


	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2

Neiva, 16 de junio del 2016

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Daniel Eduardo Córdoba Medina, con C.C. No. 1075273183,

Carlos Mauricio Rodríguez González, con C.C. No. 1075266831,

_____, con C.C. No. _____,

_____, con C.C. No. _____,

autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o _____

titulado Análisis técnico de las operaciones de abandono de pozos rigless desarrolladas en el campo

Caño Limón

presentado y aprobado en el año 2016 como requisito para optar al título de

Ingeniero de Petróleos _____;

autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.

• Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

CARTA DE AUTORIZACIÓN



CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Carlos Mauricio Rodríguez González

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Daniel Eduardo Córdoba Medina





Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS				  		
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 4

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Análisis Técnico De Las Operaciones De Abandono De Pozos Rigless Desarrolladas En El Campo Caño Limón.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
-Córdoba Medina	-Daniel Eduardo
-Rodríguez González	-Carlos Mauricio

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Director: -Parra Niño	Sergio Andrés
Codirector -Vargas Castellanos	Constanza





ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero de petróleos

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería de Petróleos

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 4

CIUDAD: Neiva – Huila AÑO DE PRESENTACIÓN: 2016 NÚMERO DE PÁGINAS: 95

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas_X_ Fotografías_X_ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general_X_
 Grabados___ Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___
 Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas o Cuadros_X_

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:





MATERIAL ANEXO:

ANEXO 1: diseño y operación de abandono de pozos rigless con el método CIBP.
 ANEXO 2: pronunciamiento del Minminas respecto a la normatividad de abandonos vigente en Colombia.
 ANEXO 3: carta de interpretación de registros CBL de Halliburton.
 ANEXO 4: futuros estudios.

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

	Inglés	Español		Inglés	Español
1	Plug and abandon	Operación de abandono	6		
2	Caño Limón	Caño Limón	7		
3	Methodology	Metodología	8		
4	Technical Analysis	Análisis técnico	9		
5	API	API	10		

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 4

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

La empresa operadora del campo Caño Limón debió interrumpir las operaciones de abandono de pozos debido a discrepancias en lo concerniente al procedimiento empleado para realizar dichas operaciones en el campo, con el representante del ente regulador de la actividad petrolera en Colombia. Partiendo de este punto, se desarrolló un análisis técnico inicial de las operaciones de abandono desarrolladas en Caño Limón tomando como base documentos técnicos del API y la normatividad nacional existente; debido a la ambigüedad de los criterios técnicos, o a la inexistencia de los mismos, se planteó una metodología de diseño de abandono de pozos que buscara conjugar tres aspectos fundamentales dentro del desarrollo de estas operaciones: la protección medioambiental como objetivo principal del abandono de pozos, la factibilidad operativa y la viabilidad económica de estas operaciones, todo esto soportado en criterios técnicos que buscaron determinar cuáles debían ser las características de un tapón para aislar longeva y efectivamente los fluidos de yacimiento; en base a esta metodología propuesta, se procedió con el análisis de las operaciones de abandono de pozos realizadas en Caño Limón y se realizaron distintas recomendaciones operativas.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Operator company of Caño Limón field had to interrupt the plug and abandon operations due to disagreements about operational procedures with the Colombian regulator agency representative. An initial technical analysis of the plug and abandon operations developed in Caño Limón was conducted based on API technical documents and national legislation. Due to the ambiguous technical criteria, or the inexistence of it, a methodology for the design of plug and abandon operations had to be proposed, willing to combine the next three scopes: environmental protection as the primal objective of plug and abandon operations, operational feasibility and economic viability. The methodology proposed was based on technical criteria intended to establish the plug's characteristics which could isolate in an effectively and durable way the reservoir fluids. Once this methodology was set, an analysis of the plug and abandon operations developed in Caño Limón field was conducted and several recommendations were proposed.



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

4 de 4

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: Luis Fernando Bonilla

Firma:

Nombre Jurado: Luis Humberto Orduz

Firma:



Universidad Surcolombiana

**ANÁLISIS TÉCNICO DE LAS OPERACIONES DE ABANDONO DE POZOS
RIGLESS DESARROLLADAS EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN**

**DANIEL EDUARDO CÓRDOBA MEDINA
CARLOS MAURICIO RODRÍGUEZ GONZÁLEZ**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS
NEIVA – HUILA
2016**



Universidad Surcolombiana

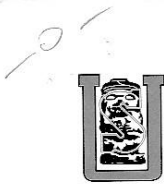
**ANÁLISIS TÉCNICO DE LAS OPERACIONES DE ABANDONO DE POZOS
RIGLESS DESARROLLADAS EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN**

**DANIEL EDUARDO CÓRDOBA MEDINA
CARLOS MAURICIO RODRÍGUEZ GONZÁLEZ**

**Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar por el
título de Ingeniero de Petróleos.**

**Director:
ING. SERGIO ANDRES PARRA NIÑO
Codirector:
ING. CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS
NEIVA – HUILA
2016**



Universidad Surcolombiana
Nit. 891.180.084-2



Neiva 16 de junio de 2016.

Señores
COMITÉ DE CURRÍCULO
Programa de Ingeniería de Petróleos
Presente.

Cordial saludo.

De conformidad con el Artículo 18 del Acuerdo No. 015 de 1998, le informo a Ustedes, que el día 31 de mayo de 2016, se llevó a cabo la sustentación pública del Proyecto de Grado "ANÁLISIS TÉCNICO DE LAS OPERACIONES DE ABANDONO DE POZOS RIGLESS DESARROLLADOS EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN." Presentado por los estudiantes Daniel Eduardo Córdoba Medina Cód. 2010193007 y Carlos Mauricio Rodríguez González Cód. 2010193994.

Las evaluaciones individuales presentadas por los jurados se anexan al presente informe y fueron las siguientes:

LUIS H. ORDUZ P.	APROBADO
FERNANDO BONILLA C.	APROBADO

Por tal motivo la nota final es APROBATORIA.

En consecuencia los estudiantes mencionados cumplieron con el requisito de Grado y por lo tanto pueden solicitar el Grado de Ingenieros de Petróleos de conformidad con lo establecido en el Artículo 65 del Manual de Convivencia.

Atentamente.

JORGE ORLANDO MAYORGA BAUTISTA
Coordinador Comité Proyectos de Grado.
Programa Ingeniería de Petróleos.

AV. Pastrana Borrero - Cra 1a. PBX: 8754753 FAX: 8758890 - 8759124
Edificio Administrativo Cra. 5 No. 23 - 40 PBX: 8753686
Línea Gratuita Nacional: 018000968722
www.usco.edu.co Neiva - Huila

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE GRADO

TÍTULO DEL PROYECTO O PASANTÍA

Análisis Técnico De Las Operaciones de Abandono de Pozos
Riskless Desarrolladas en el Campo Caño Limón

NOMBRE(S), CÓDIGO(S) DEL(OS) AUTOR(ES)

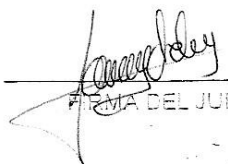
Daniel Eduardo Córdoba Medina 2010193007
Carlos Mauricio Rodríguez González 2010193994

NOMBRE DEL JURADO

Luis Humberto Orduz

Instrucciones: La calificación otorgada se basará en el anteproyecto aprobado, el documento escrito y la sustentación pública. Evalúe cada criterio utilizando la siguiente escala, I = Insuficiente, A = Aceptable, B = Bueno y E = Excelente. La calificación final será APROBADO ó REPROBADO.

CRITERIO	CALIFICACIÓN
1. METODOLOGÍA.....	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> E
2. PRESENTACIÓN.....	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/> E
3. ORIGINALIDAD Y CONCEPTUALIZACIÓN CIENTÍFICA Y/O TECNOLÓGICA EN EL TEMA.....	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> E
4. CAPACIDAD ANALÍTICA Y CREATIVA.....	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/> E
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> E
6. SUSTENTACIÓN PÚBLICA DEL TRABAJO.....	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> E
CALIFICACIÓN FINAL:	APROBADO <input checked="" type="checkbox"/> REPROBADO <input type="checkbox"/> R


FIRMA DEL JURADO

31-Mayo-2016
FECHA

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE GRADO

TÍTULO DEL PROYECTO O PASANTÍA

Análisis Técnico de las Operaciones de Abandono de Pozos Rigless Desarrolladas en el Campo Caño Limón

NOMBRE(S), CÓDIGO(S) DEL(OS) AUTOR(ES)

Daniel Eduardo Córdoba Medina 2010193007
Carlos Mauricio Rodríguez González 2010193094

NOMBRE DEL JURADO

Luis Fernando Bonilla

Instrucciones: La calificación otorgada se basará en el anteproyecto aprobado e documento escrito y la sustentación pública. Evalúe cada criterio utilizando la siguiente escala, I = Insuficiente, A = Aceptable, B = Bueno y E = Excelente. La calificación final será APROBADO o REPROBADO.

CRITERIO	CALIFICACIÓN
1. METODOLOGÍA.....	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> E
2. PRESENTACIÓN.....	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> E
3. ORIGINALIDAD Y CONCEPTUALIZACIÓN CIENTÍFICA Y/O TECNOLÓGICA EN EL TEMA.....	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> E
4. CAPACIDAD ANALÍTICA Y CREATIVA.....	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> E
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> E
6. SUSTENTACIÓN PÚBLICA DEL TRABAJO.....	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/> E
CALIFICACIÓN FINAL :	APROBADO <input checked="" type="checkbox"/> REPROBADO <input type="checkbox"/>

[Handwritten Signature]

Mayo 31/16

FIRMA DEL JURADO
FECHA

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios nuestro creador y en segunda instancia a mi hijo Juan Alejandro Rodríguez Urueña q.e.p.d, sin cuya inspiración seguramente no hubiera podido adelantar satisfactoriamente este proyecto, o al menos no este momento.

También les dedico este trabajo a mis padres Mauricio Rodríguez y Rosa González que siempre me apoyaron durante el proceso que desencadena en este proyecto de grado. Finalmente a mi esposa Alejandra Urueña quien siempre se las arregla para sacar lo mejor de mí en los momentos en los que más lo necesito.

CARLOS MAURICIO RODRIGUEZ GONZALEZ

A Dios, quien todo lo puede, a mi hermana Natalia y a mis papas Eduardo y Edilce, por su constante apoyo durante mi desarrollo profesional. A aquellas personas que siempre me apoyaron y creyeron en mí.

DANIEL EDUARDO CORDOBA MEDINA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mi familia, a mi mamá Rosa María González, a mi papá Mauricio Rodríguez, a mi hermanita Sarah Daniela Rodríguez, a mi esposa María Alejandra Urueña y a mi hijo Juan Alejandro Rodríguez. Ellos me inspiraron para realizar este documento durante las diferentes etapas que tomo desarrollarlo. También agradezco a Dios por permitir llegar a esta estancia definitiva en mi vida.

CARLOS MAURICIO RODRIGUEZ GONZALEZ

Agradezco profundamente a mi familia, a mi hermana Natalia Córdoba, a mis papas Eduardo Córdoba y Edilce Medina, quienes me apoyaron constantemente. Agradezco a mi amigo Kheppler González, quien siempre me apoyo y me brindo su consejo. Un especial agradecimiento a mi compañero y amigo Carlos Rodríguez, ya que esta cruzada no fue fácil para ninguno de los dos, pero nunca desistimos, a su esposa Alejandra Urueña, por apoyarnos durante todo este proceso y no dejarnos desfallecer. Finalmente quiero agradecerles a Sergio Parra y a Constanza Vargas, por permitirnos realizar este trabajo, guiarnos durante su desarrollo y darnos sus consejos.

DANIEL EDUARDO CORDOBA MEDINA

TABLA DE CONTENIDO

1. PRELIMINARES.....	23
1.1. PROBLEMÁTICA.....	23
1.2. CONSULTA MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA DE COLOMBIA	24
1.3. BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ABANDONO DE POZOS RIGLESS.....	24
2. CONCEPTOS DE ABANDONO DE POZOS -P&A-	26
2.1. DEFINICIÓN DE ABANDONO DE POZOS -P&A-.....	26
2.2. OBJETIVOS DEL ABANDONO DE POZOS -P&A-	26
2.3. MÉTODOS DE ABANDONO DE POZOS -P&A-	26
2.3.1. Método del tapón balanceado (Balanced Plug Method).....	27
2.3.2. Método del cemento forzado (Cement Squeeze Method)	27
2.3.3. Tapones mecánicos (Mechanical Plugs).....	27
2.3.4. Método del Dump Bailer (Dump Bailer Method)	28
2.4. MÉTODOS COMBINADOS DE ABANDONO DE POZOS -P&A-.....	28
2.4.1. Método CIBP (Cast Iron Bridge Plug Method).....	28
2.4.2. Método CR (Cement Retainer Method).....	28
2.5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ABANDONO DE POZOS -P&A-..	29
2.5.1. Aislamiento de pozos completados <i>Open Hole</i>	29
2.5.2. Aislamiento pozos sin revestimiento	30
2.5.3. Aislamiento de pozos revestidos	31
2.5.3.1. Aislamiento de intervalos perforados.....	31
2.5.3.2. Aislamiento de Casing Stubs	34
2.5.3.3. Aislamiento de secciones con cemento tras el revestimiento	36
2.5.3.4. Aislamiento de secciones sin cemento tras el revestimiento	37
2.5.3.5. Aislamiento de acuíferos de agua dulce	39
2.5.3.6. Tapones de superficie	39
2.6. VERIFICACIÓN DE LA UBICACIÓN Y ESTADO DE LOS TAPONES Y REVESTIMIENTO	39
2.6.1. Verificación de la profundidad de asentamiento del tapón	40

2.6.2.	Pruebas de presión para los tapones.....	41
2.6.3.	Calibración del revestimiento	41
2.7.	SITUACIONES ESPECIALES	42
2.7.1.	Taponamiento de pozos sin revestimiento de superficie.....	42
2.7.2.	Completamientos con liner ranurado o gravel pack	42
2.8.	MATERIALES DE LAS BARRERAS DE ABANDONO	42
2.8.1.	Cementos.....	42
2.8.1.1.	Aditivos Para Cementos	44
2.8.2.	Resinas	45
2.8.3.	Cast iron.....	46
2.8.3.1.	Tipos de Cast Iron	46
2.8.4.	Elastómeros	49
2.9.	BARRERAS DE ABANDONO.....	50
2.9.1.	Barreras de control de pozos vs barreras para abandono de pozos - P&A- 50	
2.9.1.1.	Características.....	50
2.9.1.2.	Posicionamiento	52
2.10.	TIPOS DE ABANDONO.....	52
2.10.1.	Rig.....	52
2.10.2.	Rigless	54
2.10.2.1.	Unidades de Wireline.....	54
2.10.2.2.	Unidades de Coiled Tubing.....	56
2.10.2.3.	Rapid Service Units (RSU's).....	57
3.	DISEÑO DE ABANDONO DE POZOS -P&A-	58
3.1.	CONSIDERACIONES DE DISEÑO	58
3.1.1.	Consideraciones ambientales	59
3.1.2.	Consideraciones operativas	59
3.1.3.	Consideraciones económicas	60
3.2.	POTENCIAL DE MIGRACIÓN DE FLUIDOS	60
3.2.1.	Formación presurizada.....	60

