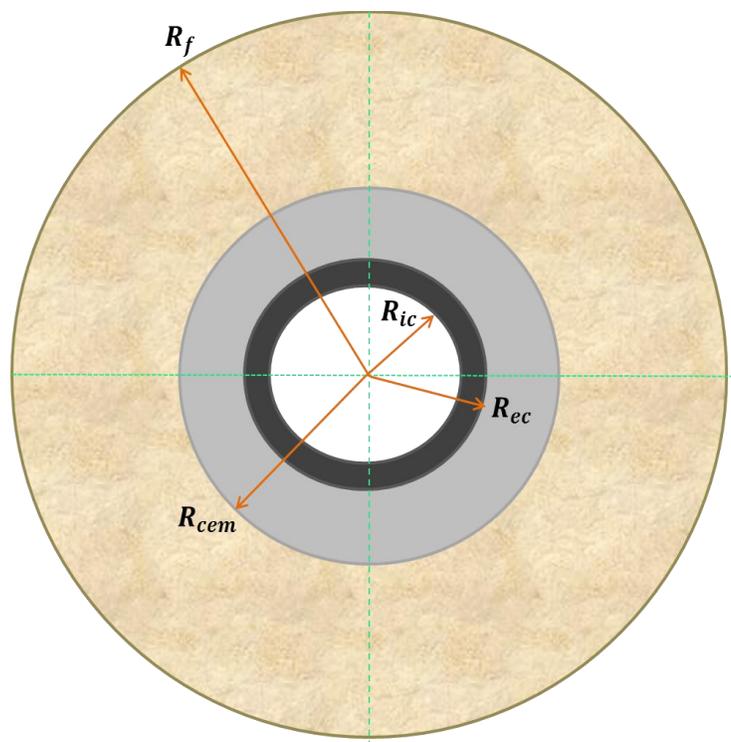


Fig.29 Diagrama de la sección transversal de un pozo completado

Limitaciones

A continuación enumeraremos las idealizaciones tomadas en cuenta en el modelo de estudio:

- ✓ Se considera la existencia de tres materiales perfectamente acoplados entre sí como se muestra en la figura 28, en donde cada uno representa a la tubería revestidora, el cemento y la formación geológica perforada
- ✓ El comportamiento de los materiales es de tipo elástico-lineal e isotrópico, es decir, existe una relación lineal entre las componentes de los esfuerzos y las deformaciones, en donde las constante de proporcionalidad son los módulos elásticos (E y ν), en el caso de la isotropía estaremos considerando que las propiedades de cada material no dependen de la dirección en la cual se evalúe la respuesta mecánica del mismo
- ✓ Se empleará un sistema de coordenadas cilíndricas (r, θ, z) para ubicar los puntos en el espacio, debido a la geometría cilíndrica asociada al problema en estudio
- ✓ Usaremos el modelo bidimensional de deformación plana, es decir, el movimiento en la dirección axial no esta permitido (eje z), esto es posible debido a que el movimiento a lo largo de esta dirección se produce cuando existe calentamiento de las secciones del revestidor, o cuando no existe control de las operaciones a lo largo de esta dirección en la superficie (Thiercelin. M.J, et al. 1998)
- ✓ La restricción principal a partir de la cual será construida la solución general, es considerar continuidad en los desplazamientos radiales u_r en las

interfaces (revestidor/cemento; cemento/formación), es decir, la existencia adherencia perfecta entre los materiales.

- ✓ Para el análisis se considera el cemento como un material sólido, es decir, justo cuando ha culminado en su totalidad el proceso de fraguado.

3.4.2 Cálculo de Esfuerzos en el sistema Revestidor-Cemento-Formación Geológica

El modelo utilizado para determinar los esfuerzos en el sistema consiste en la extensión de la solución al problema de un cilindro de pared gruesa presurizado internamente y externamente (Fig. 29), la deducción de esta solución se puede verificar con detalle en el apéndice A; según (Timoshenko, et al.1951), las ecuaciones asociadas a los esfuerzos radiales, tangenciales y axiales, bajo la consideración de deformación plana, es posible escribirlas como:

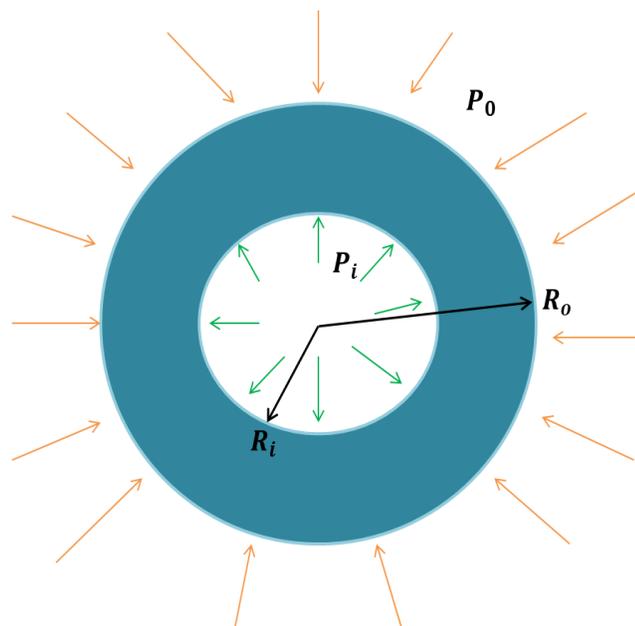


Fig.30 Cilindro de pared gruesa sometido a una presión interna y a una presión externa .
Modificado de Sadd M. (2005)

$$\sigma_r = \frac{R_i^2 P_i - R_0^2 P_0}{R_0^2 - R_i^2} + \frac{R_i^2 R_0^2 (P_0 - P_i)}{R_0^2 - R_i^2} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (3.1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{R_i^2 P_i - R_0^2 P_0}{R_0^2 - R_i^2} - \frac{R_i^2 R_0^2 (P_0 - P_i)}{R_0^2 - R_i^2} \cdot \frac{1}{r^2}$$

Tomando en cuenta la condición de deformación plana $\varepsilon_z = 0$ en la tercera ecuación (2.14), usando coordenadas cilíndricas nos queda:

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)$$

$$\sigma_z = 2\nu \left(\frac{R_i^2 P_i - R_0^2 P_0}{R_0^2 - R_i^2} \right) \quad (3.2)$$

σ_z es lo que se conoce como esfuerzo de confinamiento, el cual corresponde a la condición de deformación plana en el material.

Para extender esta solución al problema del pozo completado se considera cada anillo como independiente, para esto es necesario escribir cada componente de los esfuerzos por separado en cada material como se muestra a continuación:

Para el revestidor:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{R_{ic}^2 P_w - R_{ec}^2 P_{rev}}{R_{ec}^2 - R_{ic}^2} + \frac{R_{ic}^2 R_{ec}^2 (P_{rev} - P_w)}{R_{ec}^2 - R_{ic}^2} \cdot \frac{1}{r^2} \\ \sigma_\theta &= \frac{R_{ic}^2 P_w - R_{ec}^2 P_{rev}}{R_{ec}^2 - R_{ic}^2} - \frac{R_{ic}^2 R_{ec}^2 (P_{rev} - P_w)}{R_{ec}^2 - R_{ic}^2} \cdot \frac{1}{r^2} \\ \sigma_z &= 2\nu_{rev} \left(\frac{R_{ic}^2 P_w - R_{ec}^2 P_{rev}}{R_{ec}^2 - R_{ic}^2} \right)\end{aligned}\tag{3.3}$$

Donde:

R_{ic} = Radio interno del revestidor

R_{ec} = Radio externo del revestidor

P_w = Presión interna en el revestidor

P_{rev} = Presión externa en el revestidor

Para el cemento:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{R_{ec}^2 P_{rev} - R_{cem}^2 P_{cem}}{R_{cem}^2 - R_{ec}^2} + \frac{R_{ec}^2 R_{cem}^2 (P_{cem} - P_{rev})}{R_{cem}^2 - R_{ec}^2} \cdot \frac{1}{r^2} \\ \sigma_\theta &= \frac{R_{ec}^2 P_{rev} - R_{cem}^2 P_{cem}}{R_{cem}^2 - R_{ec}^2} - \frac{R_{ec}^2 R_{cem}^2 (P_{cem} - P_{rev})}{R_{cem}^2 - R_{ec}^2} \cdot \frac{1}{r^2} \\ \sigma_z &= 2\nu_{cem} \left(\frac{R_{ic}^2 P_w - R_{ec}^2 P_{rev}}{R_{ec}^2 - R_{ic}^2} \right)\end{aligned}\tag{3.4}$$

Donde:

R_{cem} = Radio del cemento

R_{ec} = Radio externo del revestidor

P_{cem} = Presión en el cemento

P_{rev} = Presión externa en el revestidor

Para la formación:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{R_{cem}^2 P_{cem} - R_f^2 P_f}{R_f^2 - R_{cem}^2} + \frac{R_f^2 R_{cem}^2 (P_f - P_{cem})}{R_f^2 - R_{cem}^2} \frac{1}{r^2} \\ \sigma_\theta &= \frac{R_{cem}^2 P_{cem} - R_f^2 P_f}{R_f^2 - R_{cem}^2} - \frac{R_f^2 R_{cem}^2 (P_f - P_{cem})}{R_f^2 - R_{cem}^2} \frac{1}{r^2} \\ \sigma_z &= 2\nu_f \left(\frac{R_{cem}^2 P_{cem} - R_f^2 P_f}{R_f^2 - R_{cem}^2} \right)\end{aligned}\tag{3.5}$$

Donde:

R_{cem} = Radio del cemento

R_f = Radio externo de la formación

P_{cem} = Presión en el cemento

P_f = Presión externa en la formación

A fin de obtener la distribución de esfuerzos en el sistema, es necesario determinar las presiones en las interfaces P_{rev} y P_{cem} ; es decir, en las interfaces revestidor-cemento y

cemento-formación las cuales posteriormente serán sustituidas en las ecuaciones (3.3,3.4 y 3.5).

Estas presiones son obtenidas considerando la condición de continuidad en los desplazamientos radiales u_r en cada una de las interfaces como se muestra a continuación:

La deformación radial viene dada por:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] \quad (3.6)$$

De la relación entre las deformaciones y los desplazamientos, Ec (2.10) y tomado el índice $i = j = r$ tenemos que:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] \quad (3.7)$$

Al sustituir en el lado derecho de esta expresión la solución general dada por las ecuaciones (3.1), se verifica que el desplazamiento es una función que sólo depende de la variable radial, por lo que la derivada parcial se transforma en una derivada total, obteniendo lo siguiente:

$$\frac{du}{dr} = \frac{1}{E} \left[\frac{A}{r^2} (1 + \nu) - (\nu + 1)(2\nu - 1)B \right] \quad (3.8)$$

Integrando ambos lados la ecuación (3.8) con respecto a la variable radial, se obtiene la expresión para calcular el desplazamiento radial

$$u_r = - \frac{(1+\nu)}{E} \frac{A}{r} - \frac{(1+\nu)(2\nu-1) Br}{E} \quad (3.9)$$

Con:

$$A = \frac{R_i^2 R_0^2 (P_0 - P_i)}{R_0^2 - R_i^2} \quad B = \frac{R_i^2 P_i - R_0^2 P_0}{R_0^2 - R_i^2} \quad (3.10)$$

Finalmente sustituyendo estas constantes en la Ec (3.9) nos queda:

$$u_r = \frac{(1 + \nu)}{E} \left[r(1 - 2\nu) \frac{R_i^2 P_i - R_0^2 P_0}{R_0^2 - R_i^2} - \frac{R_i^2 R_0^2 (P_0 - P_i)}{R_0^2 - R_i^2} \frac{1}{r} \right] \quad (3.11)$$

De acuerdo a esta ecuación la condición de continuidad es posible escribirla como sigue:

$$\begin{aligned} u_{rev}(r) \Big|_{R_{ec}} &= u_{cem}(r) \Big|_{R_{ec}} \\ u_{cem}(r) \Big|_{R_{cem}} &= u_{form}(r) \Big|_{R_{cem}} \end{aligned} \quad (3.12)$$

De estas igualdades surge un sistema de ecuaciones con dos incógnitas. En donde dichas incógnitas son las presiones de contacto en las interfaces de cada material, este sistema de ecuaciones puede ser resuelto usando cualquiera de los métodos destinados para ello, por comodidad se optó por escribirlo en forma matricial como sigue:

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{rev} \\ P_{cem} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} A_{11} P_{rev} + A_{12} P_{cem} &= B_1 \\ A_{21} P_{rev} + A_{22} P_{cem} &= B_2 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Al desarrollar las ecuaciones (3.12) y escribirlas de la forma (3.14) se verifica que los coeficientes tienen la forma mostrada a continuación:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{(1+\nu_{rev})R_{ec}[-R_{ec}^2(1-2\nu_{rev})-R_{ic}^2]}{E_{rev}(R_{ec}^2-R_{ic}^2)} - \frac{(1+\nu_{cem})[R_{ec}^3(1-2\nu_{cem})+R_{cem}^2R_{ec}]}{E_{cem}(R_{cem}^2-R_{ec}^2)} \\ A_{12} &= \frac{(1+\nu_{cem})[R_{ec}(1-2\nu_{cem})R_{cem}^2+R_{cem}^2R_{ec}]}{E_{cem}(R_{cem}^2-R_{ec}^2)} \\ B_1 &= \frac{-2(1+\nu_{rev})(1-\nu_{rev})R_{ec}R_{ic}^2P_w}{E_{rev}(R_{ec}^2-R_{ic}^2)} \\ A_{22} &= -\frac{(1+\nu_{cem})[R_{cem}(1-2\nu_{cem})R_{cem}^2+R_{ec}^2R_{cem}]}{E_{cem}(R_{cem}^2-R_{ec}^2)} - \frac{(1+\nu_f)[R_{cem}^3(1-2\nu_f)+R_f^2R_{cem}]}{E_f(R_f^2-R_{cem}^2)} \\ A_{21} &= \frac{(1+\nu_{cem})[R_{cem}(1-2\nu_{cem})R_{ec}^2+R_{ec}^2R_{cem}]}{E_{cem}(R_{cem}^2-R_{ec}^2)} \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$B_2 = \frac{-2R_{cem}R_f^2P_f(1-\nu_f)(1+\nu_f)}{E_f(R_f^2-R_{cem}^2)} \quad (3.17)$$

A partir de la geometría del pozo a evaluar y las condiciones de carga se determinan estos coeficientes, obteniendo finalmente P_{rev} y P_{cem} , con lo que es posible calcular el estado de esfuerzos en el sistema a través de las ecuaciones (3.3), (3.4) y (3.5).

3.5 Formulación numérica del problema

En muchas situaciones que envuelven la resolución de problemas mecánico-estructurales las soluciones analíticas como las mostradas en la sección 3.4 no son aplicables en la descripción de un problema físico, esto debido a que las mismas presentan restricciones geométricas y limitaciones asociadas a las condiciones de carga a las cuales el sistema es sometido.

Por lo tanto, en la actualidad se recurre a la implementación de simulaciones numéricas que permiten abordar el problema físico de una manera más realista, logrando recrear el ambiente bajo el que se encuentra sometido el sistema con mayor exactitud.

En el presente trabajo fue usado el software comercial de simulación numérica ABAQUS; siendo este un programa de análisis numérico basado en el método de elementos finitos (MEF) descrito en la sección (2.17)

En general, la construcción y el posterior análisis de un modelo por elementos finitos consta de tres etapas bien diferenciadas: el pre-procesamiento, el módulo de análisis y el post-procesamiento.

3.5.1 Pre-procesamiento

- Geometría

En esta etapa se define la geometría de los sólidos a modelar. Para el presente estudio se diseñó una geometría circular plana con un hoyo en el centro. Ver fig. 31.

La sección plana mostrada en la figura 31 está constituida por los tres materiales que conforman la estructura del pozo, es decir, la tubería, el cemento y la formación geológica; en las simulaciones realizadas sólo se consideró la mitad de la sección circular del sistema, debido a la simetría en las cargas y los esfuerzos, permitiendo el ahorro de trabajo computacional.

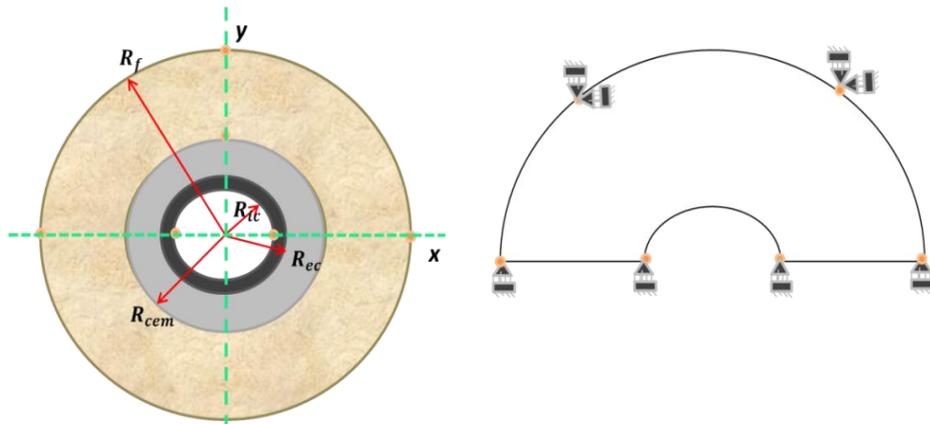


Fig.31 Sistema geométrico definido para la solución numérica del problema

Los parámetros geométricos asociados al revestidor fueron obtenidos a través de tablas de diseño de la API, tomando en cuenta a su vez los datos del tipo de revestidor usado en el pozo base a evaluar, la información de este pozo fue obtenida a partir del estudio realizado por (Pineda G, et al. 2011) en el campo Ceuta del lago de Maracaibo, de igual manera los diámetros del cemento fueron adaptados a las condiciones geométricas usadas en la construcción del mismo pozo.

En cuanto al radio externo de la formación es necesario garantizar que las condiciones de borde y de rigidez del sistema sean las correctas, en función a esto dicho valor debe ser considerablemente mayor que el radio del hoyo.

Para determinar dicho valor, se usó como herramienta un modelo constitutivo que permite calcular los esfuerzos alrededor del hoyo. Este modelo fue desarrollado por Kirsch en (1898); a través de estas ecuaciones es posible determinar los esfuerzos alrededor de un hoyo, considerando que no hay desplazamiento a lo largo del eje axial (deformación plana).