3.3. FACTORES QUE AFECTAN EL DISEÑO DE LAS OPERACIONES DE ABANDONO DE POZOS -P&A-	61
3.3.1. Construcción del pozo	61
3.3.2. Prácticas de abandono	62
3.3.3. Condiciones naturales	62
3.4. OBJETIVO DEL DISEÑO	63
3.5. CRITERIOS DE DISEÑO	64
3.5.1. Propiedades de interés en barreras mecánicas	65
3.5.1.1. Material de construcción	65
3.5.1.2. Resistencia a diferenciales de presión	65
3.5.1.3. Elemento de sello (elastómero)	65
3.5.2. Propiedades de interés en lodos de abandono	66
3.5.2.1. Peso del lodo	66
3.5.2.2. Control de corrosión	66
3.5.3. Propiedades de interés en tapones de Cemento / Resina	67
3.5.3.1. Permeabilidad	67
3.5.3.2. Resistencia compresiva	67
3.5.3.3. Shear Bond Strength (SBS)	67
3.5.3.4. Shrinkage (Encogimiento)	70
4. ANÁLISIS DE LAS OPERACIONES DE ABANDONO DE POZOS -P&A- DESARROLLADAS EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN	71
4.1. TÉCNICA DE ABANDONO IMPLEMENTADA	71
4.2. BARRERAS MECÁNICAS	72
4.2.1. Material de construcción	74
4.2.2. Resistencia a diferenciales de presión	74
4.2.3. Desempeño del elemento de sello (elastómero)	74
4.3. LODO DE ABANDONO	75
4.3.1. Peso del lodo	75
4.3.2. Control de corrosión	76
4.4. TAPONES DE CEMENTO / RESINA	76
4.4.1. Permeabilidad	77

4.4.2.	Resistencia Compresiva.....	77
4.4.3.	Shear Bond Strength (SBS)	77
4.4.4.	Shear Bond Approach	78
4.4.5.	Shrinkage (Encogimiento)	79
5.	RECOMENDACIONES OPERATIVAS	80
5.1.	FORMULACIÓN MEJORADA DE LECHADAS DE CEMENTO PARA OPERACIONES DE ABANDONO DE POZOS -P&A-	80
5.2.	USO DE RESINAS EN OPERACIONES ABANDONO DE POZOS -P&A- 82	
5.3.	RECOMENDACIONES OPERACIONALES	83
5.3.1.	Tapón mecánico.....	83
5.3.2.	Tapón de cemento / resina.....	83
5.3.3.	Lodo de abandono	84
5.3.4.	Herramientas, equipos y unidades de superficie.....	84
5.3.5.	Operación de abandono.....	85
6.	CONCLUSIONES.....	86
7.	RECOMENDACIONES	88
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación API para cementos.....	43
Tabla 2: Especificaciones API para cementos	44
Tabla 3: Barreras de abandono, función y propósito.....	51
Tabla 4: Propiedades de interés para el diseño de los elementos involucrados en una operación de abandono	64
Tabla 5: Propiedades de yacimiento y fluido de Caño Limón.....	73
Tabla 6: Propiedades de interés del cemento Portland clase G.....	76
Tabla 7: Calculo del Cement Contact Height (CCH) para cada formulación de cemento objeto de estudio	78
Tabla 8: Composición de la lechada de cemento aditivada objeto de estudio	80
Tabla 9: Propiedades de interés de la lechada de cemento aditivada objeto de estudio	81
Tabla 10: Propiedades de interés del sistema cemento/resina objeto de estudio ..	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema general de un tapón mecánico tipo Bridge Plug.	28
Figura 2: Método del tapón balanceado.....	29
Figura 3: Método CR.....	30
Figura 4: Aislamiento de pozos sin revestimiento.	31
Figura 5: Aislamiento de intervalos perforados - Método del tapón balanceado...32	
Figura 6: Aislamiento de intervalos perforados - Bullhead Squeeze y Brandenhead Squeeze.....	33
Figura 7: Aislamiento de intervalos perforados - Método CIBP.....	34
Figura 8: Aislamiento de Casing Stubs - Método del tapón balanceado.....	35
Figura 9: Aislamiento de Casing Stubs - Método CIBP.....	35
Figura 10: Aislamiento de Casing Stubs - Método del cemento forzado.....	36
Figura 11: Extensión transversal de una barrera de abandono.	51
Figura 12: Esquema general de un taladro de intervención de pozos convencional.	53
Figura 13: Consideraciones generales del diseño de un abandono de pozos.	59
Figura 14: Factores que afectan el diseño de un abandono de pozos y su incidencia.....	63
Figura 15: Relación entre el Shear Bond Strength y la longitud del contacto cemento-acero para modelos de pequeña escala.	68
Figura 16: Relación entre el Shear Bond Strength y la longitud del contacto cemento-acero para modelos de gran escala.	69
Figura 17: Segregación de fluidos durante el asentamiento de un tapón balanceado.	72

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1: Impacto ambiental de un pozo mal abandonado debido a la ausencia de cemento detrás del revestimiento (1).....	37
Imagen 2: Impacto ambiental de un pozo mal abandonado debido a la ausencia de cemento detrás del revestimiento (2).....	38
Imagen 3: Unidad de E-Line.....	54
Imagen 4: Corte transversal de un cable eléctrico de unidades de E-Line	55
Imagen 5: Cable de acero de unidades de SlickLine	56
Imagen 6: Unidad de Coiled Tubing.....	57
Imagen 7: Unidad RSU	57

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: DISEÑO Y OPERACIÓN DE ABANDONO DE POZOS RIGLESS CON EL MÉTODO CIBP.

ANEXO 2: PRONUNCIAMIENTO DEL MINMINAS RESPECTO A LA NORMATIVIDAD DE ABANDONOS VIGENTE EN COLOMBIA.

ANEXO 3: CARTA DE INTERPRETACIÓN DE REGISTROS CBL DE HALLIBURTON.

ANEXO 4: FUTUROS ESTUDIOS.

GLOSARIO

American Petroleum Institute (API): Instituto americano del petróleo. Es una asociación fundada en 1919 con oficinas en Washington DC, USA. El API es patrocinado por la industria del petróleo y gas y es reconocido a nivel mundial. Dentro de sus muchas labores esta la elaboración de estándares que describen muchos procesos involucrados en la industria del petróleo y gas.

Basic Sediment and Water (BS&W): Es un término técnico que se refiere a la cantidad de agua y sedimentos que van inmersos en el crudo al estar asociados al mismo desde el yacimiento.

Blow Out Preventer (BOP): Juego de válvulas sobre la cabeza del pozo que pueden cerrarse si la cuadrilla de perforación pierde el control de los fluidos de perforación. Al cerrar estas válvulas, la cuadrilla suele recuperar el control de los fluidos de perforación, y pueden proceder a incrementar el peso del lodo hasta poder abrir la BOP y retener el control de la presión de formación.

Borehole: Hueco hecho al perforar un pozo. Cuando el pozo es revestido, el Borehole es el espacio anular entre el revestimiento y la formación.

Bradenhead Squeeze: Proceso en el cual se aplica presión hidráulica al revestimiento o tubería, para forzar fluidos como cemento fuera del wellbore. Los retornos por el espacio anular se previenen al cerrar las válvulas de los cabezales de revestimiento. Durante la operación no se instalan empaques, por lo que la pared interna del revestimiento se ve expuesta a la presión de bombeo.

Bridge Plug: Es una herramienta de fondo compuesta principalmente por uno o varios juegos de cuñas, un armazón y un elemento sellante de caucho; este elemento se instala en el revestimiento para aislar una zona debajo del mismo, mientras la sección superior es probada, cementada, estimulada, producida o inyectada.

Bullhead Squeeze: Proceso en el cual se aplica presión hidráulica al revestimiento o tubería, para forzar fluidos como cemento fuera del wellbore. Los retornos por el espacio anular se previenen al asentar un empaque en el revestimiento justo sobre la zona de interés. El empaque protege al revestimiento encima de él de la presión de bombeo durante la operación.

Cake: Es el residuo depositado sobre un medio permeable cuando un fluido como el lodo de perforación, es forzado contra el medio bajo presión.

Casing: Tubería de diámetro grande que se baja a una sección de hueco abierto y se asienta en su lugar usando cemento. Esta tubería es el mayor componente

estructural del pozo y cumple funciones como prevenir la formación de cavernas en las paredes del hueco, aislar las diferentes formaciones, prevenir el crossflow, y proveer un medio de control de las presiones de formación en el pozo.

Cast Iron Bridge plug (CIBP): Véase Bridge Plug.

Cement Retainer (CR): Es una herramienta que se asienta en el revestimiento que permite el flujo de cemento u otros fluidos a través del mismo, pero evita cualquier movimiento de fluidos en sentido contrario una vez se retira la tubería usada durante la operación.

Coiled Tubing: Es una tubería continua de acero dúctil que suele tener un diámetro pequeño (1"-1 3/4") y que se enrolla en un carrete. La tubería ingresa al pozo usando una cabeza inyectora conectada al sistema de preventoras de la unidad de Coiled Tubing. El Coiled Tubing puede usarse para bombear toda una gama de fluidos, incluido el cemento, dentro del pozo.

Crossflow: Flujo de fluidos de yacimiento desde una zona a otra debido a un diferencial de presión entre intervalos.

Drillpipe: Tubo de acero con extremos especiales llamados juntas. El drillpipe conecta el equipo de perforación en la superficie con el ensamblaje de fondo y la broca.

Dump Bailer: Es un contenedor cilíndrico con un dispositivo de ruptura activado eléctricamente o por impacto, que se usa para liberar pequeños baches de cemento en fondo de pozo. Usado principalmente para instalar cemento sobre herramientas como Bridge Plugs o Cement Retainers.

Gas Oil Ratio (GOR): Tasa de producción de gas asociada a la producción de petróleo crudo.

Gravel Pack: Método de control de arenas diseñado para prevenir o mitigar la producción de arenas de formación. En la instalación de estos sistemas se ubica una pantalla de acero ranurado frente a perforados y alrededor de este arreglo se instala una matriz de grava de un tamaño específico que evite el paso de la arena.

Healthy Security Environment Quality (HSEQ): Prácticas involucradas con la salud ocupacional, la seguridad industrial, el cuidado del medio ambiente y la calidad de los procesos. En términos generales se trata de aplicar estos protocolos a las actividades desarrolladas en las empresas.

Hydraulic Bond Strength: Libras por pulgada cuadrada de presión hidráulica requerida para comprometer la integridad mecánica de un tapón.

Liner: Es una sarta de revestimiento que no se extiende hasta superficie, sino que se cuelga del interior de una sección de revestimiento previa y se cementa para fijarla de manera adecuada. La longitud de liner dentro de la sección de revestimiento huésped, varía entre 50 a 500 pies, dependiendo del propósito del liner.

Measure Depth (MD): Longitud del wellbore determinada usando el conteo de las secciones de tubería.

Mud weight (MW): Masa por unidad de volumen de un fluido de perforación.

Norsk Søkkel Konkuranseposisjon (NORSOK): Grupo de estándares desarrollados por el centro tecnológico de Noruega.

Open Hole: Porción del pozo sin revestimiento. La mayoría de las secciones del pozo son revestidas, sin embargo algunas no, como secciones horizontales donde no se logra cementar de manera adecuada la tubería.

Operaciones con Wireline: Operaciones desarrolladas en el wellbore usando herramientas que se corren usando guayas simples, trenzadas o eléctricas que suelen ser de diámetro pequeño.

Operaciones Rigless: Intervención de pozo llevada a cabo usando equipos y facilidades que hacen innecesario el uso de un taladro sobre el pozo.

Plug Back Total Depth (PBSD): La nueva ubicación del fondo de pozo establecida tras asentar un tapón.

Pipe tally: Recuento manual del número y longitud de juntas agregadas a la sarta de trabajo o perforación. El incorrecto uso de esta metodología puede derivar en errores en el cálculo de la ubicación en fondo de pozo.

Plug and Abandon (P&A): Ubicar tapones dentro de un pozo, al que no se le encuentra utilidad futura, para de esta manera evitar la migración de fluidos dentro del mismo y proteger acuíferos y a la superficie de contaminación.

Rig: Maquinaria utilizada para perforar el hueco que constituye el pozo. En instalaciones sobre tierra el Rig incluye todas las facilidades excepto dormitorios. Los componentes principales del equipo de perforación incluyen tanques de lodo, bombas de lodo, la torre, malacates, mesa rotaria o top drive, la sarta, el equipo de potencia, y equipo auxiliar.

Rig down: Desarmar un equipo para almacenarlo o transportarlo. Los equipos normalmente deben desconectarse de fuentes de energía, desacoplarse de sistemas de tubería presurizada, desarmarse y moverse fuera de la locación.

Rig up: Alistar para uso, el equipo a utilizar debe montarse sobre la locación destinada para los trabajos incluyendo el armado y conectado de fuentes de energía, o sistemas de tubería presurizada.

Slickline: Delgado cable no eléctrico usado para ubicar y retirar de manera selectiva herramientas de fondo como tapones, empaques, válvulas, mangas, etc.

Society of Petroleum Engineers (SPE): Es una organización profesional sin ánimo de lucro cuya misión es recolectar, diseminar e intercambiar conocimiento técnico concerniente a la exploración, desarrollo y producción de gas y aceite; Así mismo busca compartir tecnologías relacionadas con dichos procesos para el beneficio público y para proveer la oportunidad a profesionales de mejorar sus competencias técnicas y profesionales.

Squeeze: Bombear una lechada de cemento en un punto específico del pozo a presión suficiente para forzar el cemento dentro de dicho punto.

Stand by: Permanecer en locación sin realizar actividad alguna, pero disponibles para iniciar operaciones de manera inmediata.

Swabbing: Descarga de la columna de fluidos en el pozo al mover la tubería dentro de este en forma ascendente, con el fin de inducir un desbalance en las presiones de fondo.

True Vertical Depth (TVD): Distancia vertical desde un punto en el pozo a un punto en superficie que suele ser la mesa rotaria. Es especialmente importante en la determinación de las presiones de fondo.

Tubing: Tubería instalada dentro de la sarta de producción extendiéndose desde cabeza de pozo hasta la profundidad de los perforados o encima; a través de esta los fluidos del yacimiento son transportados a superficie, y los fluidos para estimulación o inyección son enviados a la formación.

Ultrasonic Cement Analyzer (UCA): Método de medición de propiedades del cemento como la resistencia compresiva. Se basa en las lecturas de velocidad de desplazamiento de una onda de sonido a través del cemento para correlacionar dicha lectura en un valor de resistencia compresiva.

Washout: Un espacio anormalmente grande en el interior del pozo. Se asocia a daño de la tubería de revestimiento por corrosión o estreses mecánicos.

Wellbore: La superficie interior del revestimiento o hueco abierto en la cual se llevan a cabo las operaciones de perforación, producción, o inyección.

WellLock: Producto desarrollado por Halliburton que consiste en proporcionar y manejar sistemas compuestos por resina en su totalidad, o cemento y resina.

Yo-yoing: Práctica que involucra subir y bajar en repetidas ocasiones el Dump Bailer buscando asegurar que el contenido dentro del mismo haya sido vertido en el lugar de interés.

RESUMEN

TÍTULO:

ANÁLISIS TÉCNICO DE LAS OPERACIONES DE ABANDONO DE POZOS RIGLESS DESARROLLADAS EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN.

AUTORES:

DANIEL EDUARDO CORDOBA MEDINA
CARLOS MAURICIO RODRIGUEZ GONZALEZ

PALABRAS CLAVE:

Operación de abandono, abandono de pozos, Caño Limón, Metodología, Análisis Técnico, API.

DESCRIPCIÓN:

La empresa operadora del campo Caño Limón debió interrumpir las operaciones de abandono de pozos debido a discrepancias en lo concerniente al procedimiento empleado para realizar dichas operaciones en el campo, con el representante del ente regulador de la actividad petrolera en Colombia. Partiendo de este punto, se desarrolló un análisis técnico inicial de las operaciones de abandono desarrolladas en Caño Limón tomando como base documentos técnicos del API y la normatividad nacional existente; debido a la ambigüedad de los criterios técnicos, o a la inexistencia de los mismos, se planteó una metodología de diseño de abandono de pozos que buscara conjugar tres aspectos fundamentales dentro del desarrollo de estas operaciones: la protección medioambiental como objetivo principal del abandono de pozos, la factibilidad operativa y la viabilidad económica de estas operaciones, todo esto soportado en criterios técnicos que buscaron determinar cuáles debían ser las características de un tapón para aislar longeva y efectivamente los fluidos de yacimiento; en base a esta metodología propuesta, se procedió con el análisis de las operaciones de abandono de pozos realizadas en Caño Limón y se realizaron distintas recomendaciones operativas.

ABSTRACT

TITLE:

TECHNICAL ANALYSIS OF THE RIGLESS PLUG AND ABANDON PROCEDURES DEVELOPED IN CAÑO LIMON FIELD

AUTHORS:

DANIEL EDUARDO CORDOBA MEDINA
CARLOS MAURICIO RODRIGUEZ GONZALEZ

KEYWORDS:

Plug and abandon, Cano Limon, Methodology, Technical Analysis, API.

DESCRIPTION:

Operator company of Caño Limón field had to interrupt the plug and abandon operations due to disagreements about operational procedures with the Colombian regulator agency representative. An initial technical analysis of the plug and abandon operations developed in Caño Limón was conducted based on API technical documents and national legislation. Due to the ambiguous technical criteria, or the inexistence of it, a methodology for the design of plug and abandon operations had to be proposed, willing to combine the next three scopes: environmental protection as the primal objective of plug and abandon operations, operational feasibility and economic viability. The methodology proposed was based on technical criteria intended to establish the plug's characteristics which could isolate in an effectively and durable way the reservoir fluids. Once this methodology was set, an analysis of the plug and abandon operations developed in Caño Limón field was conducted and several recommendations were proposed.

1. PRELIMINARES

El inicio de la industria petrolera en el mundo se remonta a casi ya 200 años, periodo durante el cual hasta ahora no se había experimentado una así denominada “era del abandono”. Muchos de los grandes campos que en el pasado alimentaban las arcas de las grandes economías mundiales, entraron en un avanzado depletamiento que pone en entredicho la posibilidad de invertir enormes cantidades de dinero para reactivarlos. Esto sumado a la más reciente crisis del mercado petrolero, ha hecho del proceso de abandono de pozos una necesidad. Los estándares de protección medioambiental alrededor del mundo se hacen cada vez más estrictos conforme la actividad humana continua comprometiendo más y más la integridad del planeta y por lo tanto la industria del petróleo debe mejorar sus prácticas operativas dentro de las que se destaca por su infradesarrollo, el abandono de pozos; si bien en el pasado no era rentable investigar desde un punto de vista científico y no solo operativo, los fenómenos físicos involucrados en este procedimiento, hoy en día es absolutamente necesario.

1.1. PROBLEMÁTICA

En el año 2014 en el campo Caño Limón al nororiente colombiano, se implementó un proyecto piloto de abandonos utilizando una metodología rigless, un método denominado por el documento del instituto americano del petróleo (API) BULL E3 como *CIBP method*, y se realizaron 8 trabajos de manera exitosa; pero debido a discrepancias técnicas respecto a la metodología empleada, el Ministerio de Minas y Energía (MinMinas) invalidó la aplicación del método justificando que la integridad del aislamiento no estaba garantizada a largo plazo, alegando específicamente que la cantidad de cemento utilizada para el abandono no era la adecuada.

Dada la situación, realizar una investigación técnica, detallada y concisa que argumente de manera sólida la metodología implementada, o que evidencie la necesidad de replantearla, es de vital importancia para reanudar las actividades de abandono en el ya mencionado campo. Además, la situación actual de la industria, exige analizar de manera clara y objetiva los factores que intervienen en el diseño de las operaciones de abandono, pues es evidente que cada pozo tiene características que puede ser completamente diferentes, y aplicar la metodología adecuada es fundamental para abandonar pozos de manera eficiente, teniendo siempre como premisa el cuidado del medio ambiente.

1.2. CONSULTA MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA DE COLOMBIA

El MinMinas como ente gubernamental encargado de la administración eficiente de los recursos naturales no renovables, es responsable de la expedición de los reglamentos técnicos que rigen las operaciones y procesos aplicables a la industria de los hidrocarburos en Colombia. Este establece en el artículo 35 de la resolución 18 1495 del 2009 que *“la supervisión y los procedimientos para el taponamiento permanente o temporal de pozos, las pruebas de integridad mecánica que se realicen y las características de los tapones, serán establecidos por el Ministerio de Minas y Energía”*; sin embargo, tras consultar con ellos mediante un oficio radicado No: 2015031631 (ver anexos), acerca de la normativa legal vigente que regula los abandonos en Colombia, el ministerio se pronuncia:

“Le podemos informar que en este momento no hay una norma exclusiva y directa establecida al respecto, por lo tanto, dependiendo del caso, la Resolución 18 1495 de 2009 determina que quien aprueba el abandono de un pozo es este Ministerio o quien haga sus veces, mediante la forma 7 previamente aprobada.

Como consecuencia, el Ministerio de Minas y Energía se acoge a las buenas prácticas de la industria (Art. 6 Res. 18 1495) y para ello recomienda tener en cuenta lo establecido en las publicaciones del AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE especialmente su documento: API BULL E3 (R2000) Well Abandonment and Inactive Well Practices for U.S Exploration and Production Operations, Enviromental Guidance Document”.

Esta respuesta ciertamente plantea interrogantes más que repuestas, y hace fácil ver la falta de información concerniente a los abandonos permanentes de pozos, por lo que se requiere una investigación precisa que permita analizar con un panorama más claro los factores involucrados en un abandono exitoso y así poder determinar la metodología más adecuada para cada caso.

1.3. BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ABANDONO DE POZOS RIGLESS

La metodología rigless para el abandono de pozos es, a rasgos generales, similar a aquella realizada con unidades convencionales, en la cual se desplaza el fluido de yacimiento presente en el pozo de regreso a la formación productora mediante un sobre-balance de la presión hidrostática, remplazándolo por lodo de abandono.

Posteriormente, con la ayuda de una unidad de Wireline, se asienta un tapón mecánico a aproximadamente 40 pies por encima de perforados, sobre el cual se

vierte cemento usando el Dump Bailer con una unidad de Slick Line; de la misma manera se procede para asentar el tapón intermedio a aproximadamente 1200 pies MD y finalmente se balancea un tapón de cemento en superficie.

La variación que un abandono rigless presenta operativamente frente a uno realizado con una unidad convencional se ve reflejada en los equipos de superficie empleados para alcanzar los objetivos del abandono, donde el uso de estos representa el mayor potencial de reducción de costos.

2. CONCEPTOS DE ABANDONO DE POZOS -P&A-

2.1. DEFINICIÓN DE ABANDONO DE POZOS -P&A-

Se puede definir que las operaciones de abandono de pozo son todos aquellos procedimientos encaminados a evitar la migración de fluidos desde los distintos estratos perforados hacia acuíferos, otras formaciones y/o la superficie, o viceversa. Para alcanzar este objetivo es necesario hacer uso de barreras como tapones de cemento, elementos mecánicos, etc., ubicándolas en puntos críticos, diseñadas para garantizar un sello efectivo y que su integridad perdure indefinidamente en el tiempo.

En términos más específicos la operación de abandono es una serie de procesos que deben ejecutarse de manera adecuada cumpliendo diferentes objetivos dependiendo de las particularidades de cada situación, aplicando una metodología que se adapte al problema a resolver y los materiales cuyas características sean las más adecuadas tanto operativa como económicamente.

2.2. OBJETIVOS DEL ABANDONO DE POZOS -P&A-

En las operaciones de abandono es fundamental el análisis y la selección adecuada de la metodología a emplear, conocer las características particulares del pozo, contar con la información histórica adecuada, identificar las limitaciones operacionales y asegurar las condiciones óptimas para la operación.

Sin embargo, el objetivo primario de la operación de abandono de pozos es proteger los acuíferos y confinar las zonas de hidrocarburos, por lo que es necesario cumplir estos cinco objetivos:

1. Proteger acuíferos de contaminación por fluidos de formación o de superficie.
2. Aislar formaciones productivas estén completadas o no.
3. Proteger suelos y zonas hídricas.
4. Aislar zonas de inyección o disposición de fluidos.
5. Minimizar el impacto al área circundante al pozo.

2.3. MÉTODOS DE ABANDONO DE POZOS -P&A-

Estas operaciones suelen empezar en el intervalo productor más profundo en el pozo. Consecutivamente se van aislando las zonas consideradas en el plan de

abandono hasta cumplir los objetivos dispuestos. Esto se logra bien sea usando tapones de cemento, mecánicos, o la combinación de ambos.

2.3.1. Método del tapón balanceado (Balanced Plug Method)

Este método consiste en bombear el cemento a través de la tubería dispuesta para la operación hasta que el nivel del cemento fuera de la tubería se iguale con el bache diseñado en el plan de abandono, en este punto la sarta se saca lentamente para dejar el tapón en su lugar. Se recomienda el uso de espaciadores previos y posteriores al bache de cemento para minimizar la contaminación del mismo. Este método es sencillo y no requiere más que la tubería, una bomba y una unidad mezcladora de cemento.

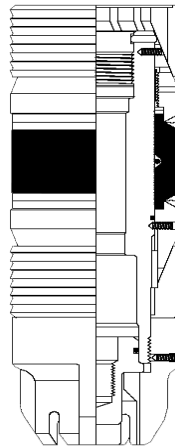
2.3.2. Método del cemento forzado (Cement Squeeze Method)

Este método consiste en bombear la lechada hasta la profundidad requerida, y apoyado con empaques justo debajo y sobre la zona a aislar, aplicar suficiente presión hidráulica para forzar al cemento a deshidratarse justo en los perforados y en cualquier canal de flujo que haya, proveyendo así un revoque (cake) de alta dureza y que supone una barrera para el paso de fluidos. Este método suele emplearse cuando no es posible lograr una condición estática en los fluidos del pozo.

2.3.3. Tapones mecánicos (Mechanical Plugs)

Herramientas mecánicas de aislamiento tales como bridge plugs, retenedores, empaques permanentes con tapones, entre otros, pueden ser usados efectivamente en el casing para aislar secciones del mismo. Estos elementos pueden ser asentados a la profundidad necesaria usando un equipo Wireline, tubería de producción, tubería de trabajo o drillpipe.

Figura 1: Esquema general de un tapón mecánico tipo Bridge Plug



Tomado de: Ficha técnica Bridge Plugs Baker Hughes N-1

2.3.4. Método del Dump Bailer (Dump Bailer Method)

Este elemento con una cantidad determinada de cemento, se baja a la profundidad deseada utilizando un equipo de Wireline. Este se abre mediante el impacto o por activación eléctrica. Normalmente este método es complementario al uso de tapones mecánicos. La principal ventaja de este método es que se puede liberar el cemento con gran precisión a la profundidad deseada, sin embargo la cantidad de cemento es limitada y propensa a contaminarse, se recomienda circular el pozo para disminuir el riesgo de contaminación.

2.4. MÉTODOS COMBINADOS DE ABANDONO DE POZOS -P&A-

2.4.1. Método CIBP (Cast Iron Bridge Plug Method)

Este método combina a los tapones mecánicos junto con una capa de cemento sobre los mismos para proveer un sello secundario, esto en aras de garantizar la integridad y el sello efectivo de cada barrera a ubicar.

2.4.2. Método CR (Cement Retainer Method)

Este método incorpora el uso de elementos mecánicos, una capa de cemento y el forzado de cemento bajo el *Cement Retainer*. En esencia se busca asegurar el

aislamiento al combinar el método del cemento forzado a lo ya indicado en el método CIBP.

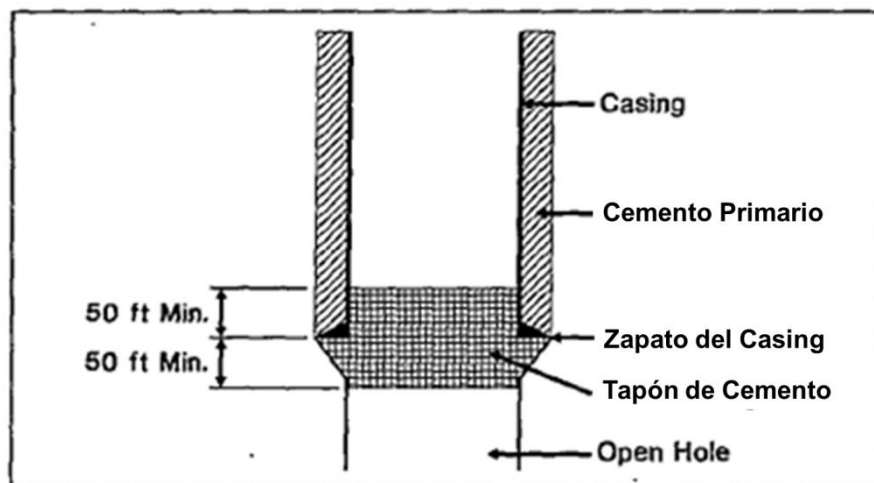
2.5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ABANDONO DE POZOS -P&A-

2.5.1. Aislamiento de pozos completados *Open Hole*

Se recomienda el uso de los siguientes métodos para taponar de forma efectiva completamientos *Open Hole*:

- **Método del tapón balanceado.** Un tapón de cemento balanceado cuya extensión sea de 50 pies por encima y por debajo de la zapata expuesta debería aislar efectivamente la zapata del revestimiento y el *Open Hole*. En caso de que la zona *Open Hole* sea de menos de 50 pies, se recomienda balancear un tapón de 100 pies por encima de la zapata del revestimiento. Dependiendo de las propiedades del yacimiento y la longitud de la zona *Open Hole*, las compañías operadoras podrían preferir balancear un tapon a lo largo de todo el intervalo *Open Hole*. La figura 2 esquematiza la situación descrita.