Entonces, de acuerdo a Kirsch tenemos lo siguiente:

$$\sigma_r = \frac{1}{2} (\sigma_{hmin} + \sigma_{hmax}) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2} (\sigma_{hmin} - \sigma_{hmax}) \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^2}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (3.17)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} (\sigma_{hmin} + \sigma_{hmax}) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2} (\sigma_{hmin} - \sigma_{hmax}) \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^2}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (3.18)$$

$$\sigma_z = - \left[1 + \frac{2a^2}{r^4} - \frac{3a^4}{r^4}\right] \left[\frac{|\sigma_{hmin} - \sigma_{hmax}| \sin 2\theta}{2}\right] \quad (3.19)$$

Donde (ver figura 32):

σ_{hmax} = esfuerzo in situ, máximo horizontal

σ_{hmin} = esfuerzo in situ, mínimo horizontal

a = radio del hoyo

r = distancia radial

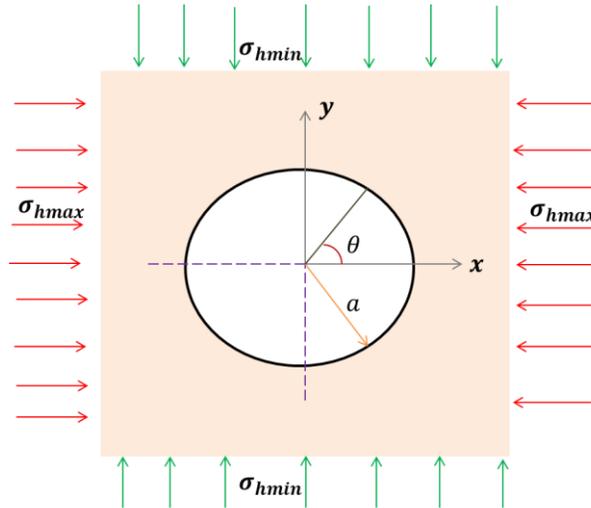


Fig.32 Modelo representativo de los esfuerzos en el hoyo. Variables de la ecuación de Kirsch

En nuestro caso de estudio consideramos la existencia de isotropía en los esfuerzos por lo que $\sigma_{hmax} = \sigma_{hmin}$; posterior a esto, realizando la representación gráfica de la ecuación (3.18) se determinó que a partir de un radio de aproximadamente 200 pulgadas la perforación no afecta el valor de los esfuerzos en el cemento, siendo este el valor tomado para realizar cada una de las simulaciones (Ver Fig. 33).

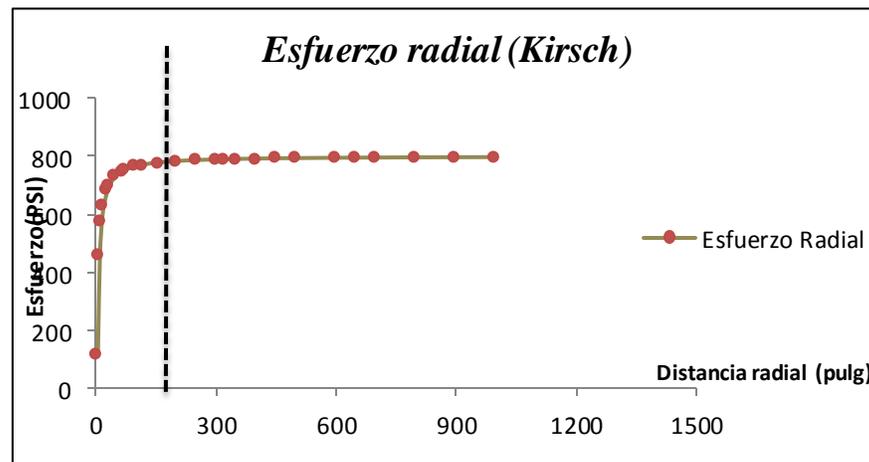


Fig.33 Evaluación de las ecuaciones de Kirsch y determinación del radio externo de la formación

En la siguiente tabla se muestran los radios asociados al revestidor, el cemento y la formación usados en los modelos numéricos desarrollados:

Tabla 5. Geometría asociada a los elementos del sistema revestidor-cemento-formación geológica.

<i>Extensión (pulg)</i>	<i>Revestidor</i>		<i>Cemento</i>		<i>Formación</i>	
Radio interno (R_i)	3,002"	7,63 cm	3,5"	8,89 cm	4,25"	10,80 cm
Radio externo (R_o)	3,5"	8,89 cm	4,25"	10,80 cm	200"	5,08 m

- **Propiedades elásticas de los materiales**

Una vez fijada la geometría de cada material en la simulación, es necesario asociarle a cada uno las características mecánicas a través de los módulos elásticos E y ν , tomando en cuenta el comportamiento isótropo de los mismos.

Las propiedades de la tubería (acero) permanecerán fijas, y pueden ser encontradas en la literatura especializada en el diseño de revestidores. Para efectos del presente estudio se utilizó un módulo de Young de $29,6 \cdot 10^6$ Psi y un coeficiente de Poisson de 0,3.

Por otra parte, para obtener las propiedades elásticas de la formación geológica asociada al yacimiento se revisaron los datos obtenidos a partir de la evaluación realizada por (Pineda G, et al. 2011), de donde fueron seleccionados dos estratos de arena del área 2 del campo Ceuta en el lago de Maracaibo, y sus propiedades son las siguientes:

Tabla 6. Propiedades elásticas de la formación a evaluar en los modelos numéricos. Tomado de Pineda G, et al. (2011)

<i>Estrato</i>	<i>Prof (pies)</i>	<i>Prof (m)</i>	<i>E(Psi)</i>	<i>E(Gpa)</i>	<i>ν</i>
<i>Arena C-1</i>	17210	5245,61	$6,67 \cdot 10^6$	45,96	0,29
<i>Arena C-3 Superior</i>	17720	5401,06	$2,03 \cdot 10^6$	14,00	0,43

En cuanto a las propiedades elásticas del cemento, se tomaron en cuenta los siguientes datos:

Tabla 7. Módulos elásticos del cemento que se consideraron para el estudio numérico.

$E_{cemento}$ (Psi)	$E_{cemento}$ (Gpa)	ν_c
$E_1 = 1,5 \cdot 10^5$	$E_1 = 1,03$	$\nu_1 = 0,10$
$E_2 = 5,0 \cdot 10^5$	$E_2 = 3,45$	$\nu_2 = 0,15$
$E_3 = 9,0 \cdot 10^5$	$E_3 = 6,20$	$\nu_3 = 0,20$
$E_4 = 1,3 \cdot 10^6$	$E_4 = 8,96$	

Combinando cada módulo de Young con su respectivo coeficiente de Poisson tenemos en total de 12 tipos de cementos evaluados, tomando en cuenta además los dos tipos de formación obtenemos finalmente un total de 24 modelos del sistema revestidor-cemento-formación.

- **Mallado del Modelo**

En esta etapa se subdivide el dominio original en regiones más pequeñas o elementos, este proceso permite reducir el número de grados de libertad del sistema, obteniendo como resultado lo que se denomina modelo discreto.

Para el análisis se consideraron elementos del tipo CPE4R, es decir, cuadriláteros con 4 nodos de deformación plana e integración reducida; en donde cada elemento se origina a partir de la conexión entre sus nodos, en este proceso el programa le asigna a cada nodo y elemento una numeración única apropiada.

El conjunto de todos los elementos conectados entre sí reproducen el dominio del problema original como se muestra en la figura 34.

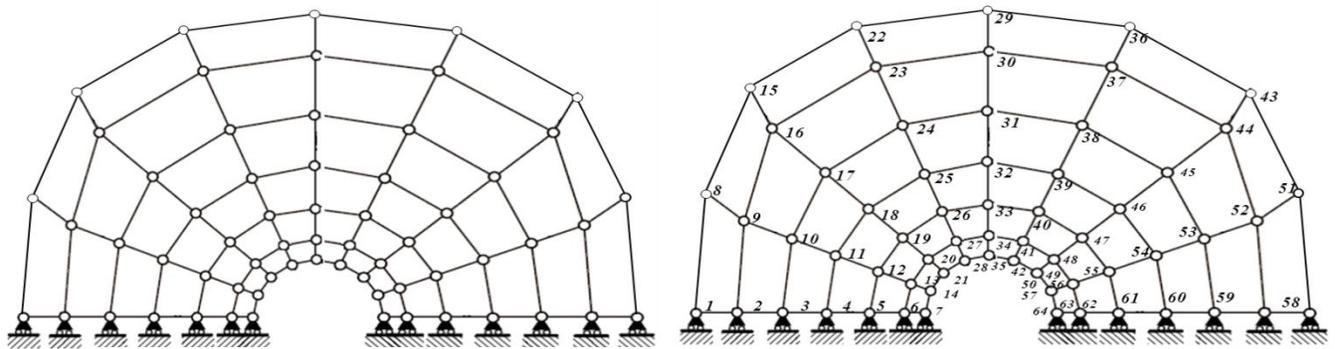


Fig.34 Proceso de mallado y enumeración de los nodos en el sistema; Tubería-cemento-formación

En un modelo es posible discretizar el dominio con diferentes tipos de elementos, siempre que los mismos cumplan con las condiciones de compatibilidad en su frontera. La cantidad de elementos o densidad de la malla usada va a depender del grado de exactitud requerido en el análisis y de las herramientas computacionales disponibles.

Por lo general, se genera una malla no uniforme, en donde la mayor densidad de elementos se concentra en las zonas donde los gradientes del desplazamiento sean mayores; por otra parte existen dos formas de realizarle mejoras a la malla escogida; la primera consiste en aumentar el número de elementos manteniendo el orden de aproximación, es decir, el número de nodos (Método H), la otra alternativa consiste en mantener constante el número de elementos y aumentar el grado de aproximación o número de nodos por elemento (Método P).

En el diseño de los modelos del presente trabajo se implementó el método H de forma gradual, hasta observar la convergencia en los valores de los esfuerzos en el sistema.

A fin de comprobar lo anterior, para cada modelo de revestidor excéntrico ($\epsilon=0,20$; $\epsilon=0,40$; $\epsilon=0,60$; $\epsilon=0,70$) se realizó una prueba de convergencia de malla, es decir, se construyeron varios modelos con una densidad de malla distinta y se determinó en qué

punto el los valores de los esfuerzos medidos eran estables, garantizando así que el grado de aproximación en la solución obtenida era la correcta.

En las siguientes representaciones se muestra la evaluación del esfuerzo máximo radial y tangencial respectivamente en el anillo de cemento, para cada caso de excentricidad en función del número de elementos en el que es dividido el dominio original.

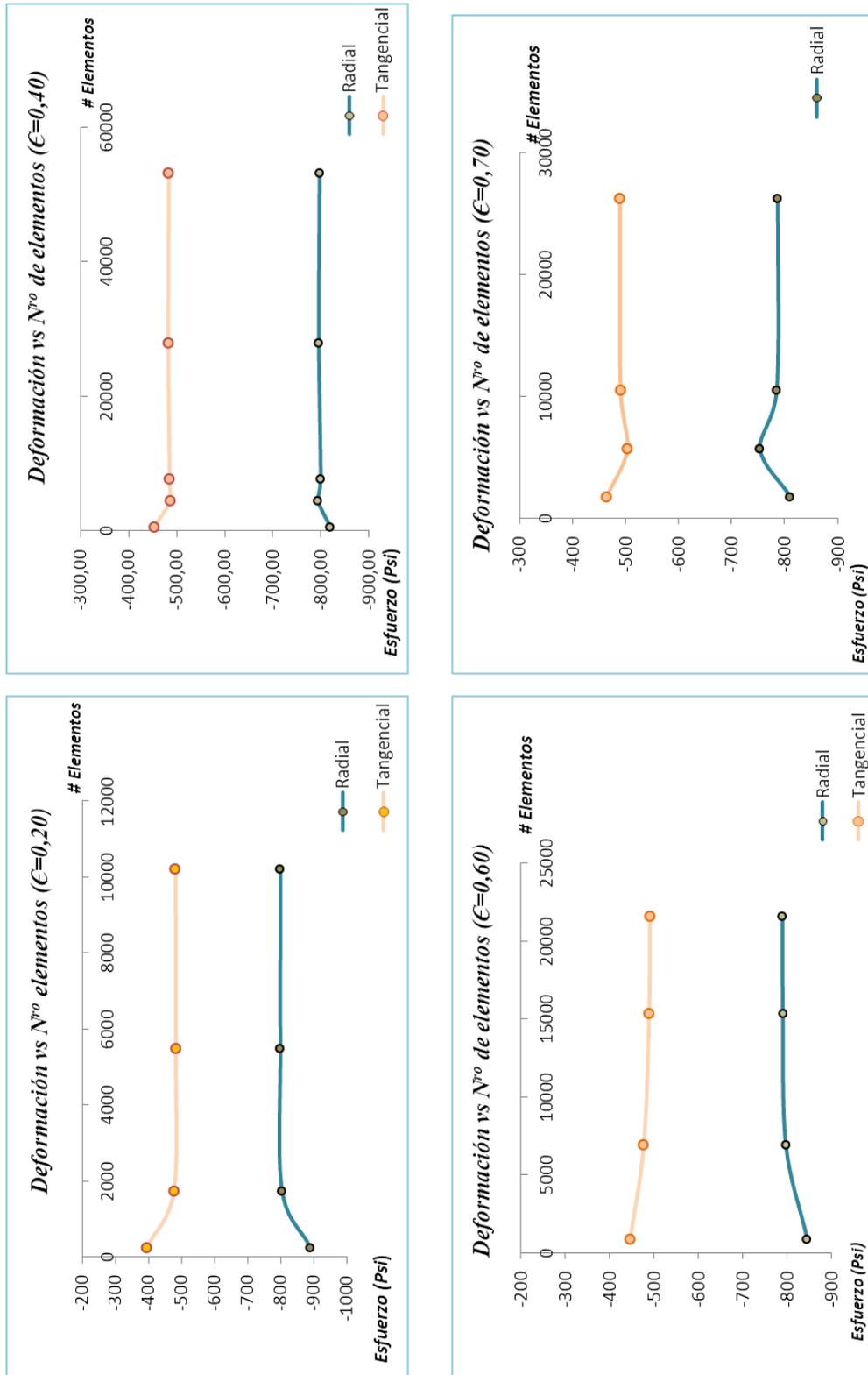


Fig.35 Gráficas de Prueba en donde se determina en número de elementos necesarios para garantizar la convergencia del mallado; para cada modelo excéntrico

- **Imposición de las condiciones de contorno y de carga aplicada**

Una fase importante en la construcción del modelo numérico es la asignación de las condiciones de borde correspondientes a cada una de las secciones que lo conforman, esto se hace de acuerdo al número de grados de libertad presentes.

Debido a que la variable de interés en el cálculo son los desplazamientos; las condiciones de contorno son impuestas en dicha variable restringiendo el movimiento del sistema en la dirección en donde el mismo no esté permitido.

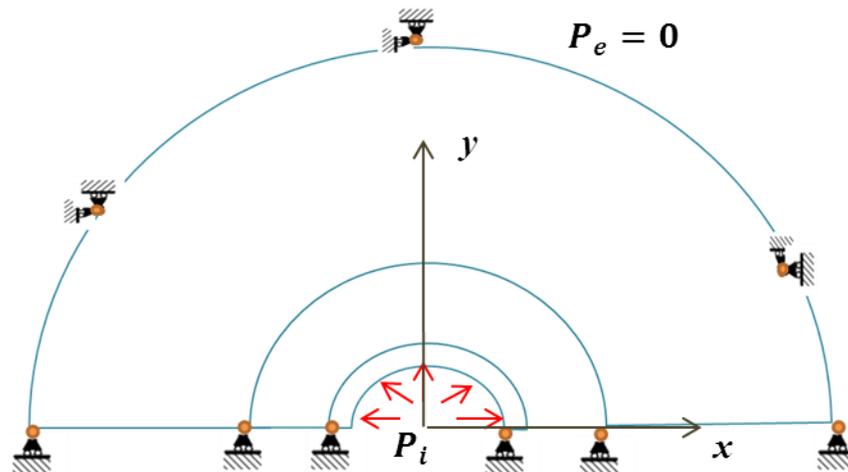


Fig.36 Representación de las condiciones de contorno en el sistema

Sean x, y los ejes coordenados mostrados en la figura 36, los puntos a lo largo del eje x sólo pueden desplazarse a lo largo dicha dirección, estando restringido su movimiento a lo largo del eje y , es decir que $u_y = 0$; por otra parte, los puntos asociados a la frontera de la formación no tienen permitido ningún tipo de movimiento en el plano; esta condición corresponde a considerar que dicha frontera se ubica a una distancia bastante grande del hoyo perforado, en esos puntos es posible escribir que: $u_x = 0$; $u_y = 0$.

En cuanto a la carga aplicada en el sistema, tenemos que el mismo se encuentra sometido a una presión en la sección interna de la tubería, esta presión corresponde a la acción de fluidos dentro del pozo, ya sean debido a operaciones de perforación y completación o a algún tipo de práctica de estimulación, nótese que para el análisis del sistema, en las simulaciones no se toma en cuenta la existencia de los esfuerzos in situ o esfuerzos primarios en la roca ($\mathbf{P}_e = \mathbf{0}$), esta aproximación es posible debido a que la influencia de estos esfuerzos es totalmente independiente a los esfuerzos generados como respuesta por la presión interna en la tubería.

Además de la presión en la sección interna de la tubería es necesario considerar los efectos del aumento de temperatura en cada material, de acuerdo al comportamiento termo-elástico dado por la ecuación (2.20), para efectos del análisis se le asignó tanto al cemento como a la tubería el coeficiente de dilatación térmica del acero es decir, $\alpha = 6.30.10^{-6} \frac{1}{^{\circ}\text{F}}$, siendo esta la condición más deseable en el diseño del cemento para evitar la formación de micro-anillos en la interfaz entre ambos materiales, debido a la mayor dilatación de uno con respecto al otro por acción de la temperatura.

Con la intención de facilitar el procesamiento de los datos por el software y su posterior interpretación, se calculó una relación analítica a partir de la ecuación de continuidad en el desplazamiento radial u_r , que permite estimar la equivalencia entre una presión aplicada al sistema o un aumento de la temperatura.

Específicamente rescribiendo la ecuación (2.21) en coordenadas cilíndricas, tomando en cuenta la componente radial, tenemos que de acuerdo a las expresiones (3.1):

El desplazamiento radial total viene dado por:

$$u(r) = \frac{r}{E} (\nu + 1)(1 - 2\nu) \left(\frac{R_i^2 P_i - R_0^2 P_0}{R_0^2 - R_i^2} \right) - \frac{(\nu + 1)}{E} \left(\frac{R_i^2 R_0^2 (P_0 - P_i)}{R_0^2 - R_i^2} \cdot \frac{1}{r} \right) + r\alpha(T_f - T_0) \quad (3.20)$$

Donde:

α es el coeficiente de dilatación térmica

T_f es la temperatura final

T_0 es la temperatura inicial

Esta ecuación esta asociada a un cilindro de pared gruesa presurizado internamente y externamente, el cual es sometido a una variación de temperatura, puede ser separada en dos contribuciones, es decir, una parte mecánica y una térmica, como sigue:

$$u(R_0) = u(R_0)_{Presión} + u(R_0)_{temperatura} \quad (3.21)$$

Con:

$$u(R_0)_{Presión} = \frac{R_0}{E} (\nu + 1)(1 - 2\nu) \left(\frac{R_i^2 P_i - R_0^2 P_0}{R_0^2 - R_i^2} \right) - \frac{(\nu + 1)}{E} \left(\frac{R_i^2 R_0 (P_0 - P_i)}{R_0^2 - R_i^2} \right) \quad (3.22)$$

$$u(R_0)_{temperatura} = R_0 \alpha \Delta T \quad (3.23)$$

Si consideramos que los desplazamientos generados por ambos efectos son iguales, además de $P_0 = 0$; haciendo la relación entre (3.22) y (3.23) obtenemos lo siguiente:

$$P_i = \frac{E \alpha \Delta T (R_0^2 - R_i^2)}{2 R_i^2 (1 - \nu)} \quad (3.24)$$

A partir de esta relación es posible obtener la equivalencia entre presión y temperatura, haciendo posible convertir toda la carga aplicada a un solo tipo de contribución facilitando el proceso de inserción de la información en el software. Para las simulaciones realizadas se decidió convertir toda la carga aplicada al tipo temperatura, tomando como presión máxima aplicada $P_i = 10000$ Psi y una temperatura máxima de 300 °F.