Figura 2: Método del tapón balanceado

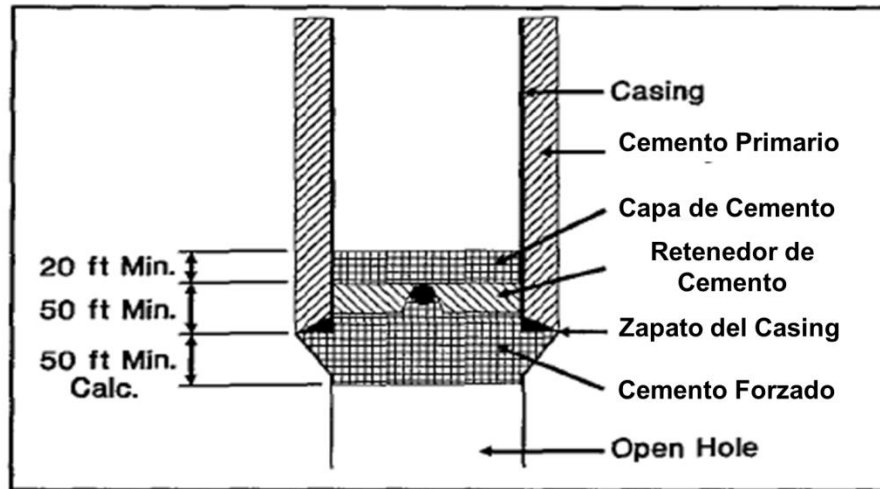


Tomado de: API Bul E3

- **Método CR.** La zapata del revestimiento puede aislarse al asentar un *Cement retainer* entre 50 a 100 pies por encima de la misma, y forzar cemento bajo el retenedor. La cantidad de cemento a usar debe llenar el volumen del revestimiento y del intervalo comprendido desde el retenedor hasta 50 pies por

debajo de la zapata. También se recomienda dejar cemento por encima del retenedor, ver la figura 3.

Figura 3: Método CR



Tomado de: API Bul E3

- **Método CIBP.** Para algunos pozos completados *Open Hole* tales como aquellos en yacimientos en estado de depletamiento, asentar un Bridge Plug a unos 50 o 100 pies por encima de la zapata del revestimiento puede aislar efectivamente el intervalo. Debe usarse una capa de cemento encima del elemento mecánico tal como se recomendó en el método CR.

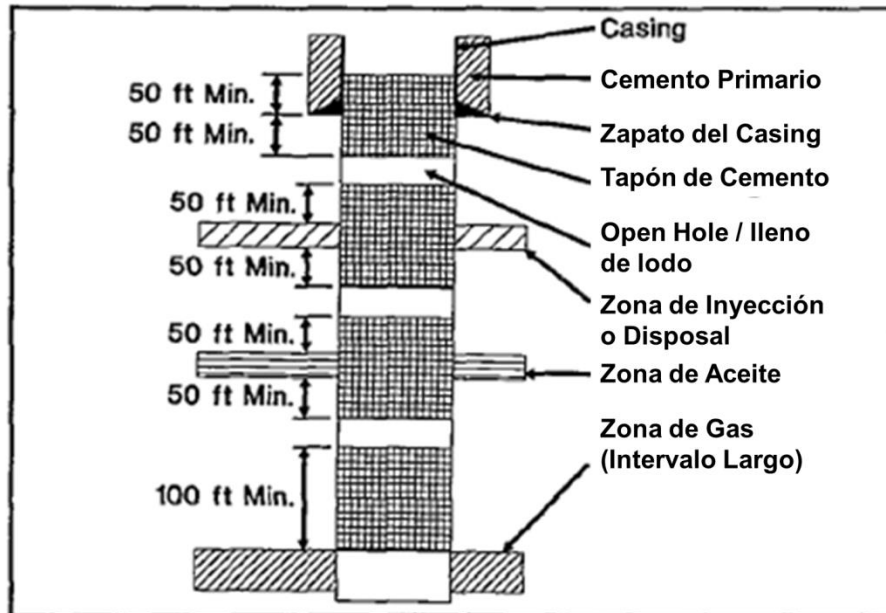
2.5.2. Aislamiento pozos sin revestimiento

Durante la perforación de pozos exploratorios, una proporción de estos son secos; alrededor del mundo es frecuente recuperar las secciones de revestimiento usadas en estas perforaciones, por lo que quedan largos tramos de hueco sin revestir. En estos casos, es necesario determinar si las formaciones atravesadas durante la perforación pueden generar un crossflow que afecte al yacimiento de interés, o afectar el proceso de inyección de un sistema de recobro.

Tras determinar con exactitud la situación, pueden tomarse determinaciones como aislar de manera individual cada formación, o por el contrario, aislar solamente el tope de estas, en caso de múltiples intervalos, además de un tapón justo debajo del nivel freático de la zona en cuestión. Estas determinaciones se hacen en base a realizar el abandono de manera eficiente tanto operativa como económicamente.

Se puede lograr aislar efectivamente estas secciones usando el método del tapón balanceado o el método de forzar cemento indistintamente, la figura 4 explica la situación mencionada.

Figura 4: Aislamiento de pozos sin revestimiento



Tomado de: API Bul E3

2.5.3. Aislamiento de pozos revestidos

Estos métodos buscan prevenir la migración de fluidos a través del revestimiento y a través del espacio anular sin cementar entre secciones del revestimiento.

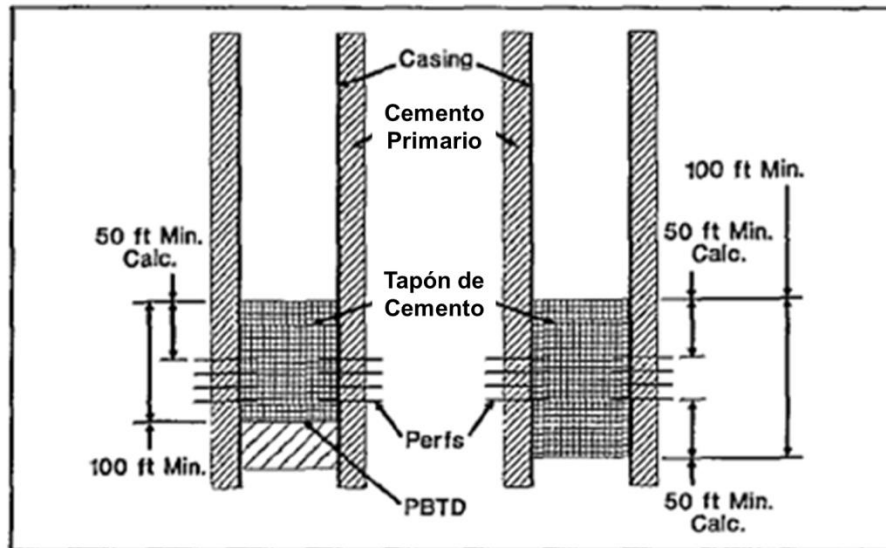
2.5.3.1. Aislamiento de intervalos perforados

El aislamiento de intervalos perforados busca prevenir la migración de fluidos desde zonas de inyección, disposal o yacimientos, hacia el interior del pozo; es necesario considerar, las dimensiones del wellbore, las propiedades de la formación, y la presión del yacimiento para seleccionar el método adecuado.

- **Método del tapón balanceado.** Un intervalo perforado puede ser aislado al asentar un tapón de cemento a través de la sección cañoneada o por encima de esta. Un tapón de cemento que vaya a través del intervalo perforado, debe extenderse por lo menos 50 pies por encima y por debajo de la formación que

se busca aislar. En casos en los que existan múltiples intervalos perforados o que dicha sección sea muy larga, se recomienda balancear un tapón de 100 pies por encima del intervalo a menor profundidad. La figura 5 ilustra este método.

Figura 5: Aislamiento de intervalos perforados - Método del tapón balanceado

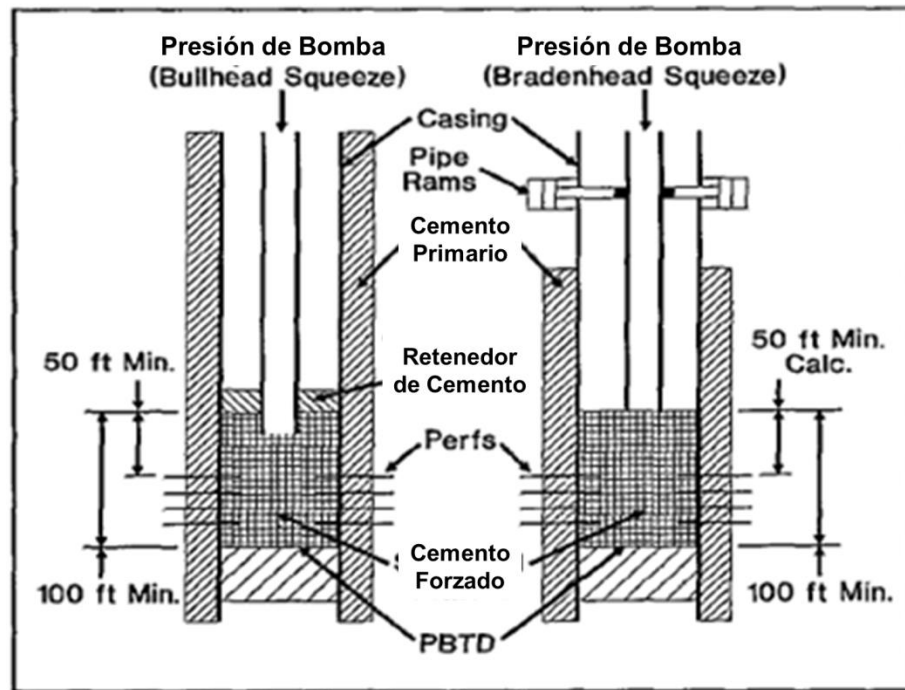


Tomado de: API Bul E3

- Método del cemento forzado.** Se puede asegurar un aislamiento efectivo al forzar cemento entre los perforados. Esto se logra al bombear cemento a través de un *Cement retainer*, un empaque recuperable, o la tubería de producción si existe. Esta barrera debe ubicarse 50 pies por encima del tope de perforados, y la cantidad de cemento bombeada debe llenar 100 pies por debajo de la barrera usada para el trabajo, además de un factor de seguridad por pérdidas operacionales. Por lo menos 20 pies de cemento adicionales deben dejarse por encima de la herramienta usada para el forzado del cemento.

Un método alternativo al descrito anteriormente es el Bradenhead, véase figura 6. El forzado de cemento confina fluidos de inyección (gas o agua), aísla zonas de alta presión, y previene de manera efectiva el flujo cruzado detrás del revestimiento

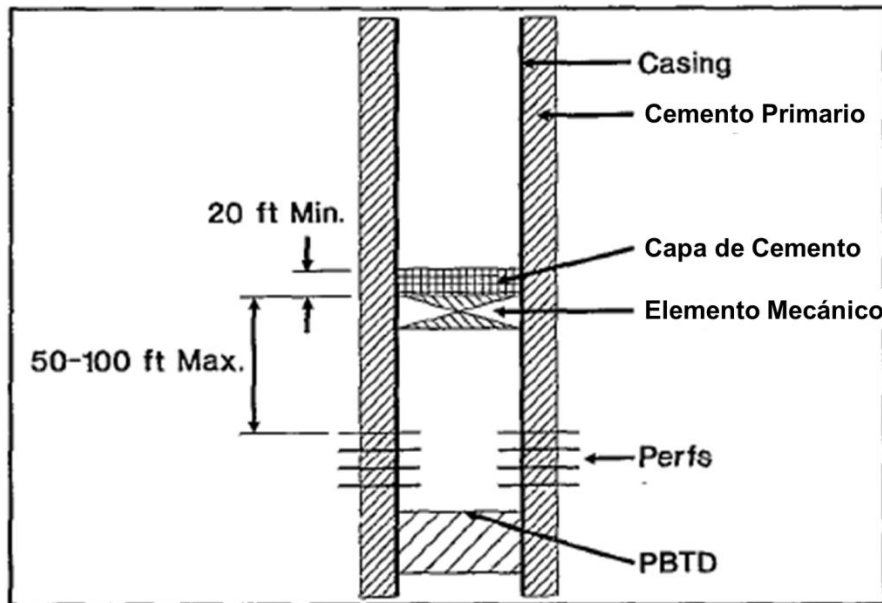
Figura 6: Aislamiento de intervalos perforados - Bullhead Squeeze y Bradenhead Squeeze



Tomado de: API Bul E3

- **Método CIBP.** Se puede aislar un intervalo perforado al asentar un CIBP de 50 a 100 pies por encima del tope de perforados. Deben ubicarse por lo menos 20 pies de cemento sobre el elemento mecánico (véase figura 7). Tanto el método CIBP como el método del tapón balanceado, son efectivos cuando el cemento detrás del revestimiento previene efectivamente el flujo de fluidos a través de este espacio anular.

Figura 7: Aislamiento de intervalos perforados - Método CIBP



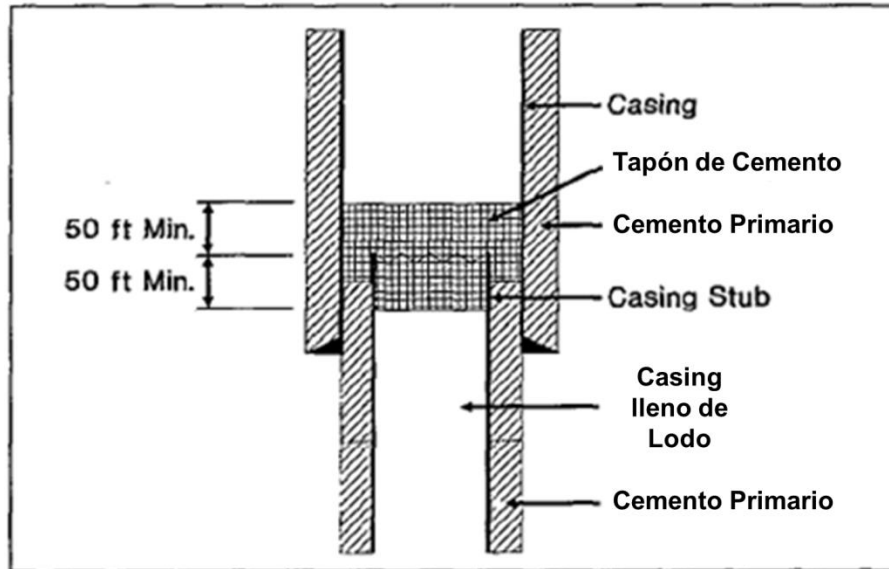
Tomado de: API Bul E3

2.5.3.2. Aislamiento de Casing Stubs

Se denomina *Casing Stub* al remanente del revestimiento cuando este se ha cortado para ser recuperado. Los *Casing Stubs* pueden ocurrir en secciones *Open hole*, o dentro de una sección de revestimiento de diámetro mayor. Estas secciones de los pozos se aíslan para prevenir la migración de fluidos bien sea a través del resto de revestimiento, o el espacio anular entre el *Stub* y el siguiente revestimiento.

- **Método del tapón balanceado.** El tapón balanceado para este caso, debe extenderse 50 pies dentro del *Stub*, y 50 pies por encima de él, incluyendo el espacio anular entre el *Stub* y la siguiente sección de revestimiento u *Open hole*. La figura 8 ilustra dicha situación.

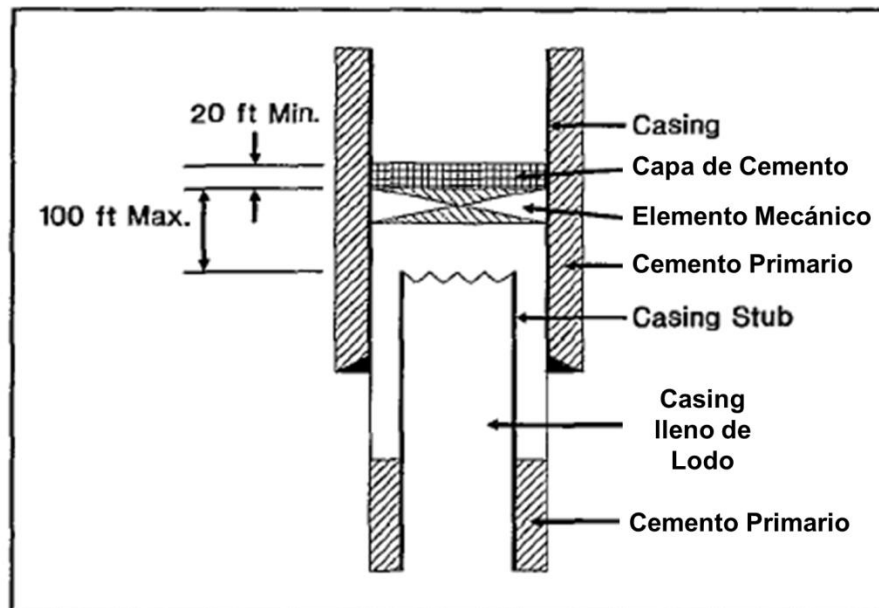
Figura 8: Aislamiento de Casing Stubs - Método del tapón balanceado



Tomado de: API Bul E3

- **Método CIBP.** Asentar un tapón mecánico, en el casing de mayor diámetro 50 pies por encima del *Stub*. Suelen colocarse 20 pies de cemento por encima del CIBP. Observe la figura 9.

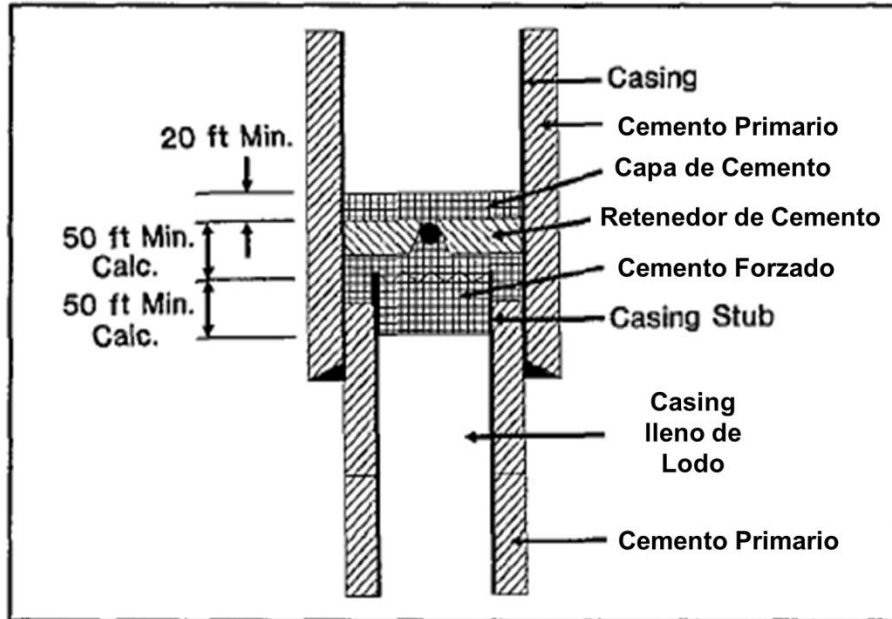
Figura 9: Aislamiento de Casing Stubs - Método CIBP



Tomado de: API Bul E3

- **Método del cemento forzado.** debe ubicarse un *Cement retainer* 50 pies por encima del *Stub* en el revestimiento de mayor diámetro, y forzar cemento equivalente al volumen de revestimiento debajo de la herramienta más el espacio ocupado dentro y fuera del *Stub* a lo largo de 50 pies. La figura 10 permite entender de mejor manera lo planteado.

Figura 10: Aislamiento de Casing Stubs - Método del cemento forzado



Tomado de: API Bul E3

2.5.3.3. Aislamiento de secciones con cemento tras el revestimiento

Cualquier intervalo crítico que haya tras el revestimiento, debe identificarse de manera adecuada y asegurarse su aislamiento balanceando taponos de cemento dentro del revestimiento. Cualquier sección crítica, en la que se haya forzado cemento o que haya sido remendada de alguna manera, debe ser taponada usando el método del tapón balanceado. Debe tenerse en cuenta, que si está presente algún acuífero de agua dulce, debe ubicarse un tapón de 100 pies de los cuales por lo menos 50 pies estén por debajo de la base de dicho acuífero. En cualquier otro caso se recomienda que los taponos se extiendan 50 pies por encima y por debajo de la sección a ser aislada.

2.5.3.4. Aislamiento de secciones sin cemento tras el revestimiento

Las secciones de revestimiento que no cuenten con cemento tras ellas, requieren consideraciones especiales para prevenir la migración de fluidos entre la tubería y la sección de hueco tras él. Al existir muchos casos en los que los revestimientos no se cementan hasta superficie, es de vital importancia que las compañías operadoras estén conscientes de cuan necesario es determinar los topes de cemento, para de esta manera identificar los puntos críticos a aislar y que no tengan cemento en el anular alrededor del revestimiento.

Debe realizarse un programa de aislamiento para evitar que hidrocarburos o aguas de inyección entren en contacto con acuíferos de agua dulce, y en algunas ocasiones, las condiciones permitirían lograrlo con la ubicación de una sola barrera, tal como en el caso del aislamiento de pozos sin revestimiento.

Imagen 1: Impacto ambiental de un pozo mal abandonado debido a la ausencia de cemento detrás del revestimiento (1)



Imagen 2: Impacto ambiental de un pozo mal abandonado debido a la ausencia de cemento detrás del revestimiento (2)



Los siguientes procedimientos pueden aplicarse en caso de que existan puntos críticos en intervalos que no tengan cemento entre el revestimiento y el *Borehole*.

- **Método del cemento forzado.** Cuando una sección considerablemente larga de revestimiento sin cemento detrás puede aislarse con solo una operación de cementación, es necesario cañonear la zona en la que se planea ubicar el tapón. Se debe forzar cemento a través de las perforaciones tal como se ha descrito anteriormente, permitiendo que se forme un tapón de unos 100 pies dentro del revestimiento, y teniendo en cuenta el volumen perdido tras el mismo, la cara de la formación y los perforados.
- **Forzado de cemento en bloque.** Algunas zonas críticas pueden necesitar aislarse cañoneando por encima y por debajo de ellas y forzando cemento en toda la zona. Debe asegurarse que se bombee un volumen suficiente de cemento a la presión necesaria; es necesario dejar dentro del revestimiento una columna de por lo menos 100 pies entre las perforaciones realizadas para el procedimiento. Se recomienda el uso de esta técnica cuando la zona a confinar debe por alguna razón, estar asilada de las demás zonas críticas, o cuando no sea práctico aislar circulando cemento.
- **Aislamiento circulando cemento.** Esta metodología puede aplicarse siempre y cuando las condiciones del pozo así lo permitan, si el revestimiento está colapsado, o si existe pérdida de circulación no se recomienda su uso. Se debe cañonear la cercanía del intervalo sin cementar, la cual se busca confinar, y circular cemento a través del anular entre la formación y el revestimiento.

2.5.3.5. Aislamiento de acuíferos de agua dulce

Es necesario ubicar un tapón de cemento debajo del acuífero de agua dulce más profundo para evitar la contaminación del mismo de cualquier migración de fluidos.

En el caso de que el acuífero se encuentre en una sección del revestimiento que esta cementada, se recomienda balancear un tapón de cemento de 100 pies justo debajo de él. En caso de no estar cementado el revestimiento se requiere cañonear y forzar cemento tal como se mencionó en el inciso anterior. Alternativamente, se puede cortar y recuperar el revestimiento en donde se encuentre el acuífero, y proceder a cementar el *Stub*, siguiendo lo indicado anteriormente.

2.5.3.6. Tapones de superficie

Los tapones de superficie se utilizan principalmente para prevenir que aguas de superficie entren al pozo abandonado. Antes de ubicar el tapón de superficie, es necesario asegurar de manera efectiva el aislamiento del acuífero de agua dulce más profundo, y que los fluidos en el pozo se encuentren estáticos.

Los tapones de superficie deben ubicarse a una profundidad de entre 20 y 50 pies y deben llegar justo debajo del nivel del suelo. Estos tapones pueden asentarse usando diferentes equipos de superficie.

La cabeza de pozo debe removerse y cualquier remanente del revestimiento debe cortarse de entre 3 a 6 pies por debajo del nivel del suelo.

Si tras cortar el revestimiento se observa alguna sección sin cementar, se debe llenar de cemento cada una de las secciones observadas, en caso de que estas sean substanciales, se recomienda bombear cemento a través de tubería de diámetro pequeño; de lo contrario se recomienda simplemente verter cemento hasta llenar cada espacio anular.

2.6. VERIFICACIÓN DE LA UBICACIÓN Y ESTADO DE LOS TAPONES Y REVESTIMIENTO

Los tapones críticos son aquellos que confinan zonas productivas de hidrocarburos, el acuífero de agua dulce más profundo y los de superficie. Estos tapones deben verificarse para asegurar que cualquier vía de migración de fluidos haya sido efectivamente sellada. Es importante verificar los tapones para

determinar si estos están donde se supone que deben estar y si el cemento se ha endurecido.

Existen esencialmente dos métodos para verificar el estado de los tapones, estos son tocar fondo, bien sea usando tubería de trabajo, coiled tubing, drill pipe, entre otros, y la aplicación de presión diferencial. El primero implica esperar a que el cemento se endurezca al punto de no ocasionar una pega, o dañar la integridad del cemento a la hora de efectuar el procedimiento, por tanto operativamente se recomienda utilizar aceleradores de fraguado en el caso de que se programe una verificación tocando fondo. El segundo método, solo puede realizarse si el pozo tiene la suficiente integridad para soportar el diferencial de presión que se busca aplicar para efectuar la prueba, esto limita su uso. Es necesario tener en cuenta que se recomienda verificar la integridad de los tapones a través de estos métodos, solo si las condiciones del pozo y la operación así lo permiten.

Un diseño adecuado de la lechada de cemento o resina, y la correcta ubicación de los tapones se consideran suficientes garantías de un aislamiento efectivo del pozo.

2.6.1. Verificación de la profundidad de asentamiento del tapón

El proceso de tocado de fondo debe garantizar que el tapón este adecuadamente ubicado en el pozo y que sea capaz de aislar un intervalo crítico. Antes de tocar fondo, el cemento debe ser lo suficientemente fuerte para soportar el contacto mecánico con la tubería de trabajo, coiled tubing, drill pipe o herramientas de wireline. El pozo y los fluidos que contenga deben estar en una condición tal que permitan realizar este procedimiento de manera segura.

- **Uso de tubería de trabajo / drill pipe / tubing.** La verificación puede lograrse al bajar la sarta hasta que golpee ligeramente el tapón, notando que ocurra un ligero cambio en el indicador de peso del equipo. Con apoyo del recuento de tuberías (pipe tally), puede determinarse la profundidad exacta a la que se encuentra el tapón.

En caso de que la sarta se use para asentar un CIBP, el pipe tally también indicaría la profundidad de asentamiento. Tras esta operación, se recomienda volver a tocar fondo, con el fin de asegurar que se haya realizado adecuadamente el procedimiento.

- **Uso de wireline.** El taponamiento de pozos muchas veces involucra el asentar cement retainers o CIBP usando wireline. La profundidad de asentamiento del tapón se registra con el indicador de profundidad de la unidad de wireline. Tras

asentar el tapón, se debe golpear el mismo usando el ensamblaje de fondo conectado a la línea, de esta manera se puede verificar su fijación.

2.6.2. Pruebas de presión para los tapones

En algunos casos es necesario realizar pruebas de presión para constatar que el tapón haya sellado efectivamente el pozo. Comúnmente este tipo de pruebas se hacen solo en el primer tapón de la operación de P&A, y en aquel debajo del tapón de superficie. La prueba se realiza aplicando una presión diferencial a la barrera bien sea “suaveando” (presión diferencial negativa), o aplicando presión hidráulica (presión diferencial positiva). Las pruebas de presión están limitadas a secciones revestidas por razones prácticas. De observarse una fuga, debe determinarse si es a través del tapón o del revestimiento sobre él. Se aconseja realizar estas pruebas solo en caso de que el pozo puede soportar los cambios de presión de manera controlada, y sin causar problemas de integridad en el revestimiento.

- **Método de “suaveo”.** Tras aislar el tapón, suavée el pozo hasta que la columna hidrostática sobre el mismo, este por debajo del gradiente de presión del yacimiento de la zona confinada por el tapón. Debe monitorearse el nivel de fluidos por un tiempo razonable para asegurar que este se ha estabilizado. En caso de que no hayan cambios en el nivel de fluidos, se considera que la barrera es competente.
- **Método de la prueba de presión.** Tras aislar el tapón y asegurándose de que el pozo este lleno, conecte la tubería que esté usando a una bomba y aplique una presión ligeramente mayor a la que se espera soporte la barrera, en caso de influjo. Cierre el pozo y monitoree la presión por al menos 15 minutos. Si en ese tiempo la presión se mantiene mayor al noventa por ciento de su valor original, se considera que el pozo ha sido sellado de manera eficaz.

2.6.3. Calibración del revestimiento

Si bien el hecho de calibrar el pozo no determina su integridad mecánica, si puede advertir de colapsos, washouts, u otras situaciones atípicas que comprometen la integridad del mismo. La determinación de estas anomalías es fundamental a la hora de realizar diferentes operaciones entre las cuales están: Asentar CIBP o cement retainers, realizar pruebas de presión para determinar la integridad de los tapones, etc.

2.7. SITUACIONES ESPECIALES

2.7.1. Taponamiento de pozos sin revestimiento de superficie

Problemas en el pozo, o algunas condiciones dadas durante la perforación, obligan a abandonar un pozo antes de instalar el revestimiento de superficie. En esta situación especial, aún existe un potencial de migración de fluidos. De no ser impráctico o muy costoso, se sugiere llenar de cemento la totalidad del pozo. De ser imposible realizar lo anteriormente descrito, se debe aislar efectivamente el acuífero de agua dulce más profundo al asentar un tapón que se extienda 50 pies por encima y por debajo del mismo; en caso de ser un intervalo muy largo, se sugiere balancear un tapón de 100 pies en la base del mismo. El tapón de superficie debe realizarse siguiendo los lineamientos descritos anteriormente.