Sustituyendo en la ecuación (3.24) los valores correspondientes a la tubería mostrados en la tabla 5, despejando ΔT y sumando ambos términos, tenemos que la máxima carga total en temperatura a la que será sometido el sistema es:

$$\Delta T_{m\acute{a}x} = 508,95 \text{ } ^\circ\text{F} \approx 510 \text{ } ^\circ\text{F} \quad (3.25)$$

Esta carga fue barrida en cinco partes en el análisis de cada modelo, desde un valor mínimo de (102 °F) hasta alcanzar la máxima temperatura (510 °F).

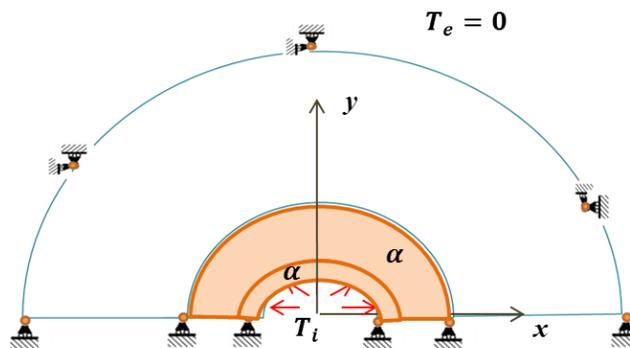


Fig. 37 Modelo del sistema usado en el análisis con sus condiciones de borde y carga aplicada en temperatura

El análisis realizado consiste en un estudio paramétrico del estado de esfuerzos en el sistema revestidor-cemento-formación en función de la excentricidad presente en el revestidor, la variable independiente es el grado de excentricidad (ϵ), esta cantidad puede estar comprendida entre 0 y 1, es decir, el caso de un espacio anular céntrico y una tubería totalmente excéntrica o recostada de la pared de la formación (ausencia del cemento); por

otra parte la variable dependiente son los esfuerzos que experimenta el sistema bajo las condiciones de carga descritas por (3.25).

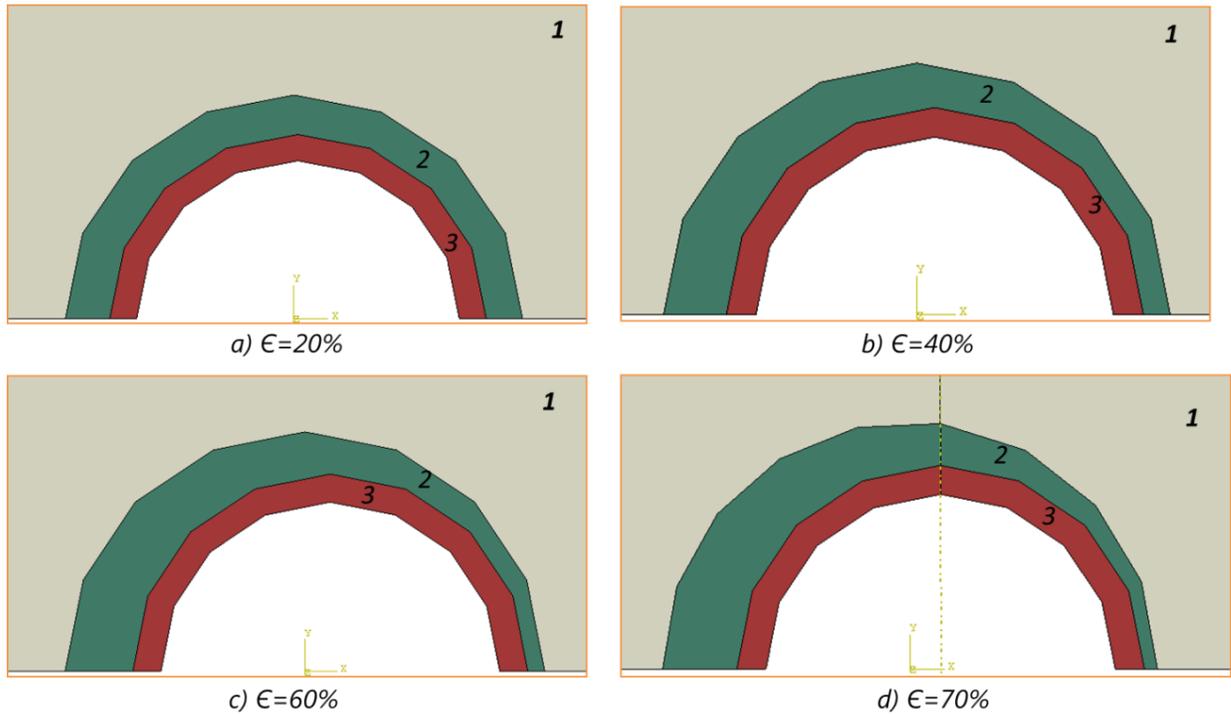


Fig.38 Modelos para el análisis con el Software ABAQUS, para cada caso de excentricidad estudiada. Los números 1,2 y 3 representan los materiales que conforman el sistema; la formación rocosa, el cemento y la tubería respectivamente.

El estudio paramétrico realizado se basa en el análisis de 4 modelos excéntricos Ver figura 38, empezando desde una excentricidad de 0,2 hasta una máxima de 0,7; además para realizar el cálculo del factor de concentración de esfuerzos (K) se realizó el análisis de un modelo céntrico ($\epsilon = 0$), siendo este el modelo base a partir del cual se podrán comparar las variaciones de los esfuerzos bajo el efecto de la excentricidad.

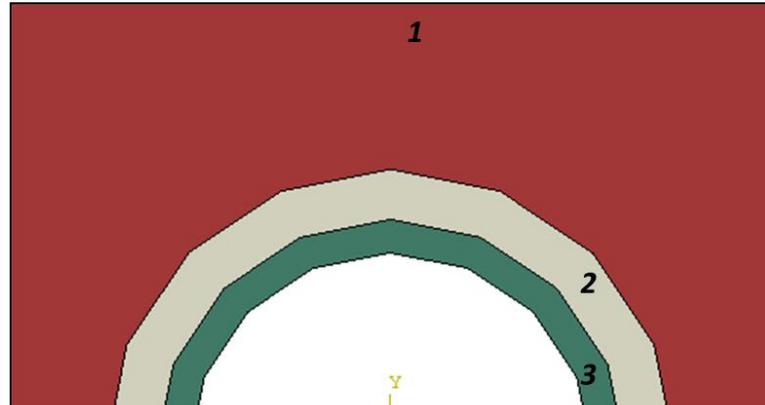


Fig.39 Modelo del sistema revestidor (1)-cemento (2)-formación (3), para el caso de un anular céntrico ($\epsilon=0$)

Una vez diseñados los cinco modelos en cuestión, el siguiente paso consistió en procesar las simulaciones correspondientes, variando las propiedades elásticas de los materiales y barriendo toda la carga establecida.

Finalmente los resultados producto del análisis de cada modelo del pozo, son presentados por el software en forma de un diagrama de colores en donde es posible observar los valores de esfuerzo en todos los puntos de la estructura.

Tomando en cuenta el interés del presente trabajo, el cual pretende evaluar los esfuerzos en el anillo de cemento, se ubicaron los máximos valores de esfuerzo radial σ_r y tangencial σ_θ respectivamente experimentados por dicho material; esto debido a que en dichos puntos existe la mayor probabilidad que se produzca una fractura en el material.

Capítulo 4

Resultados y Análisis

4.1 Validación del Modelo

Antes de realizar el análisis de los modelos planteados en la sección 3.5, a través del uso del software de simulación ABAQUS, se estableció un caso patrón o prueba piloto con el objetivo de garantizar la funcionalidad del mismo.

Esta prueba piloto fue realizada mediante el diseño de un modelo de pozo al cual se le asociaron los datos básicos necesarios para su posterior análisis, por ejemplo, el tipo de elemento usado (CPE4R), la densidad de mallado requerida y la aplicación de las cargas seleccionadas.

La comprobación de los resultados producto de la simulación se hizo mediante la correspondencia entre los valores de esfuerzos obtenidos que se determinan a partir del modelo analítico dado por las ecuaciones (3.3) a (3.5).

La descripción realizada por estas ecuaciones está asociada al problema elástico de deformación plana sometido a presiones uniformes, es decir, en la sección interna de la tubería (P_w) y en la sección externa de la formación (P_f), este modelo simplificado permite reproducir y estimar la influencia de variables presentes en la condición de fondo de pozo, como por ejemplo, variaciones de las presiones en el interior de pozo asociadas al cambio de las propiedades de los fluidos usados en cada una de las fases de explotación, ascensos en la temperatura y cambios en los esfuerzos in situ o esfuerzos primarios en la roca perforada.

Los parámetros escogidos para construir el modelo evaluado son los siguientes:

Tabla 8. Características geométricas y elásticas de la sección evaluada para la comprobación

Radio interno de la Tubería (R_{ic})	<i>4,5 pulg</i>	<i>11,43 cm</i>
Radio externo de la Tubería (R_{ec})	<i>4,81 pulg</i>	<i>12,22 cm</i>
Radio del Cemento (R_{cem})	<i>6,25 pulg</i>	<i>15,88 cm</i>
Radio de la Formación (R_f)	<i>125 pulg</i>	<i>3,18 m</i>
Presión interna en la Tubería (P_w)	<i>1100 Psi</i>	<i>7,58 MPa</i>
Presión Externa en la Formación (P_f)	<i>800 Psi</i>	<i>5,51 MPa</i>
Coefficiente de Poisson-Revestidor (ν_{rev})	<i>0,27</i>	<i>0,27</i>
Coefficiente de Poisson-Cemento (ν_{cem})	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>
Coefficiente de Poisson- Formación (ν_f)	<i>0,393</i>	<i>0,393</i>
Módulo de Young- Tubería (E_{rev})	<i>$2,96 \cdot 10^7 Psi$</i>	<i>203,94 GPa</i>
Módulo de Young- Cemento (E_{cem})	<i>$9,0 \cdot 10^5 Psi$</i>	<i>6,20 GPa</i>
Módulo de Young- Formación (E_f)	<i>$3,93 \cdot 10^5 Psi$</i>	<i>2,71 GPa</i>

A partir de estos parámetros se diseñaron dos modelos asociados al sistema revestidor-cemento-formación con una densidad de malla distinta, esto con el objetivo de verificar el número de elementos necesarios para lograr la convergencia entre el modelo analítico y numérico respectivamente.

En el primer caso de prueba (modelo 1) se realizó la discretización de la siguiente manera: la sección de la tubería (1) fue dividida en 20 elementos de igual tamaño, la sección circular asociada al cemento (2) se dividió en 80 elementos en total, estos elementos están distribuidos en 4 segmentos de igual tamaño conformadas por 20 elementos cada uno; por último, tenemos que en el caso de la formación (3), el borde exterior fue dividido en 20 elementos y la densidad de elementos va en aumento en dirección al hoyo para obtener resultados mas precisos dicha zona. En la figura 40 se muestra la división asociada a cada material.

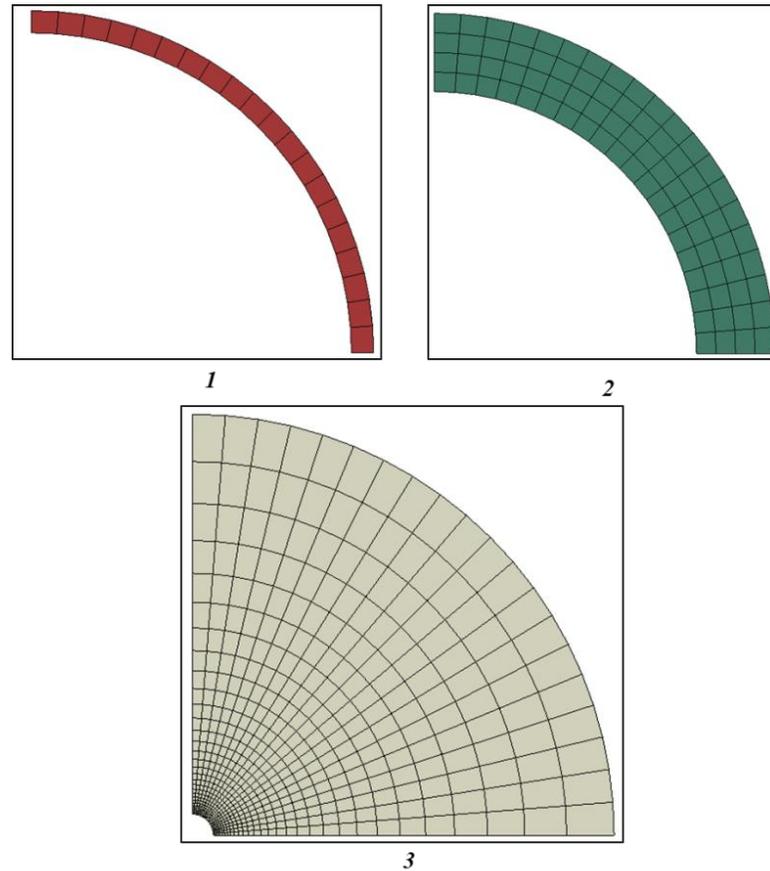


Fig.40 Discretización de cada material en el modelo 1. Tubería (1)-Cemento (2)-Formación (3)

En el modelo 2 se aumentó la densidad de la malla usada, específicamente se duplicó el número de elementos en cada dirección con respecto al número de elementos implementados en cada sección de material para el modelo 1 es decir, la tubería (1) tiene un total de 80 elementos distribuidos en dos segmentos de 40 cada uno, el cemento (2) presenta una división en este caso de 320 elementos asociados al conjunto de 8 segmentos conformados por 40 elementos cada uno; y finalmente la sección de material asociada a la formación (3), en el borde exterior presenta una división de 40 elementos aumentando la densidad del mallado al acercarse a las proximidades del hoyo (Ver figura 41).

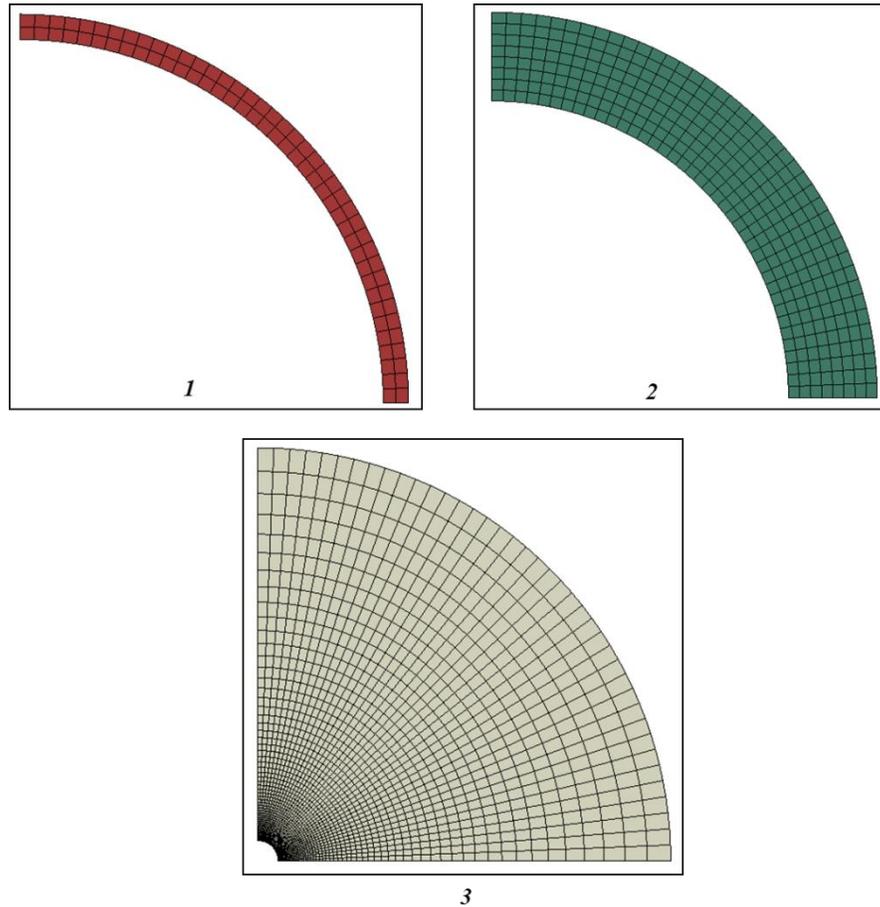


Fig.41 Mallado del modelo 2. Tubería (1)- Cemento (2)- Formación (3)

Una vez realizadas las simulaciones con cada modelo se extrajeron los resultados de las presiones de contacto en las interfaces revestidor-cemento y cemento-formación para así comparar cada uno de estos resultados con los que se obtienen con el modelo analítico o teórico dado por las ecuaciones de la sección 3.4

En las siguientes tablas se muestran los valores obtenidos a través de las simulaciones con cada modelo y su respectivo valor obtenido a partir de las ecuaciones (3.3) (3.4) y (3.5).

Tabla 9. Resultados de los esfuerzos obtenidos a partir de las simulaciones modelo 1, 2 y el valor teórico de cada medida

Esfuerzos (Psi)	Modelo I		Modelo II		Solución Analítica	
	σ_r	σ_θ	σ_r	σ_θ	σ_r	σ_θ
Interfaz Tubería/Cemento	1044,01	705,20	1069,00	710,42	1074,40	718,09
Interfaz Cemento/Formación	919,80	399,20	909,70	406,90	905,61	413,97

Los errores relativos (%) asociados a cada modelo:

Tabla 10. Cálculo de los errores de cada valor de esfuerzo calculado con respecto al modelo analítico

Error relativo (%)	Modelo I		Modelo II	
	$\Delta\sigma_r$	$\Delta\sigma_\theta$	$\Delta\sigma_r$	$\Delta\sigma_\theta$
Interfaz Tubería/Cemento	2,83	1,80	0,51	1,07
Interfaz Cemento/Formación	1,57	3,57	0,45	1,71

Es posible notar como los errores de cada modelo son bastantes pequeños siendo menores al 4 %, esto indica un alto grado de precisión en los valores arrojados por el software, además se observa como es posible refinar la precisión del cálculo aumentando la densidad del mallado. Por ejemplo, en el modelo II el error disminuye hasta hacerse casi despreciable. Tomando en cuenta lo anterior, es posible afirmar que el método de elementos finitos es una herramienta altamente confiable que permite estimar los valores de esfuerzo asociado a un problema mecánico siempre y cuando la densidad de malla y el tipo de elementos escogidos para el análisis sea el adecuado.