2.7.2. Completamientos con liner ranurado o gravel pack

Cuando exista un intervalo completado con liners ranurados, este debe aislarse de ser posible, aplicando las metodologías descritas para el aislamiento de completamientos open hole. Sin embargo, cualquier herramienta para el control de arenas puede impedir el paso de una sarta, por lo que estas secciones pueden aislarse instalando tapones en cualquier tubería dentro del arreglo del completamiento, instalando un tapón mecánico sobre el gravel pack y cubriéndolo con cemento, o cañoneando y forzando cemento sobre este último.

2.8. MATERIALES DE LAS BARRERAS DE ABANDONO

En las operaciones de abandono permanente de pozos, los materiales empleados juegan un papel primordial dentro del éxito a largo plazo del trabajo en cuestión, puesto que estos deben cumplir roles como barreras primarias y secundarias que evitan la migración de fluidos y presión hacia la superficie, salvaguardando no solo la integridad del medio ambiente sino también la integridad de acuíferos y aguas potables subterráneas.

2.8.1. Cementos

El cemento es una mezcla sólida pulverizada de materiales calcáreos ricos en carbonato de calcio y arcillas que contienen aluminio, sílice y hierro entre otros

elementos. El cemento comúnmente usado en la industria petrolera y de la construcción es el Portland ya que dada su composición es de fácil disponibilidad en el mercado.

El American Petroleum Institute (API) clasifica el cemento Portland en ocho clases según el desempeño de cada uno bajo diversas condiciones de presión y temperatura, además de tener en cuenta la resistencia de cada uno al sulfato. A continuación se resume dicha clasificación:

Tabla 1: Clasificación API para cementos

Clase	Descripción
A	Se usa hasta profundidades de 6000 ft (pozos poco profundos), cuando no se requieren propiedades especiales. Requiere un 46% de agua.
B	Se usa hasta profundidades de 6000 ft (pozos poco profundos), cuando se requiere de moderada a alta resistencia a los sulfatos. Requiere 46% de agua.
C	Se usa hasta profundidades de 6000 ft (pozos poco profundos), cuando se requiere alta resistencia inicial a la compresión. Es el de mayor finura. Requiere 56% de agua.
D	Se usa para profundidades desde 6000 ft hasta 10000 ft, bajo condiciones de moderadas a altas temperaturas y presiones. Requiere 38% de agua.
E	Se usa para profundidades desde 10000 ft hasta 14000 ft, bajo condiciones de altas temperaturas y presiones. Requiere 38% de agua.
F	Se usa para profundidades desde 10000 ft hasta 16000 ft, bajo condiciones extremadamente altas de temperatura y presión. Requiere 38% de agua.
G	Cemento base para pozos hasta de 8000 ft de profundidad, utilizando aditivos variados como aceleradores o retardantes puede cubrir un amplio rango de profundidad y temperatura lo que lo convierte en el cemento más usado en la industria petrolera. En el mercado se encuentra disponible en moderada y alta resistencia al sulfato. Requiere un 44% de agua.
H	Cemento base para pozos hasta de 8000 ft de profundidad, o utilizando aditivos como aceleradores o retardantes puede cubrir un amplio rango de profundidad y temperatura. Disponible en moderado y alta resistencia al sulfato. Aunque es similar al cemento clase G, este es de grano más grueso. Requiere un 38% de agua.

Tomado de: API Spec 10A

La selección de los componentes de la lechada de cemento se hace en base a la profundidad del pozo, temperatura de formación, propiedades de la formación y

las propiedades del lodo o fluido de abandono a utilizar. Cementos tipo A, C, G o H suelen utilizarse en las operaciones de abandono de pozos.

La siguiente tabla puede utilizarse para trabajo en campo y está basada en la norma API Spec 10A:

Tabla 2: Especificaciones API para cementos

Extraído de la norma API Spec 10A "Specification for Well Cements" Tabla 2.2 (21a Edición, Septiembre 1, 1991.)			
1	2	3	
Clase de Cemento API	Porcentaje de agua por peso de cemento	Agua*	
		Galones por saco	Litros por saco
A & B	46	5,19	19,6
C	56	6,32	23,9
D, E, F & H	38	4,29	16,2
G	44	4,97	18,8

Tomado de: API Spec 10A. (*Cálculo basado en un saco de 94#)

Además del cemento y el agua necesaria para la elaboración de la lechada especificada en la tabla anterior, aditivos de cemento como aceleradores o retardantes pueden ser agregados para controlar las propiedades de la misma. Es probable que se necesiten aditivos para el control de la deshidratación, en operaciones con cemento forzado.

2.8.1.1. Aditivos Para Cementos

Existen muchas clases de aditivos los cuales se pueden presentar de forma sólida o líquida que buscan variar las propiedades físicas y químicas de los cementos, con el fin de aumentar su versatilidad operativa y su aplicación práctica bajo diferentes condiciones, estos se clasifican en 10 categorías:

- **Aceleradores.** Son usados para acortar el tiempo de fraguado de la lechada acelerando la tasa de hidratación del cemento. A menudo se usan para compensar el efecto causado por otros aditivos como dispersantes y aditivos para control pérdida de fluidos.
- **Retardantes.** Son utilizados para retardar el fraguado del cemento con el fin de permitir suficiente tiempo para la colocación de la lechada en el pozo. Actúan sobre la superficie de los granos del cemento retardando la hidratación.

- **Extendedores.** Son aditivos de bajo peso utilizados principalmente para disminuir la densidad de la lechada del cemento.
- **Densificantes.** Son materiales utilizados para densificar el cemento, y se utilizan para contrarrestar las altas presiones encontradas en los trabajos de cementación.
- **Dispersantes.** Los agentes dispersantes o reductores de fricción se adicionan a la lechada de cemento para hacerla más fluida reduciendo la viscosidad de la misma y permitiendo un bombeo de la lechada de cemento a presiones por debajo de la presión de fractura.
- **Control de pérdida de fluido.** Mantiene estable la densidad de la lechada y otras propiedades reológicas al evitar la pérdida de filtrado a través de zonas permeables.
- **Control de pérdida de circulación.** Es necesario utilizar materiales que bloqueen los espacios porosos o las fracturas para permitir la restauración de la circulación.
- **Antiespumantes.** Algunos materiales o aditivos agregados al cemento o al agua pueden provocar una espuma excesiva, originando por anticipado problemas en la mezcla. Para contrarrestar dicho fenómeno se utilizan los agentes antiespumantes.
- **Aditivos para retrogresión.** Para grandes profundidades y temperaturas superiores a los 260 °F, las lechadas de cemento requieren de un aditivo para contrarrestar el esfuerzo de retrogresión cuya función principal es la de incrementar y mantener estable la resistencia final del cemento.
- **Controladores de migración de gas.** Son aditivos utilizados para controlar la entrada de gas dentro de una columna de cemento después de su ubicación.

2.8.2. Resinas

La resina es una sustancia producida por algunas plantas en la naturaleza y dadas sus propiedades que desde hace varios siglos se usaron para producir caucho, los científicos han replicado, derivando en la resina sintética. La resina sintética tiene propiedades extremadamente similares a las de su contraparte natural, especialmente la habilidad de endurecerse al aplicarles calor, presión o una combinación de las dos.

En la mayoría de los casos las resinas son producidas usando un proceso químico de polimerización. Este proceso deriva en la creación de polímeros que son más homogéneos y estables que los que se encuentran naturalmente.

Generalmente, las resinas sintéticas se clasifican en dos áreas: Resinas sintéticas termoplásticas y resinas sintéticas termoestables. Las resinas termoplásticas son aquellas que se ablandan y pueden moldearse aplicando calor o presión aun después de haber adoptado una forma predeterminada. El proceso puede repetirse hasta que los enlaces entre las cadenas de polímeros se rompan.

Las resinas termoestables, normalmente son blandas o líquidas durante su etapa de formación hasta que se endurecen en su forma final al someterse a presión o temperatura, luego de esto no pueden derretirse o moldearse. Las resinas epóxicas son ampliamente utilizadas por su alta resistencia mecánica.

Los cementos resinosos son materiales especialmente usados para colocar tapones selectivos en pozos abiertos, cementaciones a presión y para cementar zonas que se van a abandonar en un pozo. Por lo general son mezclas de resinas líquidas, un catalizador en polvo y un cemento API clase A, B, G o H.

La propiedad más particular de estos cementos es cuando se aplica presión a la lechada, la fase resinosa puede ser estrujada frente a la zona permeable y formar un sello dentro de la formación. Estos cementos se usan en pozos donde se requieren volúmenes relativamente bajos de lechada, son efectivos a temperaturas que van desde 15.5 °C (60 °F) hasta 93 °C (200 °F).

2.8.3. Cast iron

El término Cast Iron cubre toda una gama de aleaciones ferrosas. Se caracteriza por ser una aleación de hierro que contiene más de 2% de carbono, y silicio en un rango del 1% al 3%. El grado de la aleación y el control del proceso de calentamiento y enfriado puede darle al Cast Iron una amplia variedad de propiedades.

2.8.3.1. Tipos de Cast Iron

El Cast Iron es usado en la industria del petróleo y gas, para hacer tuberías, partes de empaques, calderas, cuerpos y partes de válvulas, y en este caso particular, tapones mecánicos.

La mayoría de los Cast Iron, tiene baja ductilidad, por lo que no pueden ser enrollados, o trabajados a temperatura ambiente; así mismo tienen una resistencia mecánica menor a la de los aceros. Generalmente se clasifican según su

microestructura, la cual depende del contenido de carbono, la aleación y el contenido de impurezas, la tasa de enfriamiento durante y después del congelamiento, y el tratamiento térmico tras la fundición.

La composición de esta aleación varía significativamente dependiendo del grado del hierro base usado para la fundición, pero en general contiene de 2% a 4% en peso de carbono. Los otros elementos de la aleación son manganeso (Mn), fósforo (P), y azufre (S).

La proporción de carbono es la clave para la producción de los diferentes tipos de cast iron, dentro de los que están, cast iron blanco, cast iron gris, y cast iron maleable. Estos difieren significativamente los unos de los otros debido a sus propiedades mecánicas y su soldabilidad.

- **Cast iron blanco.** El cast iron blanco se forma cuando el carbón disuelto en la aleación no puede formar grafito durante la solidificación. Esta aleación es dura y frágil, por lo que no puede procesarse. El cast iron blanco es la única aleación dentro de la familia de cast iron en la que el carbono solo está presente en forma de carburo. La falta de grafito hace que tenga una coloración clara a lo que debe su nombre. Tiene una alta resistencia compresiva, y retiene dureza y resistencia sometido a altas temperaturas. La presencia de diferentes carburos dependiendo de la aleación hace del cast iron blanco extremadamente duro y resistente a la abrasión, pero quebradizo. Una forma mejorada del cast iron blanco es el cast iron enfriado, explicado más adelante en este inciso.
- **Cast iron maleable.** También conocido como hierro maleable; el carbono en esta aleación se encuentra en forma de nódulos de grafito de forma irregular en vez de hojuelas. En esencia, es cast iron blanco al cual se le aplica un tratamiento térmico para transformar el carbono en forma de carburo, en grafito tal como se mencionó. Esta forma de grafito se llama carbono templado debido a que la transformación se hace en estado sólido durante el tratamiento térmico.

Tras el tratamiento térmico, una fuerte matriz ferrítica rodea al carbón templado resultante haciendo del cast iron maleable más dúctil y con una mayor resistencia compresiva que el cast iron gris.

Esta aleación se clasifica en dos grados:

1. Hierro maleable ferrítico: Esta categoría a la vez se divide en dos tipos; Cast iron de núcleo blanco y cast iron de núcleo negro
 - a. Cast iron de núcleo blanco: Esta aleación es básicamente cast iron blanco, sometido a un proceso de recocido en un ambiente oxidante. Lo que se busca con este tratamiento térmico es disminuir la

proporción de carburo presente en la superficie de la aleación; para lograrlo se calienta la muestra a una temperatura de 900 ° C en una atmósfera oxidante.

- b. **Cast iron de núcleo negro:** Este tipo de cast iron consta de una matriz ferrítica con intercalaciones de carbono templado; para lograr esta disposición de los componentes sólidos se calienta la muestra en un horno cerrado tipo “cúpula”. La resistencia y ductilidad de esta aleación es muy baja por lo que no se recomienda su uso como material estructural.
2. **Hierro maleable perlítico:** Esta forma de cast iron posee diferentes tipos de carbono en la matriz de hierro; esto se logra al someter la muestra a un tratamiento térmico donde se busca regularizar el contenido de carbono en la muestra para que se disponga de manera uniforme. En la mayoría de los casos se diseña el tratamiento para generar carburo de hierro dentro de la matriz. El resultado final posee una resistencia y dureza mayor que la del hierro maleable ferrítico.
- **Cast iron gris.** Esta forma de cast iron es por mucho la más antigua y común aleación dentro de la familia de los cast iron. En esencia, está conformada por una matriz de hierro en la cual el carbono se dispone en forma de hojuelas. Normalmente se utilizan inoculantes para que las hojuelas de carbono sean de tamaño fino, de lo contrario la aleación perdería mucha dureza y resistencia compresiva.

Como se mencionó anteriormente, la esencia del cast iron gris son las hojuelas de carbono embebidas en la matriz de hierro; esta particularidad, le da a esta aleación una marcada tendencia a fallar bajo esfuerzos tensionales, pero le proporciona excelentes características de amortiguación, por lo que su resistencia compresiva, dependiendo del tipo de fundición, puede ser muy alta. En muchos casos en los que la resistencia compresiva es más importante que la resistencia a la tensión, el cast iron gris tiene una mejor performance que el acero (Aplicación de cargas compresivas).

- **Cast iron enfriado.** Esta aleación de la familia de los cast iron se forma al enfriar rápidamente una zona específica de una muestra de cast iron blanco. Lo que se busca es enfriar lo suficientemente rápido la superficie de la muestra para formar cast iron blanco, pero que el núcleo de la misma se enfría de forma relativamente lenta para formar cast iron gris. La profundidad de la zona enfriada y la dureza de la misma, dependerá del contenido de carbono en la aleación. Normalmente se agrega cromo en pequeñas cantidades (1%-4%) para controlar la profundidad de la zona enfriada, además de promover la formación de carburo de cromo, lo que aumenta la dureza y resistencia a la abrasión. También suele agregarse a la zona enfriada proporciones mayores

de cromo (12 a 35%) para mejorar la resistencia a la corrosión y oxidación a temperaturas elevadas.

- **Aleaciones de cast iron.** En esencia son las modificaciones hechas a los tipos ya mencionados, buscando mejorar ciertas propiedades particulares. El cromo, como ya se mencionó, forma carburo de cromo que incrementan la dureza, resistencia, la profundidad de la zona enfriada, y resistencia al desgaste y a la temperatura. El cobre cataliza la formación de cementita que aumenta la resistencia mecánica de la matriz ferrosa. El molibdeno, mejora las propiedades mecánicas como resistencia a la fatiga, resistencia a la tensión, resistencia térmica y dureza. El níquel por su parte, se usa para controlar la microestructura favoreciendo la formación de perlita.