Esta correspondencia entre el modelo analítico y numérico se puede observar en las siguientes representaciones gráficas:

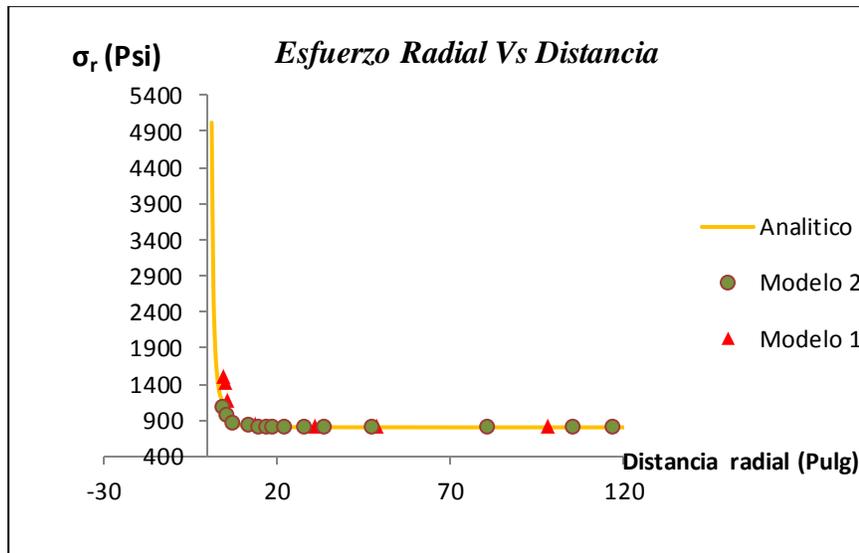


Fig. 42 Convergencia entre valores de esfuerzo radial; modelo analítico y modelos numéricos

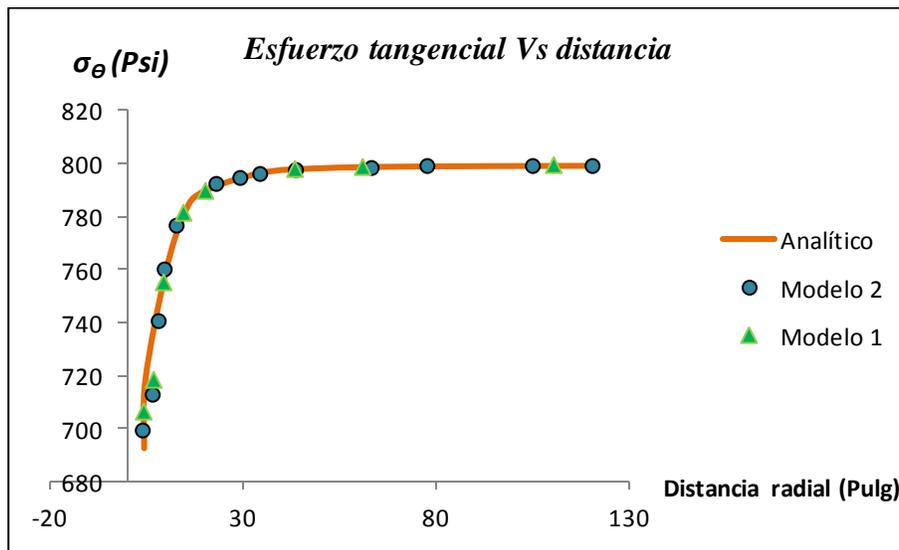


Fig. 43 Convergencia entre valores de esfuerzo Tangencial; modelo analítico y modelos numéricos

En ambos gráficos se observa la superposición de las curvas lo que indica un alto grado de proximidad entre los valores de esfuerzos obtenidos con ambos modelos; en general tenemos que dependiendo del tipo de análisis que se realice será necesario

optimizar la malla lo mayor posible tomando en cuenta que un aumento gradual del número de elementos en el modelo puede generar un aumento a su vez del tiempo de procesamiento o análisis del programa, siendo este un factor de gran importancia que se debe considerar al momento de escoger la malla a implementar.

4.2 Modelos de Tubería Excéntrica

Una vez que se comprobó la funcionalidad del programa, se dio paso a considerar los casos de análisis con la tubería excéntrica, como se describió en el capítulo 3 tenemos cuatro modelos con excentricidades de 0,20; 0,40; 0,60 y 0,70 respectivamente, además de un modelo patrón o de referencia con excentricidad igual a cero (ver figura 44 y 45). Para el primer grupo de corridas se fijaron los módulos elásticos de la formación (Arena C-1, tabla 6), la tubería y se procedió a variar las propiedades del cemento de acuerdo a la tabla 7.

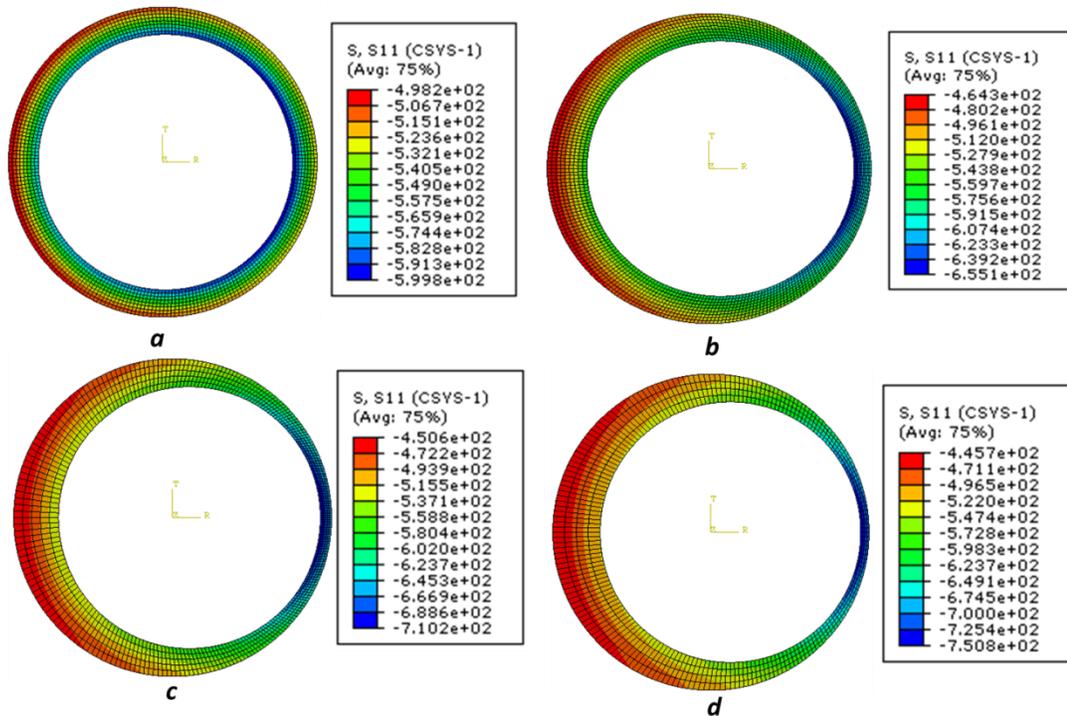


Fig. 44 Resultados de las simulaciones para cada caso de excentricidad en el cemento 1 para $T= 102^{\circ}F$ a) $\epsilon=0,20$; b) $\epsilon= 0,40$; c) $\epsilon= 0,60$; d) $\epsilon= 0,70$. Esfuerzo Radial (Psi)

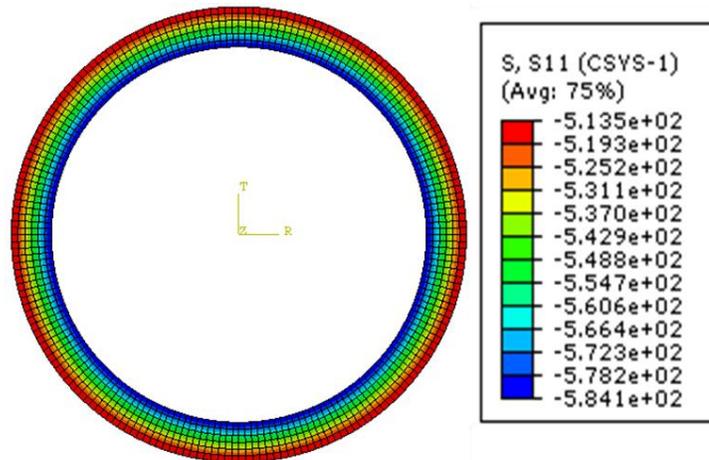


Fig.45 Distribución de esfuerzos Radiales (Psi) en el anillo de cemento para el caso céntrico ($E=0$)

De los datos obtenidos a partir de cada simulación realizada, se extrajeron los valores de esfuerzo máximo que experimenta el anillo de cemento, esto para cada porción de carga aplicada es decir, 102 °F, 204 °F, 306 °F, 408 °F y 510 °F. Por ejemplo, la componente radial del esfuerzo para cada caso de carga se muestra en la tabla 11.

Tabla.11 Esfuerzo radial máximo y mínimo que experimenta el anillo de cemento (Sección interna y externa) para cada caso de existencia de excentricidad asociado al modelo 1 ($E_c = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Psi}$, $\nu_c = 0,10$)

Temperatura (°F)	102		204		306		408		510	
Excentricidad (ϵ)	$\sigma_i(\text{Psi})$	$\sigma_e(\text{Psi})$								
0	-584,1	-513,5	-1177,0	-1022,0	-1766,0	-1532,0	-2355,0	-2043,0	-2943,0	-2554,0
0,20	-600,5	-528,0	-1201,0	-1055,6	-1801,0	-1584,0	-2402,0	-2111,9	-3002,0	-2639,9
0,40	-651,4	-595,6	-1303,0	-1191,3	-1954,0	-1787,0	-2606,0	-2383,0	-3257,0	-2978,2
0,60	-710,0	-662,4	-1420,0	-1324,7	-2130,0	-1987,1	-2841,0	-2649,4	-3551,0	-3311,8
0,70	-750,8	-710,6	-1502,0	-1421,2	-2254,0	-2131,8	-3003,0	-2842,5	-3758,0	-3553,0

A partir de estos datos se procedió a calcular el factor de concentración de esfuerzos ($K_{int}; K_{ext}$) asociados a los anillos interno y externo del cemento para cada caso de excentricidad.

En la tabla 12 se muestran los valores obtenidos para el primer modelo de cemento evaluado.

Tabla.12 Factor de concentración de esfuerzos radial K , para el modelo asociado al cemento $1 E_c = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Psi}$, $\nu_c = 0,10$

Excentricidad(€)	0,20		0,40		0,60		0,70	
Temperatura (°F)	K_{int}	K_{ext}	K_{int}	K_{ext}	K_{int}	K_{ext}	K_{int}	K_{ext}
102	1,020	1,034	1,111	1,165	1,787	1,210	1,280	1,390
204	1,021	1,033	1,107	1,166	1,786	1,206	1,276	1,391
306	1,020	1,033	1,106	1,166	1,786	1,206	1,275	1,391
408	1,020	1,033	1,107	1,166	1,786	1,206	1,277	1,391
510	1,020	1,033	1,106	1,165	1,785	1,206	1,276	1,391

Es posible verificar a partir de los datos obtenidos (Tabla 12), como la existencia de un cierto grado de excentricidad en el revestidor genera una redistribución en los esfuerzos que experimenta el cemento con respecto al caso céntrico, esta variación o concentración de esfuerzos en dicho material se hace más considerable a medida que la excentricidad sigue en aumento. Cabe destacar que el factor de concentración de esfuerzos (K_{int} ; K_{ext}) tanto en el anillo interno como externo del cemento se mantiene constante al aumentar la carga aplicada, esto nos indica que dicho parámetro es independiente de la carga aplicada, este comportamiento se verificó al realizar las diferentes corridas con los distintos tipos de cemento.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, es posible simplificar el estudio de la concentración de esfuerzos en el material evaluando una sola porción de carga aplicada, generando una disminución en el volumen de datos obtenidos para su posterior análisis. Considerando esto en las simulaciones correspondientes al segundo estrato de la formación geológica estudiada, sólo se tomaron en consideración los esfuerzos del cemento para una temperatura en el interior de la tubería de 204 °F.

4.3 Análisis Paramétrico en el Cemento

A través del estudio paramétrico realizado en este trabajo se evaluaron distintas propiedades mecánicas del cemento, esto para determinar como es posible disminuir las probabilidades de que este material sufra algún daño que comprometa su funcionalidad.

Se definieron distintas combinaciones de pares de módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν) para el cemento, a partir de los cuales se llevaron a cabo cada una de las corridas con el programa. En cada caso se consideraron los 4 modelos de revestidor excéntrico siendo el grado de excentricidad la variable independiente y el factor de concentración de esfuerzos (K) la variable dependiente.

Los resultados obtenidos fueron clasificados en función del parámetro a evaluar, en primer lugar tenemos las representaciones gráficas que muestran de que manera la variación del módulo de Young (E) en el cemento afecta el grado de concentración de esfuerzos en sus extremos, es decir, en el anillo interno y el externo respectivamente. En segunda instancia se realizaron las representaciones gráficas asociadas al caso en donde el módulo de Young (E) se mantenía constante y se procedió a variar el coeficiente de Poisson (ν).

4.3.1 Caso I: Concentración de esfuerzos en función de E_c y ϵ

El módulo de elasticidad en el cemento es el parámetro mecánico que permite predecir la capacidad del material a deformarse elásticamente. Experimentalmente se han estimado correlaciones de este parámetro con la resistencia a la compresión, siendo esta la propiedad que estima el grado de resistencia que opone un material a una fuerza de carácter compresivo; en el laboratorio la prueba de la resistencia a la compresión se efectúa sometiendo un cubo de cemento de 2 *pulg*² a una carga compresiva, para determinar la

fuerza con la cual se rompe la muestra. Generalmente se espera que un cemento con una alta resistencia a la compresión se caracterice por tener un alto módulo de Young.

A efectos del diseño de las lechadas, los recientes avances en cálculo numérico y computación permiten estimar y predecir las condiciones de compresión y esfuerzos de tracción que experimenta el cemento. Mediante el conocimiento de estas condiciones, los diseñadores obtienen parámetros a través de los cuales es posible mejorar el diseño y así asociarle al material las propiedades mecánicas necesarias para que sea capaz de soportar los esfuerzos a los que será sometido evitando la aparición de alguna fractura.

Las simulaciones realizadas en este trabajo buscan proporcionar un criterio de soporte a partir del cual sea posible determinar cuales propiedades elásticas del cemento responden adecuadamente a los esfuerzos inducidos en el mismo, tomando en cuenta el efecto de la excentricidad presente en el revestidor.

Con el objetivo de caracterizar este fenómeno desde el punto de vista de las propiedades mecánicas de los materiales, se realizaron una serie de representaciones gráficas que permiten observar la influencia de los módulos elásticos en la respuesta mecánica del cemento.

De acuerdo a la premisa sobre la cual se construyó el modelo, según el cual el cemento tiene un comportamiento isótropo, elástico-lineal, tenemos que es necesario especificar 2 módulos elásticos en el mismo para definir elásticamente el material.

En esta sección se muestra como la variación del módulo de elasticidad en el cemento o módulo de Young (E_c) aumenta o atenúa la concentración de esfuerzos radial y tangencial en este material cuando es sometido a condiciones de fondo de pozo, este fenómeno se muestra a través de los siguientes gráficos:

La componente radial K_r :

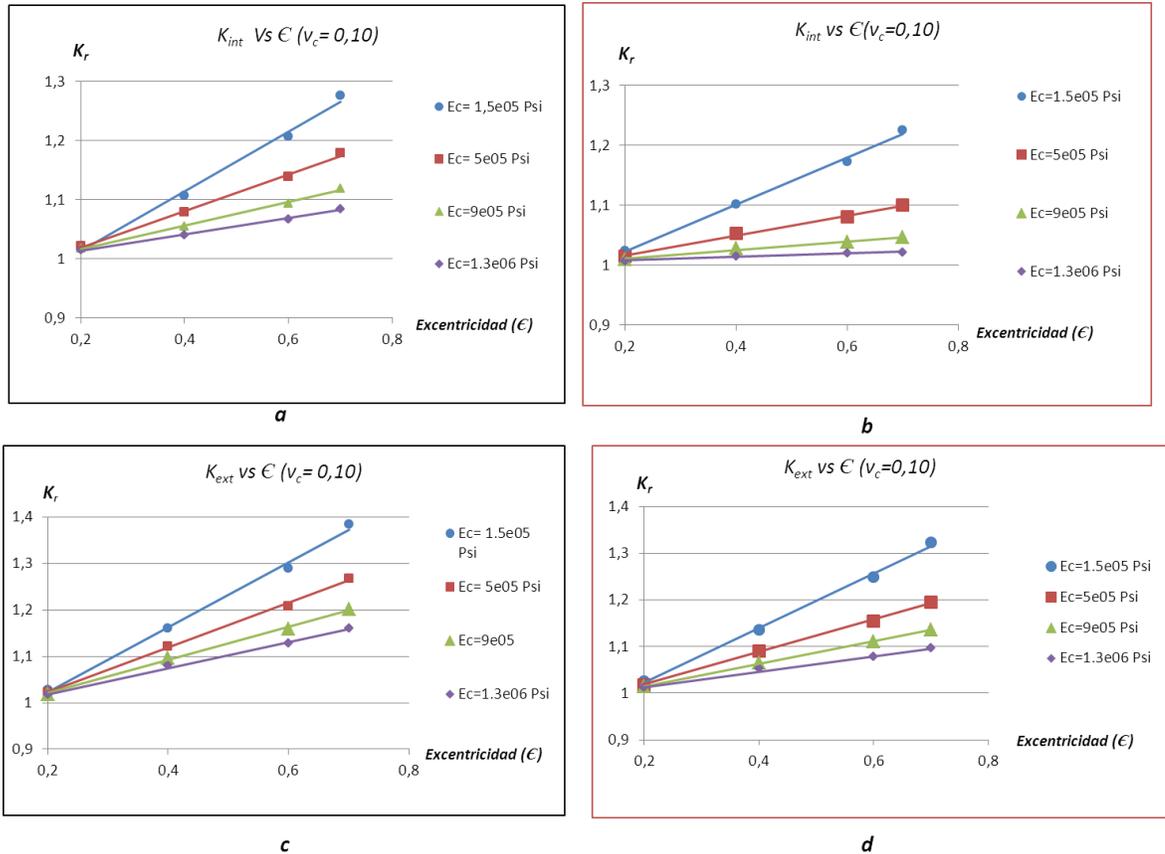


Fig.46 Componente radial del factor de concentración de esfuerzos $K_{int}(r)$; $K_{ext}(r)$ en el anillo de cemento para $\nu_c = 0,10$, como respuesta a una temperatura total aplicada de 204 °F. a) K_{int} (Estrato 1 de la formación), b) K_{int} (Estrato 2 de la formación), c) K_{ext} (Estrato 1 de la formación), d) K_{ext} (Estrato 2 de la formación)

En la figura 46 se puede observar que el factor de concentración de esfuerzos es una función lineal de la excentricidad, en general se obtuvo que el coeficiente de correlación múltiple (R^2) arroja valores cercanos a la unidad $0,95 < R^2 < 0,99$ indicando un alto grado de exactitud en el ajuste ;en el caso del anillo interno de cemento K_{int} (interfaz tubería-cemento) la concentración de esfuerzos es ascendente con el grado excentricidad, de acuerdo a los resultados obtenidos en las simulaciones el ascenso de los esfuerzos se ubican

en la zona donde la capa de cemento es de menor espesor, debido a la desigualdad en la distribución del cemento en el espacio anular por efectos de la excentricidad presente.

Al observar la tendencia de las curvas en el gráfico 46 *a*, es posible notar como un aumento en el módulo de Young del cemento se traduce en una disminución de la concentración de esfuerzos en el anillo interno del mismo, de este fenómeno es posible inferir que al aumentar el módulo de Young en el material es posible atenuar el efecto generado por la descolocación del revestidor en el centro del hoyo, por ejemplo, en el caso cuando $E_c = 1,5 \cdot 10^5$ Psi el esfuerzo máximo se produce para $\epsilon = 0,7$ y tiene un valor de aproximadamente 1,28 veces el esfuerzo observado para el caso céntrico. Por otra parte, tenemos que cuando se aumentó el módulo de Young hasta $E_c = 1,3 \cdot 10^6$ Psi, la concentración de esfuerzo en el mismo punto disminuye hasta 1,08 veces el que se esperaría observar si el revestidor estuviese dispuesto perfectamente centrado. Al variar el tipo de roca (gráfica 46 *b*) por una arena a mayor profundidad (segundo estrato, 17220 pies y $E_f = 2,03 \cdot 10^6$ Psi) el factor de concentración de esfuerzos mantuvo su comportamiento ascendente con la excentricidad, sin embargo, este ascenso se encuentra por debajo que en el primer caso, en esta ocasión el esfuerzo máximo para el mayor módulo de Young en el cemento y el caso extremo de excentricidad es de 1,02.

De acuerdo a lo anteriormente descrito, es deseable que el cemento tenga propiedades elásticas similares a la formación cuando estamos en presencia de rocas con un alto grado de consolidación, a fin de garantizar el control de las presiones en el pozo y suministrar un soporte a la estructura de la formación.

En la figura 46 *c* y *d* se muestra la concentración de esfuerzos en el anillo externo de cemento (Interfaz cemento-formación), al observar la tendencia de las curvas se tiene que la respuesta del cemento en esta región es similar al mostrado en *a* y *b*, el factor de concentración de esfuerzos asciende al aumentar el grado de excentricidad, este efecto está relacionado directamente con la disminución del espesor de cemento en conjunto con el

aumento del grado de excentricidad, por lo que el material en esta zona tiene una menor capacidad de absorber esfuerzos bajo régimen elástico, aumentando a su vez la probabilidad de fracturamiento en el mismo.

Cabe destacar que en esta zona la concentración de esfuerzos es superior al experimentado por el anillo interno. El máximo aumento observado es de 1,38 veces el valor de esfuerzo en el caso de un anular céntrico (grafico *c*, $E_c = 1,3 \cdot 10^6$ Psi, para $\epsilon=0,93$).

El conocimiento de los máximos esfuerzos radiales en las interfaces nos permite determinar la capacidad del cemento de mantenerse adherido a la tubería (anillo interno) y a la formación (anillo externo), a través de los criterios de falla por pérdida de adherencia interna y externa, comparando dicho esfuerzo con el valor de resistencia a la adherencia del cemento los cuales se obtienen mediante ensayos de laboratorio.

Componente tangencial K_θ :

En la antigüedad el análisis de las propiedades mecánicas del cemento se limitaba al estudio de la resistencia a la compresión del mismo, posteriormente se demostró que este criterio no era suficiente debido a que las fallas en el cemento por lo general están asociadas a esfuerzos de tensión, surgiendo la necesidad de implementar criterios de fallas para esfuerzos de esta naturaleza. A fin de implementar dichos criterios es necesario conocer el estado de esfuerzo al que está sometido el cemento y compararlo con criterios de falla que incluyan las diferentes posibilidades de fractura del material, siendo este calibrado a través de pruebas de laboratorio.

Cuando se da paso al análisis de la componente tangencial, siendo esta la más crítica en tensión (Fig. 47) se tiene que la concentración de esfuerzos es linealmente ascendente con la excentricidad, de igual forma que en el caso radial un aumento en el módulo de elasticidad en el cemento ocasiona una disminución de la concentración de esfuerzos en el

material, este comportamiento se puede apreciar al observar como se produce una disminución de la pendiente en la familia de rectas mostradas en los gráficos de la fig. 47 al aumentar el módulo de elasticidad. Al comparar los valores de K_{int} considerando ambos estratos de la formación (gráfica *a* y *b*), se tiene que el comportamiento más favorable del cemento, es decir, el cual exhibe una menor concentración de esfuerzos lo tiene el que presenta un módulo de Young mas alto, siendo a su vez el mas similar al valor de módulo de elasticidad de la roca en la formación.

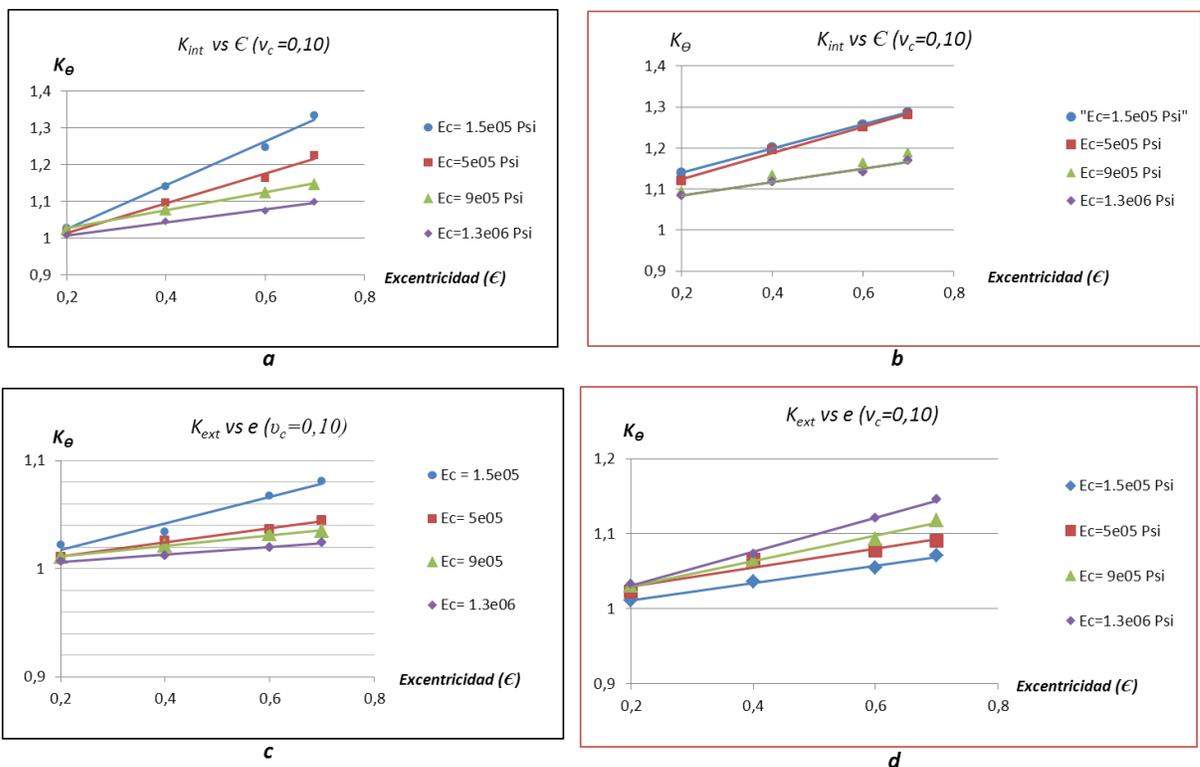


Fig.47 Componente Tangencial del factor de concentración de esfuerzos K_{int} ; K_{ext} en el anillo de cemento para $\nu_c = 0,10$, como respuesta a una temperatura total aplicada de 204 °F. a) K_{int} (Estrato 1 de la formación), b) K_{int} (Estrato 2 de la formación), c) K_{ext} (Estrato 1 de la formación), d) K_{ext} (Estrato 2 de la formación)

Al evaluar la respuesta del material en la región externa (Interfaz cemento-formación) gráficos *c* y *d*, se tiene que la concentración de esfuerzos es de menor magnitud al comparar

con el caso anterior, ubicándose por debajo de 1,1 para el primer tipo de roca (grafica *c*) y en el caso de la roca con menor módulo de Young (grafica *d*) por debajo de 1,15. Al evaluar el segundo estrato (grafica *d*) se observa un aumento poco apreciable entre las pendientes de las rectas, es decir, cuando los módulos de elasticidad del cemento y la formación son mas cercanos, los esfuerzos tangenciales se ven poco influenciados por el aumento del módulo de Young en el cemento, siendo el factor predominante en la concentración de esfuerzos el grado de excentricidad presente. A partir de los gráficos es posible inferir que cementos con un módulo de elasticidad alto, se ven afectados en menor proporción por el grado de excentricidad presente; Sin embargo, los cementos con mayor módulo de Young exhiben esfuerzos de tensión superiores en comparación con los cementos en donde dicha propiedad es menor, aumentando la probabilidad de que los primeros presenten fallas. Tomando en cuenta lo anterior, resulta importante determinar con cual valor del módulo de Young del cemento la concentración de esfuerzos no superara el valor de resistencia a la compresión del mismo, garantizando el sello hidráulico.

Considerando coeficientes de Poisson de 0,15 y 0,20 respectivamente tenemos lo siguiente:

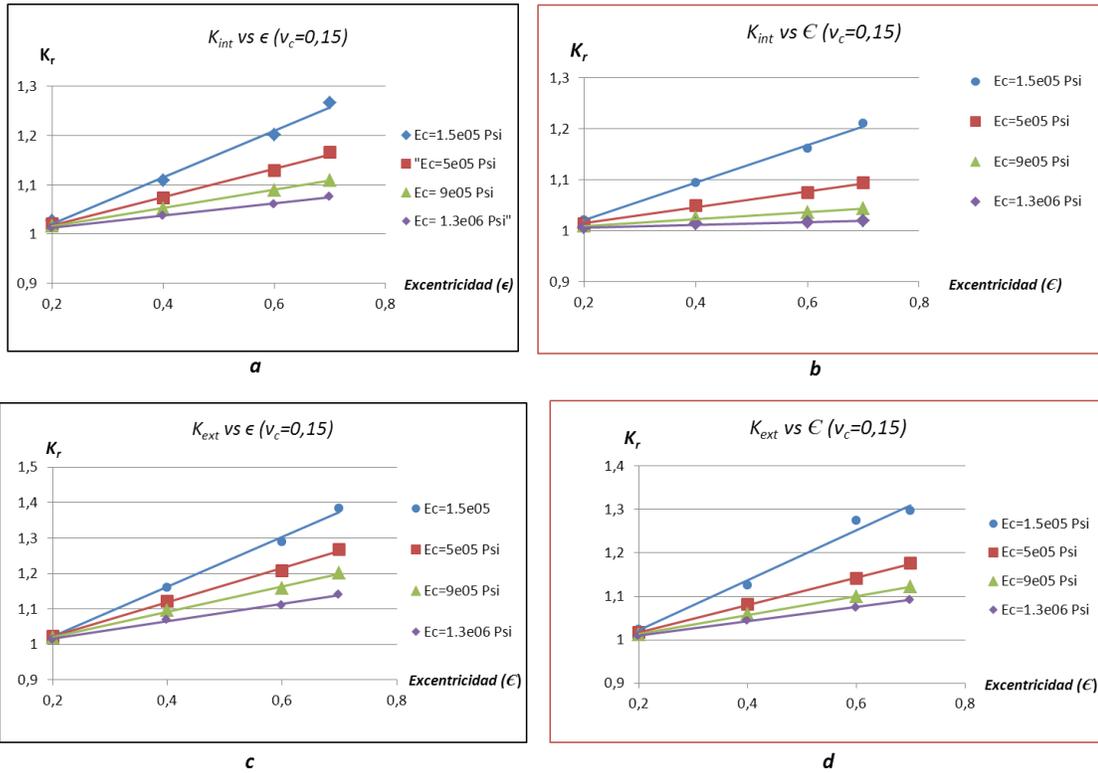


Fig.48 Componente radial del factor de concentración de esfuerzos en el anillo de cemento para $\nu_c = 0,15$,
 a) K_{int} (Estrato 1 de la formación), b) K_{int} (Estrato 2 de la formación), c) K_{ext} (Estrato 1 de la formación), d)
 K_{ext} (Estrato 2 de la formación)

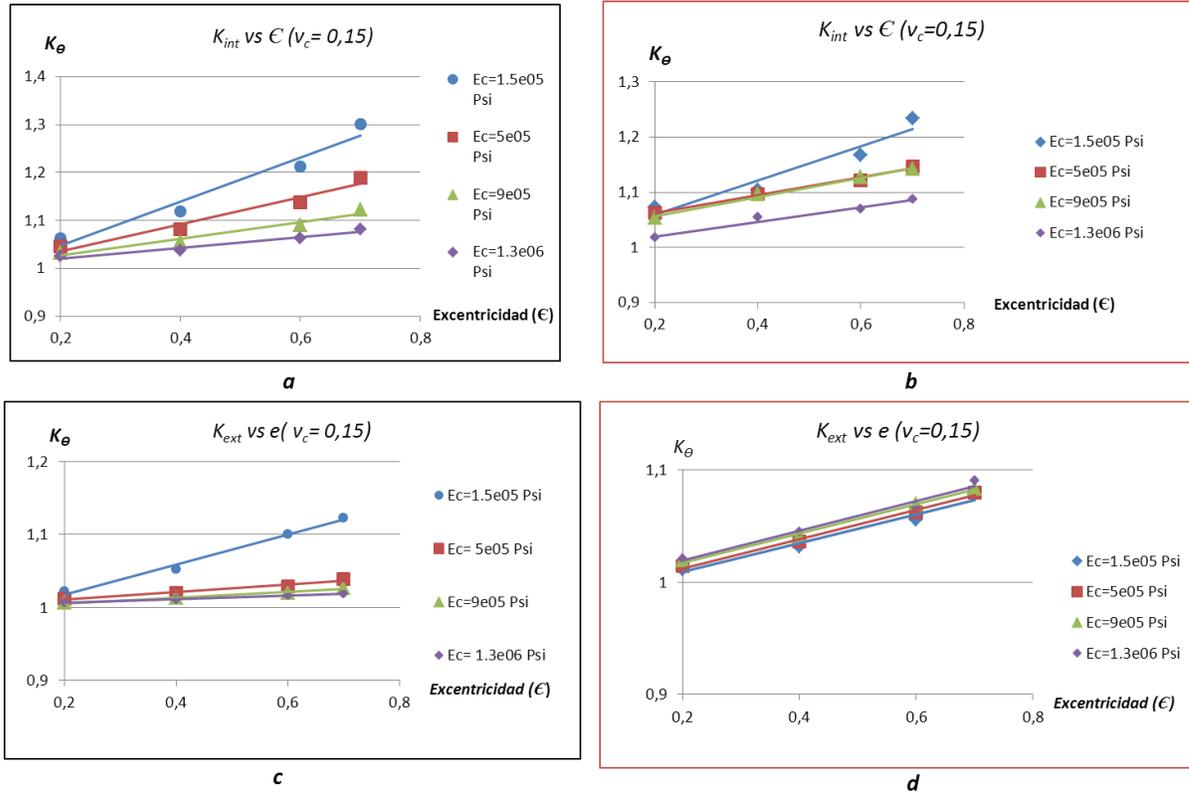


Fig.49 Componente Tangencial del factor de concentración de esfuerzos en el anillo de cemento para $\nu_c = 0.15$, a) K_{int} (Estrato 1 de la formación), b) K_{int} (Estrato 2 de la formación), c) K_{ext} (Estrato 1 de la formación), d) K_{ext} (Estrato 2 de la formación)

En las figuras 48 y 49 observamos como afecta el cambio del coeficiente de Poisson en la respuesta del cemento a los esfuerzos a los que es sometido para cada modelo de revestidor excéntrico, en este caso tenemos que no se producen cambios considerables en las curvas al compararlas con el caso inicial ($\nu_c = 0.10$), el comportamiento de las curvas del factor de concentración de esfuerzos se mantienen en ambas componentes, por otra parte, al efectuar la comparación entre los valores máximos de K obtenidos en ambos casos ($\nu_c = 0.10$ y $\nu_c = 0.15$) se tienen que los mismos difieren en la segunda cifra significativa, este fenómeno nos indica que un cambio en dicho parámetro no afecta considerablemente la respuesta del material. Esta tendencia de las curvas se mantiene de igual forma para el caso $\nu_c = 0.20$ el cual se muestra en el apéndice B.

4.3.2 Caso I I: Concentración de esfuerzos en función de ν_c y ϵ

En general, el coeficiente de Poisson ν nos permite estimar en que medida una carga aplicada a lo largo de una dirección induce un alargamiento o un encogimiento del material en las direcciones perpendiculares a dicha carga, a efectos del presente estudio, se efectuaron las simulaciones tomando en cuenta tres coeficientes de Poisson del cemento ($\nu_c = 0,10 ; 0,15 ; 0,20$).