2.8.4. Elastómeros

Los elastómeros están conformados por cadenas de polímeros compuestas principalmente por partículas de carbono, hidrogeno y oxígeno, que tiene la propiedad de ser elásticas y de tener un grado de interacción entre ellas. Son estas interacciones las que hacen que al dejar de aplicar una fuerza sobre el elastómero, estos puedan volver a su forma original.

Podría decirse que los elastómeros son el material ingenieril de mayor versatilidad, estos se comportan de manera muy diferente al metal y los plásticos especialmente por su forma de deformarse y recuperarse de dicha deformación tras la aplicación de una carga.

Los elastómeros son materiales complejos que exhiben una combinación única de propiedades dentro de las que se destacan la flexibilidad y la resiliencia. La resiliencia le permite a los elastómeros recuperar su forma de manera rápida.

Para realizar operaciones de abandono es necesario tener en cuenta las condiciones y el ambiente al que estará expuesto el tapón, para de esta manera, seleccionar el tipo de elastómero adecuado para dicho propósito. Este diseño debe basarse en diferentes aspectos específicos dentro de los que se destacan:

1. El ambiente presenta cargas dinámicas o estáticas: Si hay movimiento, ¿es rotacional?, ¿es lineal?, ¿debido a expansión térmica, o cambios de presión?
2. Temperatura: Continua, mínima, máxima, ciclo termal, temperatura de transición a cristal.
3. Aplicación: ¿Quedan espacios?, ¿Qué acabados tiene la superficie donde se instalará el elastómero?
4. Ambiente: Compatibilidad química, parámetros de solubilidad.

5. Presión: Continua, máxima, fluctuación, tasa de descompresión.
6. Costo: Relación costo beneficio, costo de falla.
7. Validaciones y especificaciones: Estándares internacionales como API, ISO, entre otras; estándares de la industria o especificaciones del cliente.

2.9. BARRERAS DE ABANDONO

Una barrera de flujo es cualquier elemento que prevenga y/o mitigue la migración de fluidos en el pozo o hacia este; la aplicación de estas barreras es el principal recurso con el que cuenta la operación de abandono para lograr sus objetivos. Existen varios tipos de barreras, cada una con un diferente propósito y función, en general se utilizan una o dos para controlar el potencial de migración de fluidos en cada punto crítico del wellbore. Las barreras, su función y propósito se relacionan en la tabla 3.

2.9.1. Barreras de control de pozos vs barreras para abandono de pozos - P&A-

Es muy común confundir estos dos términos, sin embargo analizando la función de los elementos y dispositivos usados para el control de pozos como preventoras anulares, preventoras de ariete, múltiples y válvulas de estrangulación, su función es restringir el flujo de fluidos fuera del pozo mientras se puede controlar el inlfujo y continuar la perforación. Sin embargo, las barreras de abandono deben restringir el flujo de fluidos no solo fuera del pozo, sino entre formaciones y especialmente proteger los acuíferos de agua dulce. Además, las barreras de abandono deben asegurar el aislamiento esencialmente a perpetuidad, por lo que consideraciones deben tomarse en el diseño de las mismas para lograr dicha característica.

2.9.1.1. Características

Una barrera permanente debe ser capaz de extenderse por toda la sección transversal del pozo incluyendo la totalidad del espacio anular, y debe poder proporcionar sello tanto vertical como horizontalmente. Además debe cumplir con las siguientes características:

- Impermeable
- Integridad a largo plazo
- Sin encogimiento
- Dúctil no quebradizo capaz de soportar cargas y/o impactos
- Resistente a diferentes químicos y sustancias como sulfuro de hidrogeno, dióxido de carbono e hidrocarburos

- Mojable, para asegurar adherencia al acero

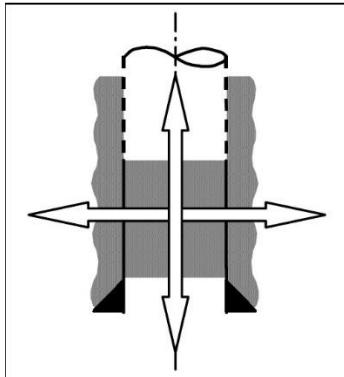
Tabla 3: Barreras de abandono, función y propósito

TIPO	FUNCIÓN	PROPÓSITO
BARRERA PRIMARIA	Primera barrera contra el flujo de fluidos de formación hacia superficie o para asegurar la zona de inicio de hueco abierto.	Aislar una potencial fuente de influjo hacia la superficie.
BARRERA SECUNDARIA AL YACIMIENTO	Sirve de reserva en caso de falla de la barrera primaria.	El mismo propósito de la barrera primaria y aplica donde la fuente potencial de influjo es también un yacimiento con potencial de flujo y/o hidrocarburos.
BARRERA ENTRE FORMACIONES	Aislar yacimientos los unos de los otros.	Reducir el potencial de flujo entre yacimientos.
BARRERA DESDE HUECO ABIERTO HASTA SUPERFICIE	Aislar la superficie del pozo y viceversa mientras se realiza el trabajo de abandono.	Barrera poco segura cuando hay una fuente potencial de influjo sobre la misma.

Tomado de: Norsok D-10

La integridad del cemento tras el casing en donde se ubique una barrera debe ser verificada para asegurar la integridad de la misma. Este cemento no puede considerarse una barrera.

Figura 11: Extensión transversal de una barrera de abandono



Tomado de: Norsok D-10

2.9.1.2. Posicionamiento

El posicionamiento tiene que ver con la ubicación de las barreras en el pozo a la hora de efectuar la operación de abandono. Principalmente debe ubicarse una barrera que confine las formaciones productoras de hidrocarburos y/o agua salada, otra justo debajo del nivel freático, y finalmente un tapón en superficie. Es necesario tener en cuenta que cada abandono requiere un diseño de las barreras y definir la ubicación de las mismas dependiendo de las situaciones que presente el pozo; esto debe hacerse siguiendo los lineamientos descritos en el inciso: “Aplicación de los métodos de P&A”.

Las barreras deben ser instaladas tan cerca como sea posible de la fuente de influjo cubriendo cualquier camino de fuga que sea posible. Las barreras primarias y secundarias deberán ubicarse a una profundidad en la cual, la presión de fractura de la formación ubicada justo debajo de la barrera supere la presión esperada tras la operación.

Como medida práctica, el API recomienda en la mayoría de los trabajos de abandono utilizar tapones de 100 pies de cemento portland clase G para aislar cualquier zona que pueda considerarse crítica, excepto en superficie donde se recomiendan 50 pies.

Debe haber por lo menos un barrera entre la zona de potencial de influjo, excepto en casos donde la zona sea un yacimiento de hidrocarburos, en donde es necesario por lo menos dos barreras. Adicionalmente, en casos en donde no haya o no importe el crossflow entre múltiples estratos productivos, se recomienda instalar un barrera de 100 pies de cemento portland clase G 50 pies por encima de la formación más somera.

2.10. TIPOS DE ABANDONO

Adicional a los equipos convencionales, desde años atrás se han invertido esfuerzos en el desarrollo de equipos que puedan realizar una gama cada vez más amplia de diferentes trabajos, de manera más eficiente y segura, es por esto que se han desarrollado equipos como las unidades de Wireline, Coiled Tubing y las Rapid Service Units (RSUs), todas las anteriores explicadas a continuación.

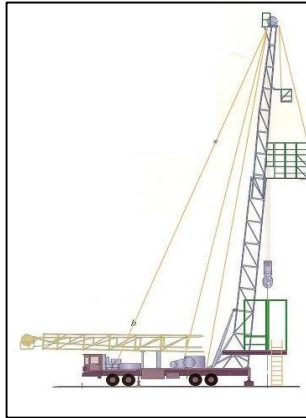
2.10.1. Rig

Las unidades convencionales (taladro de intervención de pozos) son comúnmente las más usadas en la industria petrolera nacional para realizar operaciones de

abandono de pozos dada la versatilidad operativa y la capacidad de carga que este tipo de equipos poseen. Pese a esto, la movilización y renta diaria de estos taladros representa más del 40% del total de los costos de un trabajo de abandono con estas unidades.

Un taladro de intervención de pozos convencional está conformado de manera general por una unidad básica, la cual combina una torre telescópica y un sistema de potencia sobre el chasis de un tracto camión no articulado (unidad autopropulsada), además de la mesa rotaria, tanques, generadores, bombas, equipos y maquinaria pesada, todos diseñados para soportar grandes capacidades de carga y trabajo pesado, razón por la cual suelen ser de construcción robusta, lo cual trae consigo un gran requerimiento logístico y operativo para su movilización.

Figura 12: Esquema general de un taladro de intervención de pozos convencional



Tomado de: Tesis de grado: Manual para los Procedimientos Operacionales de Servicios a Pozo de la Superintendencia de Operaciones Huila – Tolima de Ecopetrol S.A.

En operaciones de abandono, frecuentemente es requerido retirar la sarta de producción y equipos de levantamiento artificial que se encuentren previamente instalados en el pozo; estas condiciones específicas demandan el uso de unidades convencionales que, pese a los costos que acarrear consigo, son las idóneas para la realización de este tipo de trabajos, ocasionando que los taladros de intervención de pozos se conviertan en equipos completamente indispensables en estas operaciones bajo dichas condiciones específicas.

Los trabajos de abandono de pozos con unidades convencionales tienen la ventaja de que pueden desarrollarse con cualquier método de abandono anteriormente enunciado dada la versatilidad que estos equipos poseen operativamente. Los métodos que son comúnmente empleados haciendo uso de

estos equipos son los de tapón forzado y tapón balanceado, ya que estos requieren de una unidad compleja que incluya un sistema de bombeo y una alta capacidad de carga.

2.10.2. Rigless

Una operación rigless se basa en el objetivo de realizar los mismos trabajos que una unidad convencional ejecutaría, con la salvedad de que se emplean equipos más ligeros, compactos y eficientes, con requerimientos logísticos menos complejos para su movilización; ejemplo de lo anterior son las unidades de Wireline, Coiled Tubing y Rapid Service Units (RSU's), las cuales son comúnmente complementadas con equipos auxiliares como grúas y equipos de iluminación auxiliares.

2.10.2.1. Unidades de Wireline

Imagen 3: Unidad de E-Line



Tomado de: Weatherford International

Las operaciones con unidades de wireline involucran la corrida y/o sacada de herramientas y equipos en el pozo usando un cable, ya sea sólido o trenzado, que por lo general es de una longitud continua y presenta un pequeño diámetro. Es el tipo de equipos comúnmente más usados cuando se requiere realizar tareas de intervención simples las cuales no requieren de mucho esfuerzo mecánico, esto dado a que las unidades de wireline son versátiles, de fácil movilización y fácil armado, adicionalmente la relación costo – eficiencia de estas unidades es una de las mejores de la industria. Usualmente, las operaciones de wireline incluyen cañoneos, corrida de registros, limpieza de pozos y vertimiento de cemento.

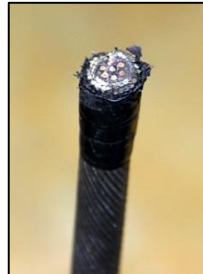
La mayoría de las unidades terrestres de wireline se encuentran sobre un camión para facilitar su movilización e incluyen un carrito de wireline, una fuente de energía y los equipos de control y conexión. El sistema de una unidad de wireline

puede ser dividido en dos partes, una primera compuesta por la herramienta, cable y demás componentes que viajen dentro del pozo con el objetivo de realizar la intervención, y una segunda parte compuesta por el equipo de superficie que se encarga de mantener el control del pozo y de la herramienta a la vez que realiza una operación de manera segura.

Las unidades de Wireline se pueden dividir en dos:

- **Unidades de Cable Eléctrico (E-Line).** El cable usado en este tipo de unidades es un cable eléctrico con armazón de acero, lo cual permite a estas recibir y transmitir continuamente información con la herramienta en fondo; el tamaño del cable varía en un rango entre 7/32" y 15/32" dependiendo del estrés mecánico al cual se vaya a someter el cable y al número de conductores eléctricos de este. Dado que las herramientas se bajan al pozo por gravedad gracias al peso de estas, es difícil emplear unidades de E-line en pozos altamente desviados; esta limitante se puede mitigar empleando herramientas llamadas Tractors, los cuales empujan la herramienta en fondo dentro del pozo.

Imagen 4: Corte transversal de un cable eléctrico de unidades de E-Line



Tomado de: Weatherford International.

- **Unidades de Cable de Acero (Slickline – S-Line)** Estas unidades emplean un cable sólido sin conductores eléctricos, lo cual lo convierte en un mecanismo netamente mecánico. Los diámetros de cable más comunes son de 3/32", 7/64" y 1/8". El equipo de superficie de las unidades de slickline es de manera general el mismo que para unidades de E-Line, excepto por el hecho de que el cable empleado en las unidades de slickline es de menor diámetro en comparación y por lo tanto necesita un carrete más pequeño.

Imagen 5: Cable de acero de unidades de SlickLine



Tomado de: Weatherford International

2.10.2.2. Unidades de Coiled Tubing

Estas unidades tienen la capacidad de insertar en el pozo una tubería continua de acero permitiéndole así realizar una amplia gama de operaciones al pozo. Esta tubería continua es hecha a partir de láminas de acero de alta resistencia, las cuales son enrolladas y soldadas. La tubería continua resultante del anterior proceso, que oscila en diámetros desde $\frac{3}{4}$ " hasta $3 \frac{1}{2}$ ", tiene la flexibilidad suficiente como para ser enrolladas en un carrete.

Los elementos básicos de una unidad de Coiled Tubing son:

- Fuente de Poder: Usualmente son generadores eléctricos alimentados por diésel los cuales a su vez suministran energía a todos los sistemas de la unidad de Coiled Tubing.
- Sistema de Control: Esta localizado al interior de la cabina de control donde el operador controla los elementos de la unidad de Coiled Tubing.
- Cabeza Inyectora: Provee la fuerza mecánica necesaria para empujar la sarta dentro del pozo o en su defecto para sacarla de este, cuenta con una cadena especialmente ensamblada para agarrar la sarta sin dañarla dándole así la tracción necesaria para subir o bajar la sarta según sea necesario.
- Carrete de Tubería: Es usado para almacenar y transportar la tubería continua, durante operaciones la tubería se enrolla y desenrolla del carrete con ayuda de un motor.
- Sistema de Control de Pozos: El control del pozo es fundamental durante las operaciones realizadas con Coiled Tubing, principalmente cuando el pozo en intervención está fluyendo por flujo natural, dicho control se logra usando un juego de BOP's, Lubricadores y un Stuffing Box, permitiendo así realizar una operación de manera segura.