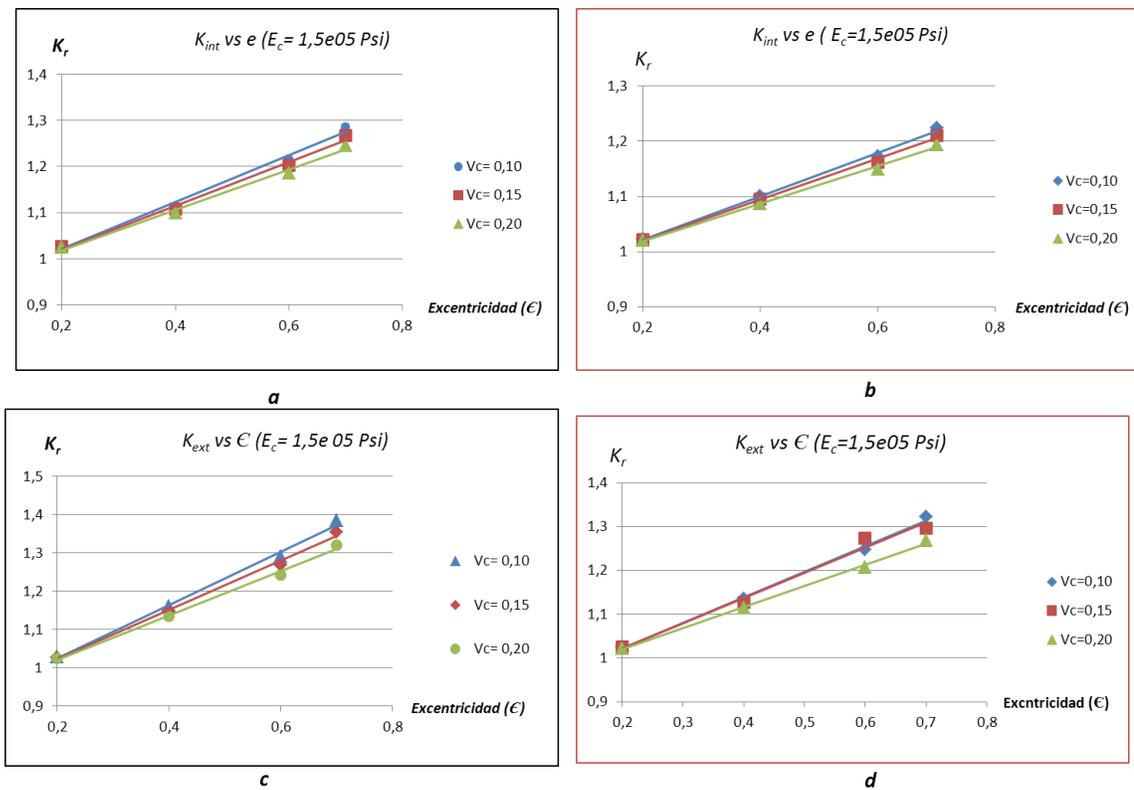


Fig.50 Componente radial del factor de concentración de esfuerzos en función del coeficiente de Poisson del cemento y la excentricidad presente. a y b corresponden a la región del anillo interno y c, d a la región del anillo externo en el cemento.

Para cada magnitud de módulo de Young, se representó gráficamente como la variación del coeficiente de Poisson afecta la concentración de tensiones en el cemento,

tanto en el anillo interno como externo del mismo respectivamente. Para el caso de $E_c = 1.5 \cdot 10^5$ Psi tenemos lo siguiente (ver figura 50)

En primera instancia, tenemos que a partir de las gráficas es posible visualizar que el aumento del coeficiente de Poisson en el cemento no genera cambios considerables en la concentración de esfuerzos en las interfaces; en cuanto a la tendencia de las curvas, tenemos un comportamiento lineal con pendiente positiva, es decir, ascensos en la excentricidad inducen una mayor concentración de esfuerzos en el lado más angosto del cemento.

Al evaluar el efecto de las propiedades de la roca K_{int} y K_{ext} en el cemento, tenemos que se produce una leve disminución de los esfuerzos en cada caso excéntrico en el caso del segundo estrato de arena el cual se caracteriza por tener un módulo de Young inferior al asociado en las simulaciones de las gráficas (*a* y *c*) donde $E_{f_1} = 6,67 \cdot 10^6$ Psi y $E_{f_2} = 2,03 \cdot 10^6$ Psi. gráficas (*b* y *d*).

De acuerdo a la figura 51, es posible observar que los esfuerzos tangenciales se ven mayormente afectados por la variación de ν_c , en ambas interfaces la concentración de esfuerzos tiende a aumentar linealmente con el grado de excentricidad presente, este aumento o este efecto concentrador de esfuerzos se ve atenuado levemente en el caso del segundo estrato de arena con menor módulo de elasticidad y un mayor coeficiente de Poisson, siendo esta roca más incompresible o capaz de adaptarse lateralmente (menor esfuerzos tangenciales) con mayor facilidad a los esfuerzos radiales aplicados.

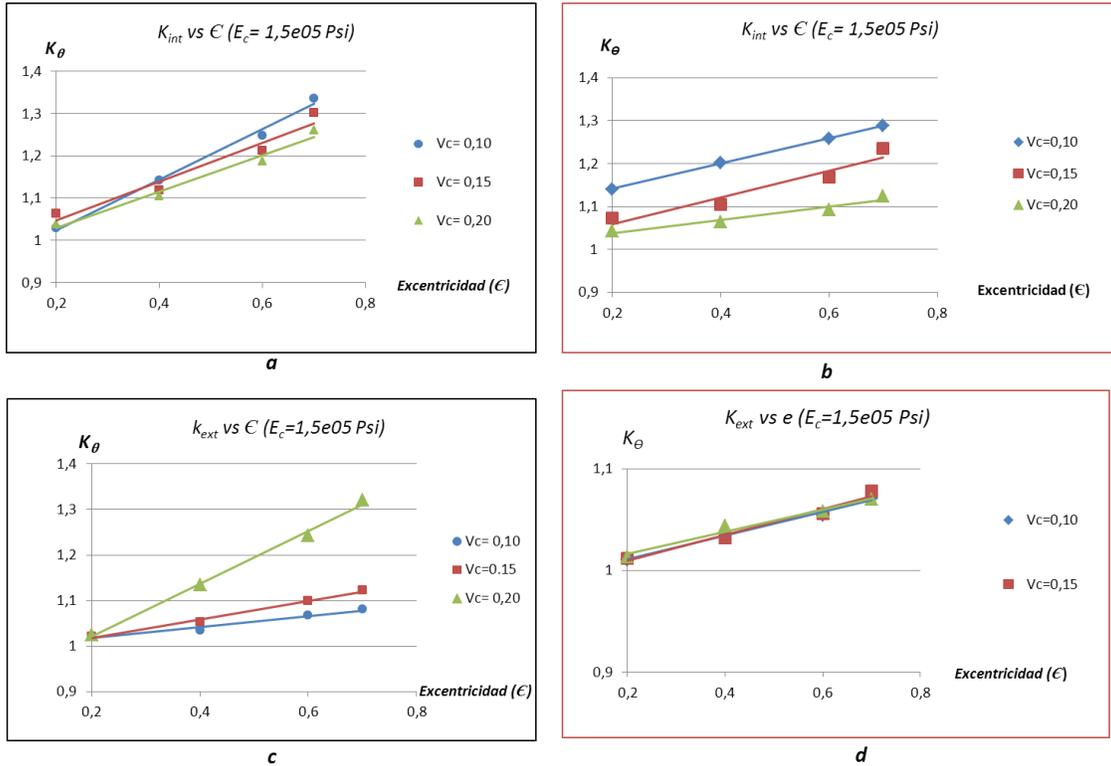


Fig.51 Influencia del coeficiente de Poisson del cemento en la concentración de los esfuerzos tangenciales para $E_c = 1.5 \cdot 10^5$ Psi

Al aumentar el módulo de elasticidad en el cemento a $E_c = 5 \cdot 10^5$ Psi, se tiene que el comportamiento de las curvas se mantiene para ambas componentes del factor de concentración de esfuerzos, sin embargo, si tomamos como ejemplo el máximo valor de K_{int} en la grafica a de la figura 50 y la comparamos con ese mismo valor en la gráfica de la figura 52 se observa que se produce una disminución en los valores de K para el segundo caso, es decir, un aumento del módulo de elasticidad del cemento genera una disminución en la concentración de los esfuerzos en dicho punto. Por otra parte se tiene que las variaciones de los coeficientes de Poisson no generaron cambios considerables en las curvas. Por otro lado el cambio de propiedades en la roca induce en este caso el mismo efecto atenuador de los esfuerzos que en el primer caso, ubicando el máximo aumento de K en ambas interfaces por debajo de 1,1 y 1,2 respectivamente. Este efecto se puede apreciar de igual manera en los casos $E_c = 9 \cdot 10^5$ Psi y $E_c = 1,3 \cdot 10^6$ Psi (Apéndice B).

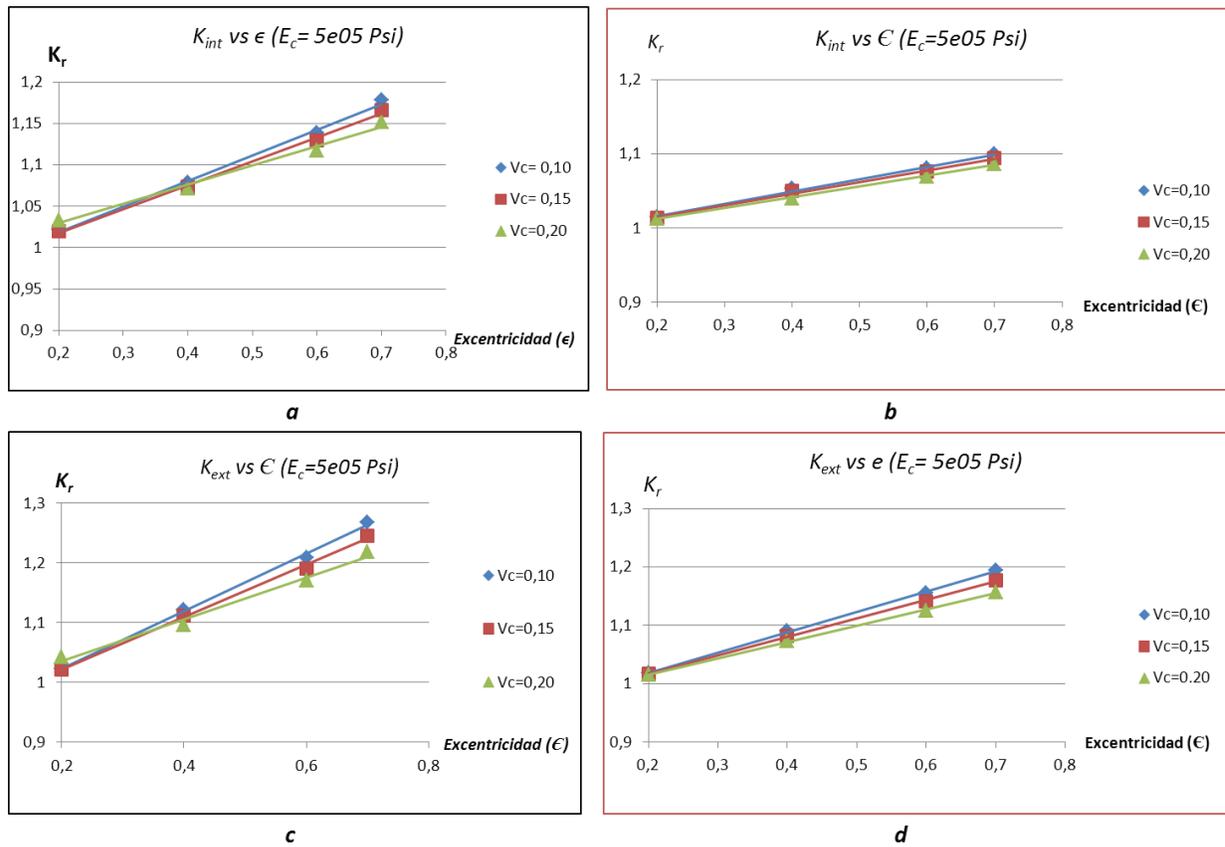


Fig.52 Componente radial del factor de concentración de esfuerzos en función del coeficiente de Poisson del cemento y la excentricidad presente. *a* y *b* corresponden a la región del anillo interno y *c*, *d* a la región del anillo externo en el cemento.

En cuanto a la respuesta de la componente tangencial (figura 53), la concentración de esfuerzos en ambas interfaces del cemento aumenta gradualmente con la excentricidad (pendiente positiva). Se puede apreciar que las variaciones inducidas por modificaciones en el coeficiente de Poisson cada vez son menos apreciables al evaluar cementos con módulos de Young más altos, además que la mayor concentración de esfuerzos ocurre cuando se considera el coeficiente de Poisson de menor magnitud, esto nos indica que es favorable implementar un cemento con un alto coeficiente de Poisson para disminuir la concentración de esfuerzos tangenciales y a su vez evitar las fallas por tensión en el material. En general es posible inferir que cambios en el coeficiente de Poisson generan

cambios menos drásticos en los esfuerzos que experimenta el cemento en comparación con los cambios que induce la modificación del módulo de Young.

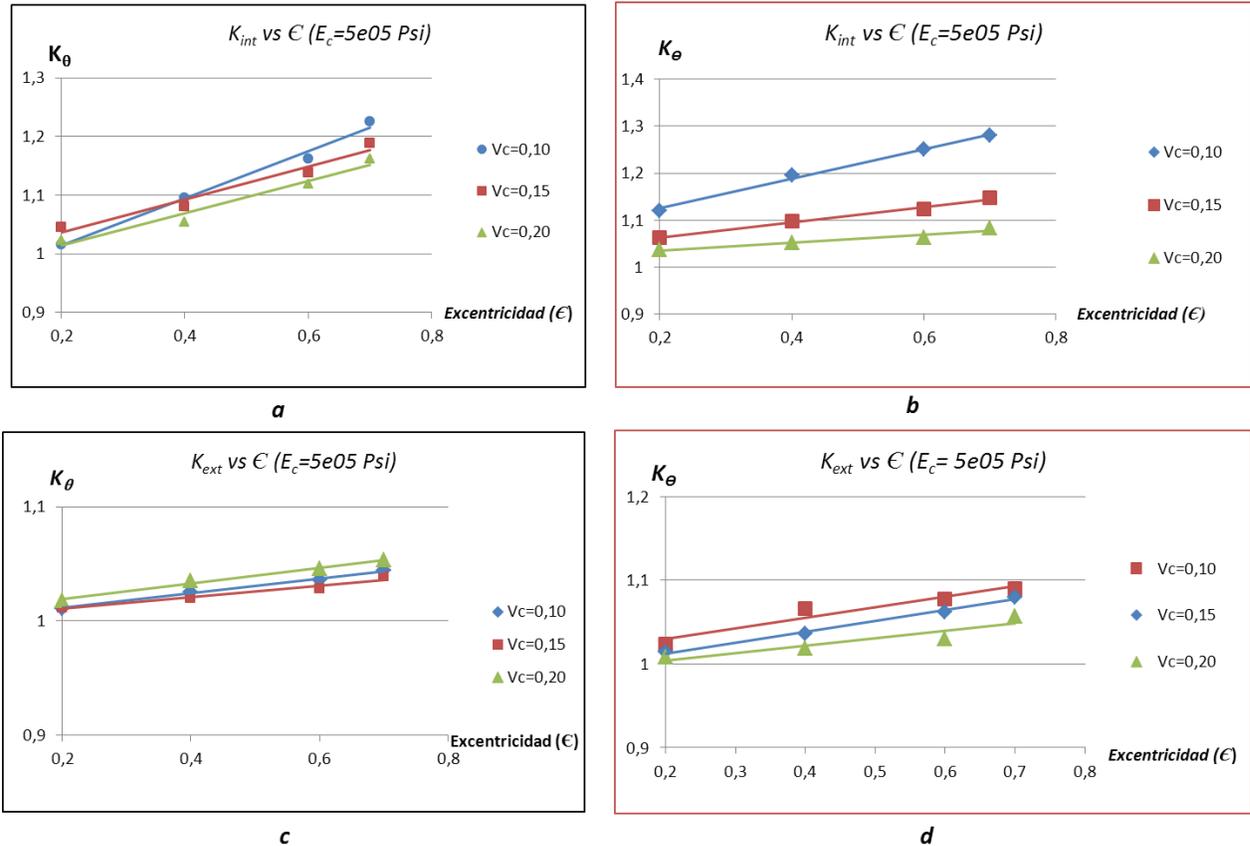


Fig.53 Componente tangencial del factor de concentración de esfuerzos en función del coeficiente de Poisson del cemento y la excentricidad presente. *a* y *b* corresponden a la región del anillo interno y *c*, *d* a la región del anillo

La posibilidad de estimar los esfuerzos aplicados en el cemento a través de las simulaciones, ha motivado que se lleven a cabo investigaciones acerca de las propiedades mecánicas de este material enfocadas a la adición de agregados o aditivos en el mismo. Por ejemplo, debido a que el cemento es un material multifase, cualquier variación en algún contenido secundario resulta en un cambio en el módulo de elasticidad posterior al fraguado.

Para una resistencia del cemento dada, el módulo elástico del agregado es mas alto que el de la pasta de cemento hidratado, por lo que a mayor cantidad de aditivo implementado resulta en un mayor módulo de elasticidad en el cemento fraguado. Este procedimiento hace posible la adaptación del cemento a las condiciones más favorables de esfuerzos, dadas por las simulaciones previas al diseño como las realizadas en el presente trabajo.

Dentro de la gran variedad de sustancias implementadas para modificar las propiedades del cemento tenemos las siguientes:

Alcohol Polivinílico: aumenta la resistencia a la adherencia entre las interfaces de cada material (Revestidor/Cemento/Formación)

Humo de Sílice: aumenta la resistencia a la compresión además de la respuesta del cemento al CO_2 .

Metakaolín: contribuye al desarrollo de la resistencia a la compresión, tensión y flexión; además de mejorar la resistencia del cemento a los sulfatos.

Estireno-Butadieno-Látex: reduce la permeabilidad del cemento e incrementa la resistencia a la tensión y la resistencia a la adherencia.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Con base a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se ofrecen las siguientes conclusiones:

- La construcción del modelo físico asociado al problema de esfuerzos-deformaciones en el sistema revestidor/cemento/formación a través de la solución analítica (2D) bajo la condición de deformación plana, permite obtener el estado de esfuerzos para ciertos casos de carga siempre que el comportamiento del sistema sea termoelástico-lineal. Sin embargo, este modelo presenta restricciones, siendo necesario su extensión a fin de considerar un comportamiento de los materiales más general como: variaciones en la geometría de las partes, anisotropía de las propiedades mecánicas de cada material, etc.
- La implementación del método de elementos finitos a través del software de simulación ABAQUS, resulta conveniente y altamente eficiente para construir modelos con menor restricción que reproduzcan con mayor exactitud el orden de las condiciones de esfuerzos a los que es sometido el sistema.
- Se encontró que la excentricidad en el revestidor actúa como concentrador de esfuerzos en las vecindades del pozo generando una redistribución de los mismos desde la zona con menor espesor de cemento a la zona con mayor espesor. Siendo

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

de gran importancia tomar en cuenta dicho efecto a fin de evitar errores en el diseño del material cementante.

- El factor de concentración de esfuerzos es un parámetro que no depende de la carga aplicada ni de las propiedades elásticas del material cuando se evalúan piezas compuestas por un solo material. Sin embargo, en el caso de la presencia de materiales acoplados con propiedades diferentes entre sí, sólo se mantiene la independencia asociada a la carga aplicada y si se produce una variación de los esfuerzos en el sistema producto de la interacción entre los materiales.
- A partir de la determinación del factor de concentración de esfuerzos es posible corregir los esfuerzos determinados a partir de soluciones simplificadas, y evitar errores producto de la estimación deficiente de los esfuerzos reales a los que el pozo es sometido.
- En general, la implementación del cálculo del factor de concentración de esfuerzos como criterio de diseño de materiales en sistemas en los cuales no es posible determinar una solución analítica, es de gran utilidad cuando se requiere del análisis profundo de un elemento que será sometido a esfuerzos y cuyo funcionamiento es de vital importancia.
- El módulo de Young en el cemento (E_c) es la constante elástica que tiene mayor influencia en el comportamiento de este material en la respuesta a los esfuerzos tanto radiales como tangenciales. Por lo que un control de este parámetro, por ejemplo, a través de la utilización de aditivos permite mejorar características específicas en el material y así optimizar la integridad mecánica del material resultante disminuyendo la probabilidad de aparición de fallas en el mismo.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

- Variaciones del coeficiente de Poisson (ν_c) en el cemento no afectan de manera considerable los esfuerzos radiales en la interfaces tubería/cemento-cemento/formación. pero si tienden a generar aumentos mayores en los esfuerzos tangenciales que experimenta el material en la interfaces cuando se consideran ν_c pequeños, potenciando la probabilidad de que se produzcan fallas por tensión o del tipo de pérdida de adherencia, por lo que es importante monitorear el efecto de dicho parámetro en los esfuerzos tangenciales.

5.2 Recomendaciones a trabajos futuros

De acuerdo a las observaciones realizadas en el presente trabajo, se ofrecen las siguientes recomendaciones.

- Implementar las ecuaciones de la teoría de la elasticidad para estimar una solución más general al problema de esfuerzos-deformaciones, sin la premisa de deformaciones planas permitiendo evaluar pozos en donde se genere movimiento a lo largo de la dirección axial.
- A pesar que la utilización de modelos bidimensionales resulta efectiva en la estimación de los esfuerzos en el pozo. Se recomienda la construcción de un modelo tridimensional, a partir del cual sea posible comparar los resultados obtenidos con el modelo 2D.
- Se recomienda la realización de simulaciones a partir de un modelo que considere propiedades de plasticidad en el cemento, presión de poro en la formación, y anisotropía en los esfuerzos, para completar el análisis y determinar la influencia de estos parámetros en la integridad mecánica del cemento.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

- Se recomienda dar continuidad al estudio planteado en este trabajo tomando en cuenta todas las configuraciones geométricas posibles además de una mayor cantidad de combinaciones asociadas a las propiedades elásticas de los materiales.

Apéndice A

Problema de un cilindro de pared gruesa

Para definir el estado de esfuerzos en un cilindro de pared gruesa, es decir, su espesor entre el radio satisface que $\frac{t}{r} \leq \frac{1}{10}$ se deben considerar la condición de equilibrio estático además de la compatibilidad geométrica. El sistema consiste en un cilindro sometido a una presión interna P_i y una presión externa P_o .

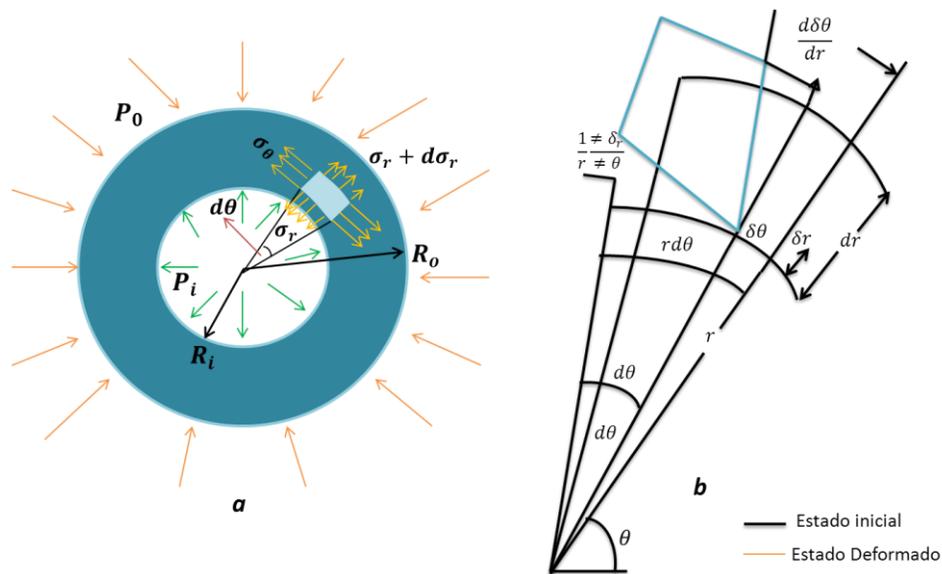


Fig. 54 a) Sección transversal de un cilindro de pared gruesa; b) Elemento del material en el estado inicial o no deformado y en el estado deformado. (Martin, Sadd.2005)

Entonces planteando la condición de equilibrio estático en la dirección radial:

$$\sum_{i=1}^n F_r = 0 \quad (\text{A.1})$$

Sumando las contribuciones de fuerzas a lo largo de dicha dirección obtenemos:

$$\left(\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr\right) (r + dr) d\theta dz - \sigma_r r d\theta dz - 2\sigma_\theta \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) dr dz = 0 \quad (\text{A.2})$$

Ahora considerando $d\theta$ un ángulo muy pequeño, y despreciando los términos de segundo orden:

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} dr + dr \sigma_r = \sigma_\theta dr \quad (\text{A.3})$$

De donde:

$$\sigma_\theta = r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r \quad (\text{A.4})$$

Ahora es necesario encontrar una relación que permita determinar el esfuerzo radial; usando la definición de deformación las cuales se obtienen mediante la variación de la longitud de las fibras del material por unidad de longitud a lo largo de la dirección en consideración, tenemos que:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\left(\delta_r + \frac{\partial \delta_r}{\partial r} dr\right) - \delta_r}{dr} = \frac{\partial \delta_r}{\partial r} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{(r + \delta_r)d\theta - rd\theta}{rd\theta} = \frac{\delta_r}{r} \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

Otra forma de expresar las deformaciones en función de los esfuerzos es a través de la ley de Hooke como sigue:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)}{E} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)}{E} \\ \varepsilon_z &= \frac{\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)}{E}\end{aligned}\tag{A.6}$$

Si consideramos el estado de deformación plana en el cilindro, tenemos que $\varepsilon_z = 0$, de donde es posible escribir de la tercera ecuación (A.6).

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)\tag{A.7}$$

Expresando las deformaciones radiales y tangenciales en función de los esfuerzos en esas direcciones a partir de (A.7), y por otra parte introduciendo las relaciones obtenidas en (A.5) es posible escribir los esfuerzos como sigue:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[(1-\nu) \frac{d\delta_r}{dr} + \nu \frac{\delta_r}{r} \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\nu \frac{d\delta_r}{dr} + (1-\nu) \frac{\delta_r}{r} \right]\end{aligned}\tag{A.8}$$

Si insertamos las ecuaciones (A.8) en (A.4) encontramos la ecuación diferencial que describe el sistema:

$$\frac{d^2 \delta_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\delta_r}{dr} - \frac{\delta_r}{r^2} = 0 \quad (\text{A.9})$$

Esta ecuación diferencial ordinaria (EDO), es del tipo Euler y tiene por solución:

$$\delta_r = A_1 r + \frac{A_2}{r} \quad (\text{A.10})$$

A_1 y A_2 son constantes que se obtienen a partir de las condiciones de contorno, sin embargo para la determinación de estas constantes los desplazamientos δ_r son desconocidos, mientras que los esfuerzos radiales si pueden definirse en las fronteras como:

$$\sigma_r(R_i) = -P_i \quad \sigma_r(R_0) = -P_0 \quad (\text{A.11})$$

Al realizar la derivada correspondiente en (A.10) y sustituir en (A.8) las condiciones de frontera (A.11).

$$\begin{aligned} \sigma_r(R_i) = -P_i &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[-(1-2\nu) \frac{A_2}{R_i^2} + A_1 \right] \\ \sigma_r(R_0) = -P_0 &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[-(1-2\nu) \frac{A_2}{R_0^2} + A_1 \right] \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones encontramos que las constantes tienen la forma:

$$A_1 = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{E} \frac{P_i R_i^2 - P_0 R_0^2}{R_0^2 - R_i^2} \quad (\text{A.13})$$

$$A_2 = \frac{(1 + \nu)}{E} \frac{(P_i - P_0) R_0^2 R_i^2}{R_0^2 - R_i^2}$$

Insertando en (A.10) y posteriormente en (A.8) obtenemos finalmente:

$$\sigma_r = \frac{R_i^2 P_i - R_0^2 P_0}{R_0^2 - R_i^2} + \frac{R_i^2 R_0^2 (P_0 - P_i)}{R_0^2 - R_i^2} \cdot \frac{1}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = \frac{R_i^2 P_i - R_0^2 P_0}{R_0^2 - R_i^2} - \frac{R_i^2 R_0^2 (P_0 - P_i)}{R_0^2 - R_i^2} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (\text{A.14})$$

$$\sigma_z = 2\nu \left(\frac{R_i^2 P_i - R_0^2 P_0}{R_0^2 - R_i^2} \right)$$

Donde: σ_z es el esfuerzo de confinamiento a lo largo de la dirección axial, como restricción para la condición de deformación plana.

Apéndice B

Representaciones gráficas del Factor de concentración de esfuerzos (K) en función de los módulos elásticos del Cemento.

Caso I: Concentración de esfuerzos vs E_c y ϵ

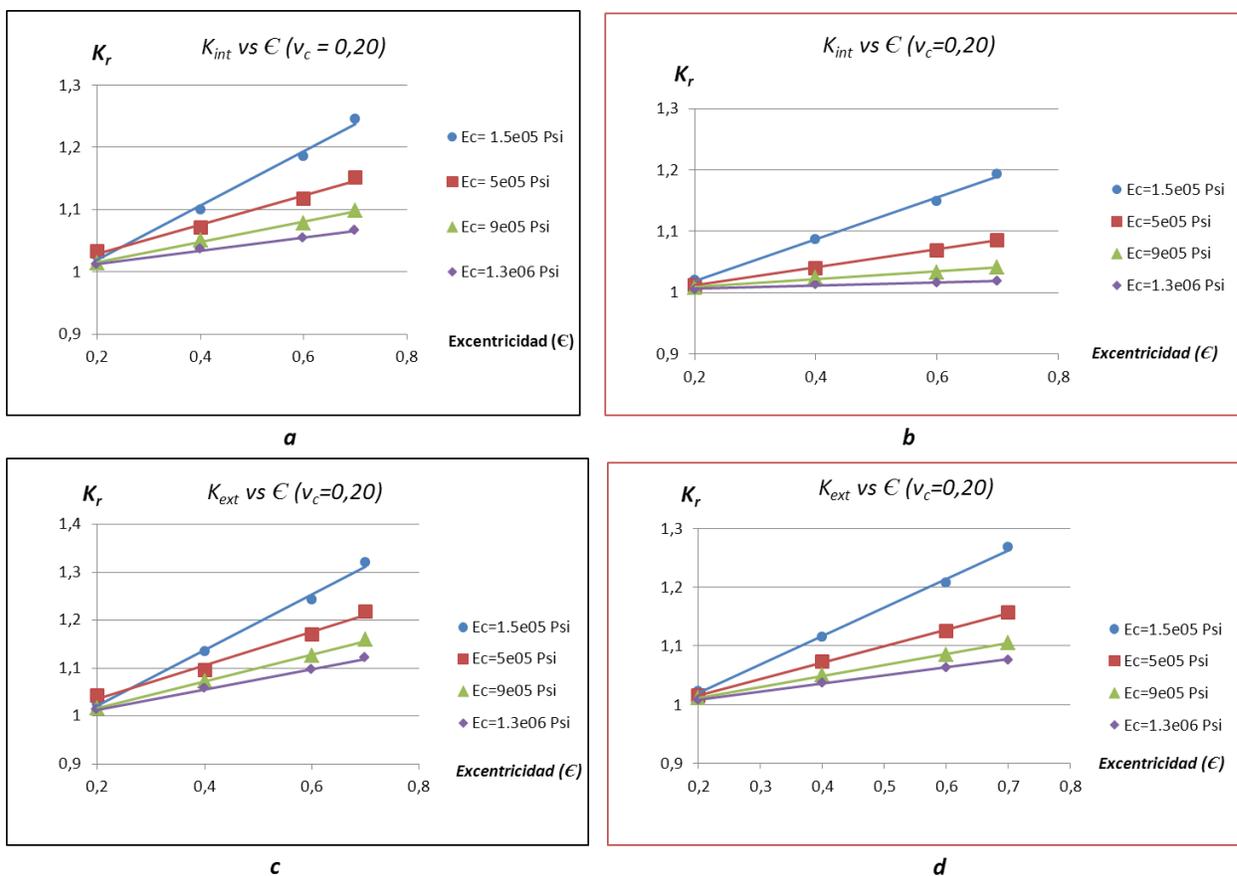


Fig. 55 Componente Radial del factor de concentración de esfuerzos K_r en función del módulo de Young del cemento (E_c), para $\nu_c = 0,20$ tomando en cuenta los dos estratos de arena en la formación (estrato 1, estrato 2). *a* y *b* están asociadas a el anillo interno del cemento), *c* y *d* al anillo externo del cemento.

Apéndice B: Gráficas del factor de concentración de esfuerzos

$\nu_c = 0,20$

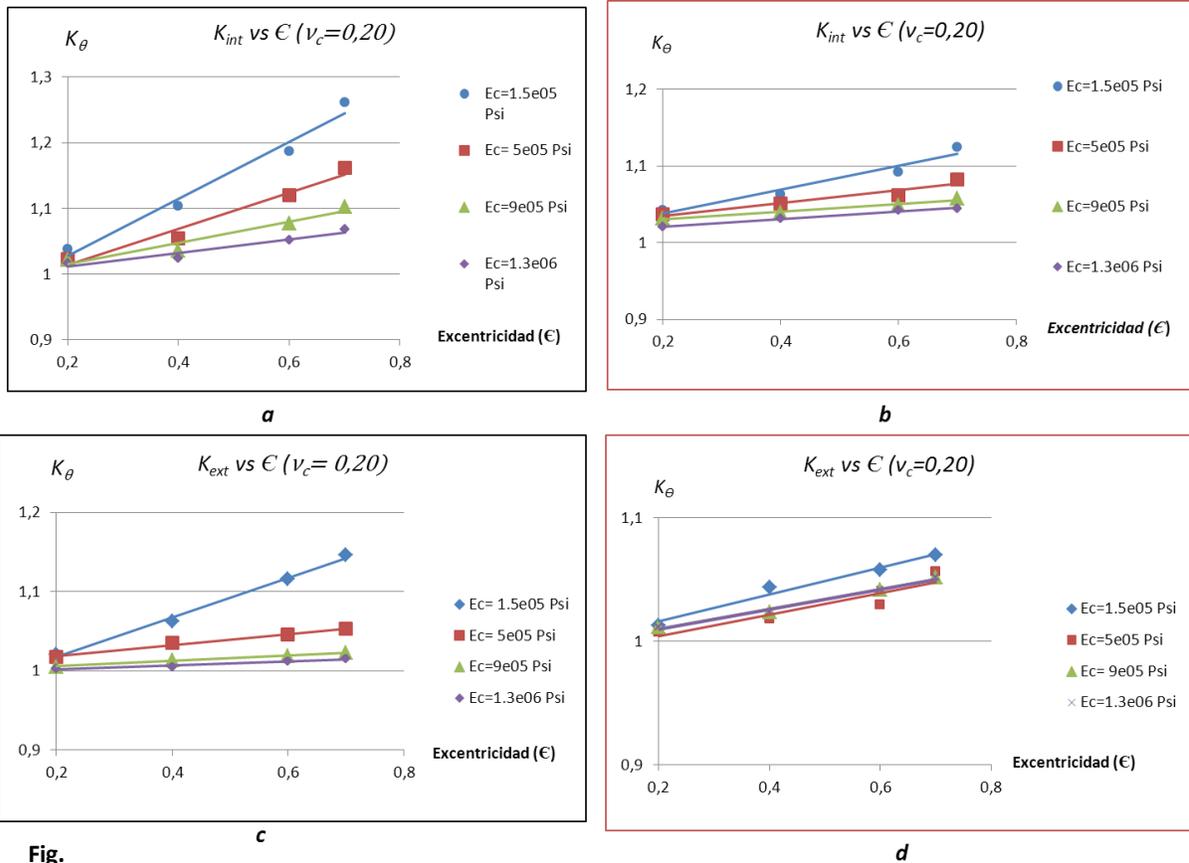


Fig.

56 Componente Tangencial del factor de concentración de esfuerzos K_{θ} en función del módulo de Young del cemento (E_c), para $\nu_c = 0,20$ tomando en cuenta los dos estratos de arena en la formación (estrato 1, estrato 2). *a* y *b* están asociadas a el anillo interno del cemento, *c* y *d* al anillo externo del cemento.

Caso II: Concentración de esfuerzos vs ν_c y ϵ

$$E_c = 9.10^5 \text{ Psi}$$

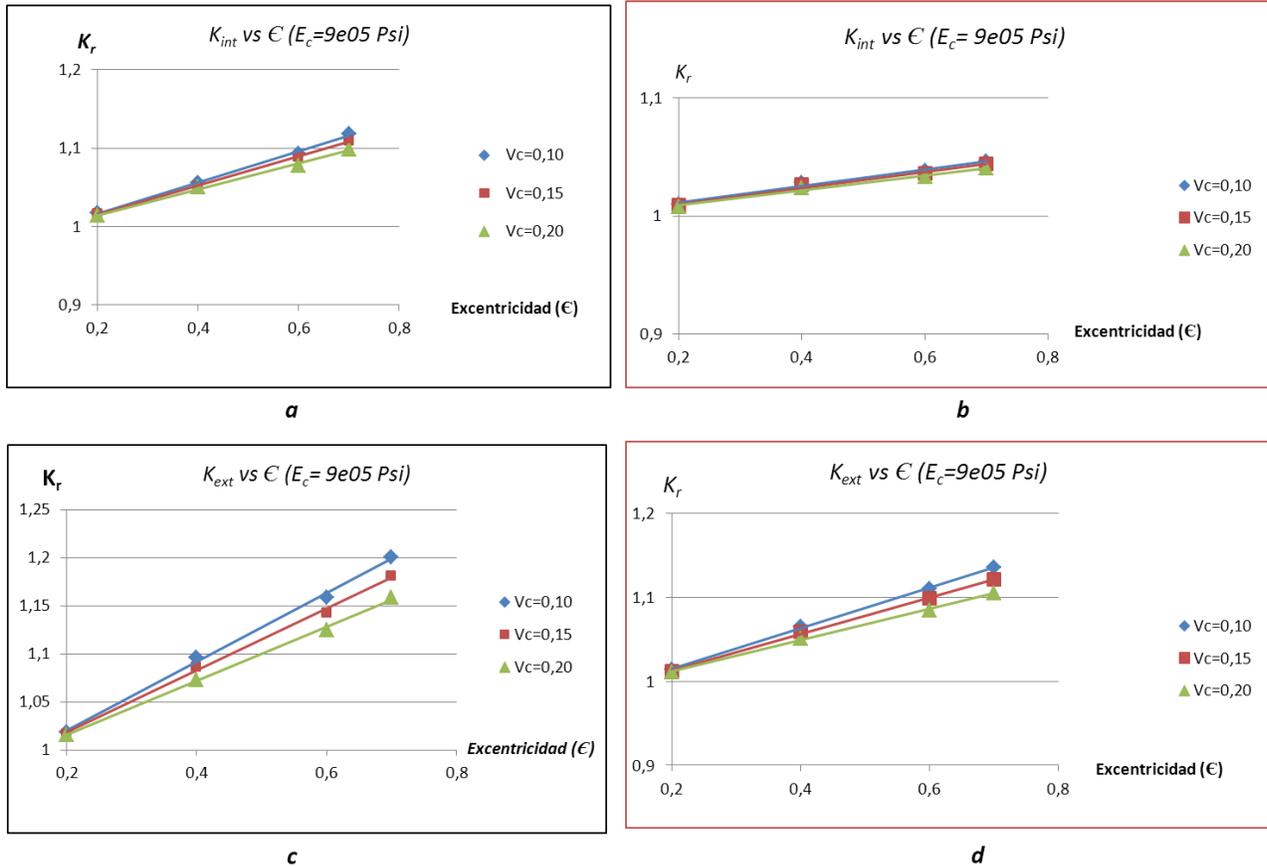


Fig. 57 Componente Radial del factor de concentración de esfuerzos K_r en función del Coeficiente de Poisson del cemento (ν_c), para $E_c = 9.10^5 \text{ Psi}$ tomando en cuenta los dos estratos de arena en la formación (estrato 1, estrato 2). *a* y *b* están asociadas a el anillo interno del cemento *c* y *d* al anillo externo del cemento

Apéndice B: Gráficas del factor de concentración de esfuerzos

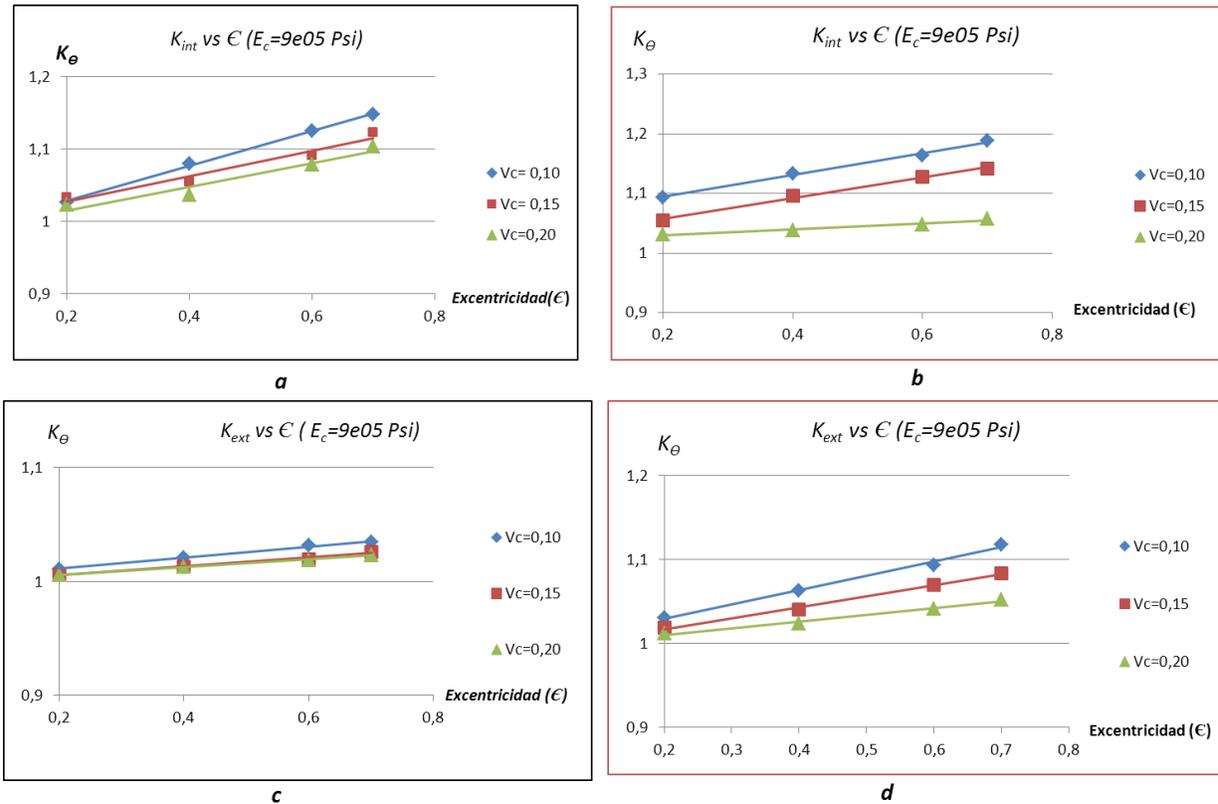


Fig. 58 Componente Tangencial del factor de concentración de esfuerzos K_{θ} en función del Coeficiente de Poisson del cemento (ν_c), para $E_c = 9 \cdot 10^5$ Psi tomando en cuenta los dos estratos de arena en la formación (estrato 1, estrato 2). *a* y *b* están asociadas a el anillo interno del cemento *c* y *d* al anillo externo del cemento.

Apéndice B: Gráficas del factor de concentración de esfuerzos

$$E_c = 1.3 \cdot 10^6 \text{ Psi}$$

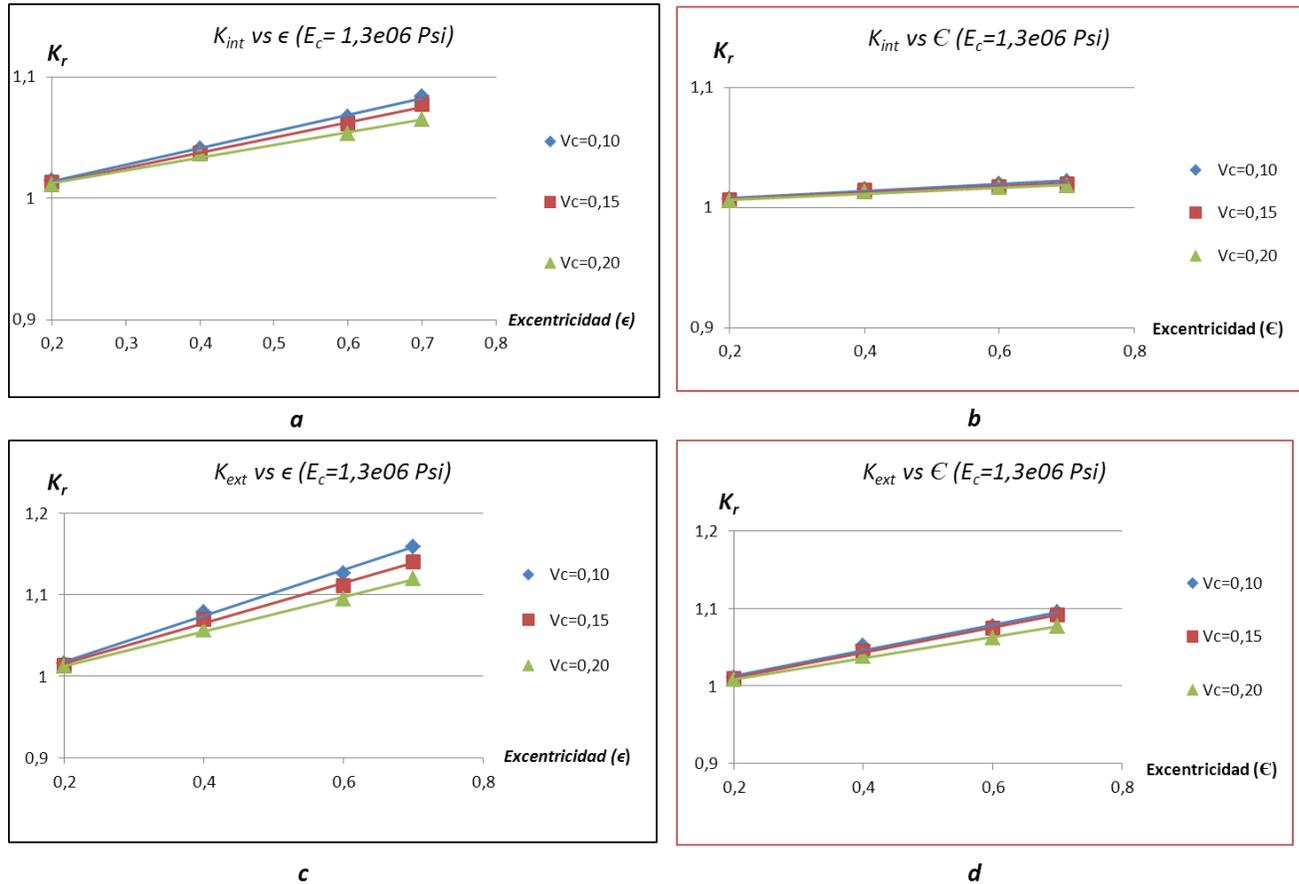


Fig. 59 Componente radial del factor de concentración de esfuerzos K_r en función del Coeficiente de Poisson del cemento (ν_c), para $E_c = 1.3 \cdot 10^6 \text{ Psi}$ tomando en cuenta los dos estratos de arena en la formación (estrato 1, estrato 2). *a* y *b* están asociadas a el anillo interno del cemento, *c* y *d* al anillo externo del cemento.

Apéndice B: Gráficas del factor de concentración de esfuerzos

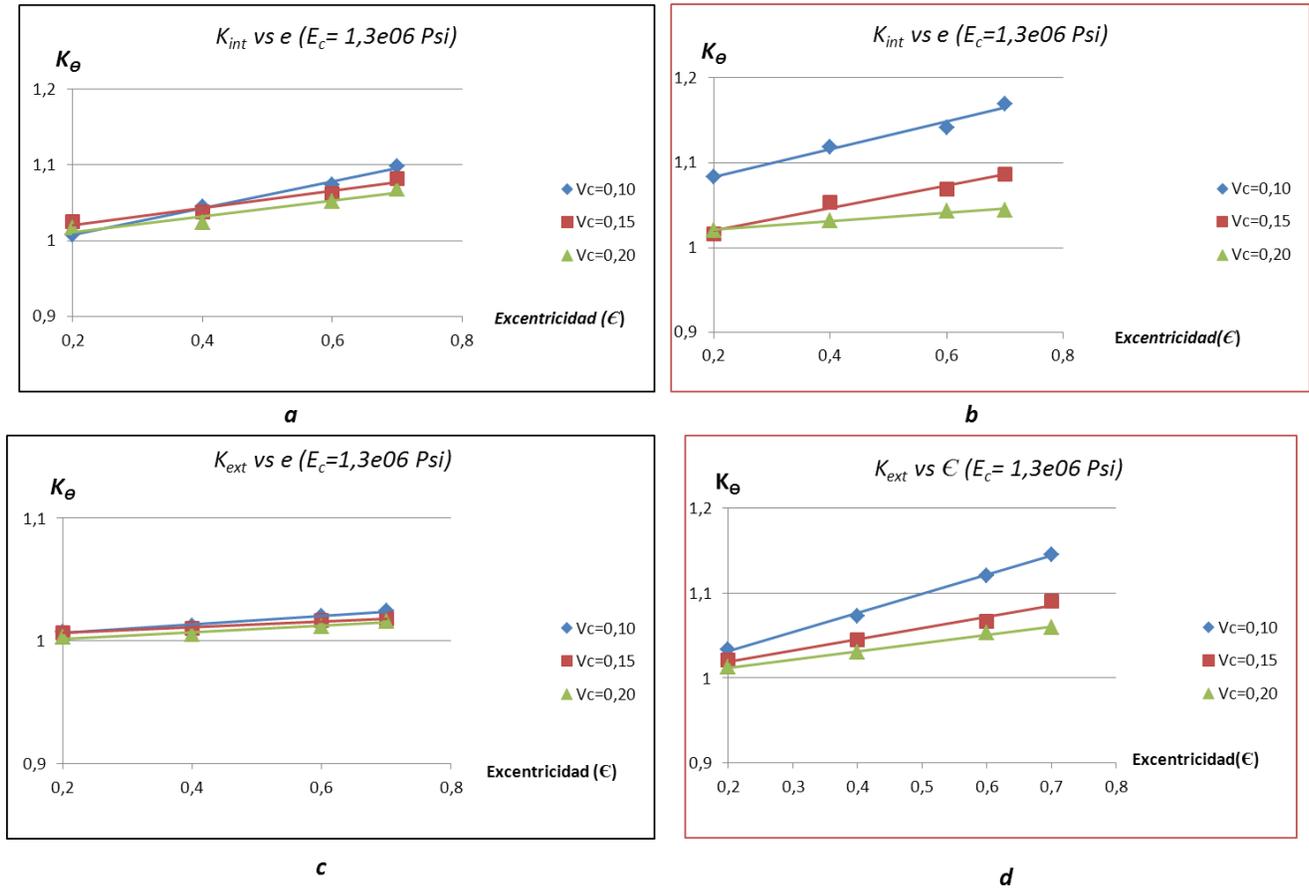


Fig. 60 Componente Tangencial del factor de concentración de esfuerzos K_{θ} en función del Coeficiente de Poisson del cemento (ν_c), para $E_c = 1,310^6$ Psi tomando en cuenta los dos estratos de arena en la formación (estrato 1, estrato 2). *a* y *b* están asociadas a el anillo interno del cemento *c* y *d* al anillo externo del cemento

Bibliografía

[1] AKGUN, F., DHABI, A., SHEDID, A: “Simulation investigation of casing eccentricity estimation for different inclination angles and tensile forces using finite element method “, págs. 1-15, Society of Petroleum Engineers, Numero 91811, Conferencia Internacional SPE, México, Noviembre, 2004.

[2] BERGER, A., FLECKESTEIN, W.W., EUSTES, A.W: “Effect of Eccentricity, Voids, Cement Channels, and Pore Pressure decline on collapse Resistance of Casing” págs. 1-8, Society of Petroleum Engineers, Numero 90045, Conferencia técnica anual y exhibición SPE, Houston- Texas, 26-29 de Septiembre de 2004.

[3] OZBAYOGLU, M.E., OMURLU, C: “Analysis of the Effect of Eccentricity on Flow Characteristics of Annular Flow of Non-Newtonian Fluids using Finite Element Method”, págs. 1-6, Society of Petroleum Engineers, Número 100147, Conferencia SPE/ICOTA, Texas- USA, Abril, 2006.

[4] SINGH, A., ROBELLO, S: “Effect of Eccentricity and rotation on Annular Frictional Pressure losses with Standoff Devices”, págs.1-12, Society of Petroleum Engineers, Número 124190, Conferencia y Exhibición annual SPE, Louisiana-USA, Octubre, 2009.

[5] SALEHABADI, M., YANG, J., AHMED, R: “The Effect of Casing Eccentricity on the Casing stability Analysis of a Wellbore Drilled in Gas Hydrate Bearing Sediments” págs. 1-15, Society of Petroleum Engineers, Número 131236, Conferencia y Exhibición anual SPE EUROPEC/EAGE, Barcelona- España, Junio, 2010.

[6] RAHMAN, S.S., CHILINGARIAN, G.V: Casing Design, Theory and Practice, Holanda, Elsevier Science B.V, 1995, 271 págs.

Bibliografía

- [7] NELSON, E.B., GUILLOT, D: Well Cementing, Cuarta Edición, Elsevier Science, 2006, 773 págs.
- [8] Cementación de pozos, Centro Internacional de Educación y desarrollo (CIED-PDVSA), Número 324003, Maracaibo-Venezuela, Abril, 1997.
- [9] MARTIN H, Sadd: Elasticity (Theory Applications, and Numeric), Wheeler Road, Burlington, USA, Elsevier- Butterworth-Heinemann, 2005, 473 págs.
- [10] JAEGER, J.C., COOK, N.G.W., ZIMMERMAN, R.W: Fundamentals of Rock Mechanics, Cuarta Edición, Blackwell Publishing LTD, 2007, 489 págs.
- [11] PILKEY, Walter D: Stress Concentration Factors, Tercera Edición, Wiley-Interscience Publication, 2008, 458 págs.
- [12] FERDINAND, P. Beer., JOHNSTON, E. Russel: Mecánica de Materiales, Segunda Edición, McGraw-Hill, Santa Marta-Colombia, 2001, 738 págs.
- [13] LADVA, H.K.J., CRASTER, B., JONES, T.G.J., GOLDSMITH, G., SCOTT, D: “The Cement to Formation in zonal Isolation”, págs. 1-14, IADC/SPE, Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Kuala- Malasya, Septiembre, 2004.
- [14] CARTER, L.G., EVANS, G.W: “A Study of Cement- Pipe Bonding”, págs 1-5 Halliburton Co, Duncan Okla, SPE, Número 164.
- [15] BOIS, A.P., CURIS, A., GARNIER, A., SAINT-MARC, J., AIMARD, N: “How to Prevent loss of zonal Isolation through a Comprehensive Analysis of Micro-Annulus

Bibliografía

Formation”, págs. 1-[16] Society of Petroleum Engineers, Número 124719, Annual Technical Conference and Exhibition held, Louisiana- USA, Octubre, 2009.

[17] TIRUPATHI, Chandrupatla., ASHOKD, Belegundu: Introducción al Estudio del Elemento Finito en Ingeniería, Segunda Edición, Pearson, Prentice- Hall, México, 1999, 480 págs.

[18] JOUGLARD, Claudio: Introducción al Método de Elementos Finitos (Formulación Variacional de Elementos Finitos), Curso de Especialización UTN-Buenos Aires, 2002, 23 págs.

[19] HUEBNER, K., DERWHIRST, D., SMITH, D., BYROM, T: The Finite Element Method for Engineers, Cuarta Edición, John Wiley & Sons, Canada, 2001, 650 págs.

[20] SANTANDER, M: Introducción al Calculo Variacional, Departamento de Física Teórica, Universidad de Valladolid, Tercera Versión, Febrero, 2003.

[21] LIU, G.R. QUEK, S.S: The Finite Element Method (A Practical Course), Butterworth-Heinemann, 2003, 365 págs.

[22] THIERCELIN, M.J., DARGAUD, B., BARET, J.F., RODRÍGUEZ, W.J: “Cement Design Based on Cement Mechanical Response” págs. 1-8, SPE/INTEVEP, 1998.

[23] TIMOSHENKO, S., GOODIER, J.N: Theory of Elasticity, Segunda Edición, McGraw-Hill, Book- Company Inc., 1951, 162 págs.

[24] PINEDA, Geralf., PARRA, Oslando., SARCOS, Luis., BASTOS, Vanesa., SALAZAR, Abraham., JIMENEZ, Wailmen., FARIAS, Claudia., FUENMAYOR, Néstor.,

Bibliografía

SÁNCHEZ, Félix: “Evaluación del comportamiento Mecánico de Lechadas antimigratorias utilizadas en los hoyos de producción de pozos del Área 2 del Campo Ceuta, Lago de Maracaibo- Venezuela” págs. 2-13, PDVSA-INTEVEP/PDVSA-OCCIDENTE, 2011.

[25] Abaqus, “Getting Started with ABAQUS”, Version 6.7, Interactive Edition, SIMULIA Dassault Systems, 2007.