Imagen 6: Unidad de Coiled Tubing



Tomado de: Celtic Pride Manufacturing Ltd

2.10.2.3. Rapid Service Units (RSU's)

Estas unidades cuentan con capacidad mínima efectiva de 70,000 Lbs de levantamiento en el gancho, altura máxima del mástil de 70 ft y tanque incorporado, habilitada para retirar y/o correr tubería de producción de 2 3/8", 2 7/8", 3 1/2" OD rango 2 en sencillos y varillas de 5/8", 7/8", 1", 1-1/8", 1-1/4", 1-1/2" OD en sencillos y dobles. Se destaca por tener bajos requerimientos de personal, poseer pocas cargas y ser fáciles de movilizar, no emplea cargas extra-dimensionadas lo que le permite movilizarse las 24 horas del día, esto hace que sea un equipo más versátil y compacto que un taladro convencional.

Recientemente, estas unidades se han popularizado dada la gran oportunidad que representan en materia de optimización operativa gracias a la reducción de tiempos y costos de intervención de los pozos, donde por lo general se logra una reducción del 25% de los costos operativos, esto asociado principalmente a la los bajos tiempos requeridos para la movilización, rig-up y rig-down de estas unidades.

Imagen 7: Unidad RSU



Tomado de: Stewart & Stevenson Inc

3. DISEÑO DE ABANDONO DE POZOS -P&A-

Como se ha mencionado anteriormente, el abandono permanente de un pozo es una operación que, aunque no representa ninguna rentabilidad para empresas operadoras, son obligatorias de acuerdo a las legislaciones locales que estén vigentes, ya que son de especial interés debido a que su objetivo es salvaguardar la integridad del medio ambiente. En los últimos años, algunos pozos a lo largo del mundo han generado afectaciones al medio ambiente como resultados de malos procedimientos de abandono, esto permitió a la industria del petróleo dimensionar las consecuencias que un re-abandono puede conllevar, no solo debido a los costos operativos sino también al impacto negativo a la imagen pública de las empresas implicadas; estas son solo algunas de las razones por la que se vuelve necesario replantear el diseño de operaciones tan delicadas como las de P&A.

Por otra parte, el API Bull E3 es un documento en el cual el American Petroleum Institute emite un concepto en materia de abandonos en base a experiencias de campo y a operaciones realizadas en Estados Unidos, sin ahondar en argumentos técnicos que permitan establecer un estándar internacional generalizado para la industria del petróleo, esto debido principalmente a que el abandono de pozos se caracteriza por su infradesarrollo técnico hoy en día. Lo anterior hace que las prácticas de abandono consignadas en dicho documento, sean susceptibles de ser optimizadas y/o replanteadas en aras de garantizar el alcance de los objetivos del abandono de pozos de una manera satisfactoria para los sectores afectados por dichas operaciones.

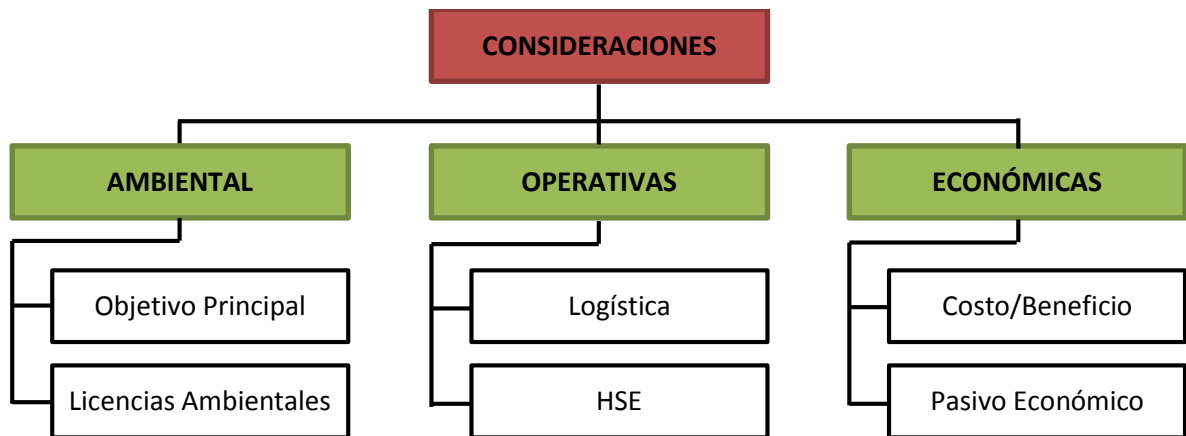
3.1. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La industria del petróleo recién inicia la era de los abandonos de pozos, si bien desde siempre se han realizado este tipo de procedimiento, cada vez son más los activos que alcanzan su límite productivo o cuya explotación se vuelve económicamente inviable, es decir, recién la industria del petróleo inicia la era de abandono de campos. Debido a esto, el abandono de pozos no ha sido un tema de especial interés en la generación de conocimiento y desarrollo de mejores prácticas dentro de la comunidad petrolera, como sí lo son temas de recobro mejorado, estimulación y demás prácticas que lleven a una optimización de la producción.

Pese a lo anterior, las operaciones de P&A son necesarias y obligatorias por parte de los entes reguladores de las actividades petroleras en cada país, así mismo dichos entes suelen establecer los requerimientos para este tipo de procedimientos. En el caso particular de Colombia, donde a la fecha no se dispone de ninguna norma clara y precisa que indique los requerimientos técnicos que

deben cumplir las operaciones de abandono de pozos, es más que evidente la necesidad de tomar consideraciones que permitan generar un diseño de abandono de pozos que salvaguarde el medio ambiente, a la vez que es viable técnicamente y congruente con los intereses económicos de la empresa operadora.

Figura 13: Consideraciones generales del diseño de un abandono de pozos



3.1.1. Consideraciones ambientales

El fin de las operaciones de P&A, como se menciona en el capítulo 2, es salvaguardar el medio ambiente, ya sea protegiendo ecosistemas en superficie o acuíferos en el subsuelo; por esto, el diseño de estas operaciones debe basarse en alcanzar este objetivo de manera óptima a la vez que se tienen en cuenta las obligaciones adquiridas mediante licencias ambientales otorgadas para la explotación petrolífera. Esto implica que salvaguardar el medio ambiente es la más importante de las consideraciones que se deben establecer al momento de plantear el diseño de las operaciones de P&A.

3.1.2. Consideraciones operativas

Aunque el principal interés tras las operaciones de abandono es proteger el medio ambiente mediante el taponamiento de pozos, estas operaciones deben diseñarse de tal manera que sean técnica y operativamente viables; para esto es necesario tener en cuenta las políticas HSEQ con las que cuentan las empresas involucradas, al igual que las regulaciones establecidas en este tema en cada país; esto implica que los abandonos deben ser diseñados de la manera más

segura, que involucre un adecuado control de los riesgos, salvaguardando las vidas humanas; adicionalmente el diseño de las operaciones de abandono debe realizarse teniendo en cuenta aquellos equipos y herramientas disponibles, que sean aptos para realizar las operaciones de P&A, pues de otro modo se incurrirían en sobrecostos por movilización de recursos no disponibles, o por Stand By de equipos sub-utilizados.

3.1.3. Consideraciones económicas

El diseño de las operaciones de P&A además de cumplir con las consideraciones ambientales y operativas, debe ser congruente con los intereses económicos de la empresa operadora; debido a que los costos necesarios para la ejecución de estas operaciones no representa ninguna rentabilidad a las finanzas de la empresa, se vuelve necesario evaluar a fondo el costo/beneficio de las distintas alternativas operativas disponibles para la ejecución de estos procedimientos, consiguiendo así alcanzar los objetivos ambientales y operativos mencionados anteriormente al menor costo posible, a la vez que se cumple con los requerimientos normativos establecidos por los distintos entes reguladores y las licencias ambientales otorgadas.

3.2. POTENCIAL DE MIGRACIÓN DE FLUIDOS

El diseño de una operación de abandono de pozo debe dimensionarse de acuerdo a las necesidades y particularidades que cada pozo en específico presente, un dimensionamiento inapropiado puede desembocar en un mal confinamiento de los fluidos de yacimiento o en sobrecostos operativos. Por esto es necesario evaluar la factibilidad de que un fluido de interés migre hacia una zona que se busca proteger, ya sea un acuífero o la superficie; es aquí donde se emplea la definición de potencial de migración de fluidos establecido por el API Bull E3 como “*el potencial de los fluidos del wellbore de migrar a través de un wellbore inactivo*” el cual se emplea para dimensionar la efectividad de las barreras empleadas en el diseño de abandono y en consecuencia, la efectividad del diseño en sí mismo. Para poder establecer el potencial de migración de fluidos de un pozo es necesario establecer la presencia de formaciones presurizadas.

3.2.1. Formación presurizada

Bajo este término se denomina, según el API Bull E3, a “*cualquier formación productora, de inyección, de disposición, que contenga hidrocarburos o agua*”

salada, penetrada por el pozo y que tenga suficiente presión para iniciar y sostener la migración de fluidos de manera significativa hacia acuíferos de agua dulce o hacia la superficie". Este concepto permite dimensionar diseños de abandono de pozos en base al riesgo de contaminación medioambiental inherente a la presencia de formaciones presurizadas, es decir, no toda formación a presión es una formación presurizada, por lo que el análisis y evaluación de la presencia de este tipo de formaciones es fundamental al momento de iniciar un diseño y dimensionamiento óptimo de un abandono de pozo que sea congruente ambiental, operativa y económicamente, tal como se mencionó anteriormente.

3.3. FACTORES QUE AFECTAN EL DISEÑO DE LAS OPERACIONES DE ABANDONO DE POZOS -P&A-

El diseño de un abandono depende de factores que afectan el alcance del objetivo principal de este, aislar efectivamente los fluidos de yacimiento de la superficie y/o de acuíferos evitando posibles contaminaciones; estos factores en su mayoría están ligados a las particularidades que presenta cada pozo y yacimiento, siendo así necesario considerarlas dentro del proceso de planeación y diseño, con el fin implementar las medidas necesarias que garanticen un aislamiento efectivo, a la vez que se asegura la calidad de los procesos involucrados en la operación.

Los principales factores involucrados dentro del diseño del P&A se mencionan a continuación.

3.3.1. Construcción del pozo

Involucra todos aquellos factores inherentes al estado mecánico del pozo al momento de ser abandonado, además de una evaluación histórica de las intervenciones y sucesos relevantes dentro de la vida del mismo (historial del pozo). La evaluación del estado mecánico del pozo debe enfocarse en primera instancia, en la determinación de la calidad y cantidad del cemento detrás del revestimiento, ya que el anular formado entre este y la formación constituye la principal vía de migración de fluidos cuando el cemento es de calidad pobre o está presente en cantidades inadecuadas; por tanto, este factor de diseño es uno de los principales determinantes de las acciones a tomar para garantizar el adecuado aislamiento de los fluidos de yacimiento en una operación de abandono.

Subsecuentemente aspectos como la presencia de pescados, colapsos de revestimiento, depósitos de parafinas, asfaltenos o carbonatos en las paredes del casing y demás condiciones intrínsecas al estado mecánico del pozo, son evaluadas con el fin de dimensionar el riesgo de migración de fluidos y tomar las

acciones requeridas para aislarlos efectivamente dentro del yacimiento desde la etapa de planeación y diseño del abandono.

3.3.2. Prácticas de abandono

Las prácticas operativas implementadas en los trabajos de abandono, determinan en gran medida el éxito de estas operaciones, así como el correcto aislamiento de fluidos en el yacimiento; esto implica que el control de la calidad de los procesos involucrados sea de gran relevancia para garantizar la eficiencia de los tapones implementados y subsecuentemente la efectividad del aislamiento de los fluidos. Buenas prácticas de cementación y de posicionamiento de barreras, implementación adecuada de fluidos de abandono (lodo de abandono), buenas políticas operativas y un correcto análisis de riesgos, son factores que deben considerarse dentro de la planeación y diseño del abandono de pozos con el fin de lograr los objetivos de esta operación de la manera más eficiente.

3.3.3. Condiciones naturales

Por condiciones naturales se entienden a aquellas que son intrínsecas al yacimiento y al fluido presente en este: Presión, presencia de acuíferos, GOR, BSW, presión de burbuja, presencia de H₂S, CO₂ y mercaptanos, entre otros. Estas condiciones determinan principalmente las especificaciones y el dimensionamiento de las barreras a implementar, al igual que determinan las medidas necesarias para garantizar la seguridad y mitigar los riesgos dentro de la operación de abandono.

Aunque en la práctica puedan llegar a existir más factores de diseño, los anteriormente mencionados son los más relevantes y de mayor incidencia en el éxito de una operación de P&A; el API Bull E3 al igual que el documento Norsok D10, consideran estos mismos factores a la vez que permiten determinar que aquellos con mayor incidencia dentro del éxito de una operación de abandono son los factores relacionados con la construcción del pozo y el estado mecánico del mismo, principalmente la calidad y cantidad del cemento detrás del casing.

Figura 14: Factores que afectan el diseño de un abandono de pozos y su incidencia



Como lo muestra la anterior figura, aunque las condiciones naturales son la principal base del diseño de un abandono, el factor más importante es la construcción del pozo, ya que este en sí mismo fue construido en base a diseños que buscaban evitar la migración de fluidos hacia formaciones aledañas teniendo en cuenta las condiciones del yacimiento, por lo tanto, un buen estado mecánico del pozo permite garantizar en gran medida un apropiado y efectivo aislamiento de los fluidos del yacimiento dentro de este.

3.4. OBJETIVO DEL DISEÑO

El diseño de las operaciones de abandono de pozos debe estar encaminado al cumplimiento de los objetivos de los mismos a la vez que es consistente ambiental, operativa y económicamente con los intereses de la empresa operadora y del estado. Para esto, el diseño de un abandono de pozo debe tender a encontrar la forma más económica de taponar un pozo, de tal manera que se aislen efectivamente a largo plazo los fluidos contenidos en el yacimiento, a la vez que se realiza una operación segura y viable logísticamente. Por lo que es necesario evaluar la cantidad, características, composición, longitudes y

posicionamiento de los tapones a implementar dentro de la operación de abandono de pozos.

Para el caso particular tratado en este documento, el diseño de abandono se centrará en hallar un tapón cuyo uso combinado con un Bridge Plug tenga una resistencia y capacidad aislante equivalente a aquella de un tapón de cemento Portland de cien pies de longitud, a la vez que, de manera comparativa, resulte más económica y viable logísticamente que este.

3.5. CRITERIOS DE DISEÑO

Para lograr el objetivo de un abandono de la manera más eficiente, es necesario plantear estrategias que permitan optimizar los recursos disponibles y respaldar técnicamente los procedimientos realizados; para ello se deben plantear criterios de evaluación claros que permitan discernir apropiadamente dichas estrategias. Todos los elementos a ser empleados dentro de la operación de abandono deben ser evaluados mediante estos criterios, de tal manera que se pueda determinar si las características de dichos elementos son los más adecuados para la operación, esto permitiría asegurar en mayor medida la efectividad del aislamiento que estos proveen, mientras se busca reducir su costo.

Tabla 4: Propiedades de interés para el diseño de los elementos involucrados en una operación de abandono

ELEMENTOS	PROPIEDADES DE INTERÉS			
Barreras Mecánicas	Material	Resistencia a ΔP	Sello	Temperatura y Resistencia Química (Elastómero)
Cemento/Resina	K	Resistencia Compresiva	Shear Bond	Shrinkage
Lodo de Abandono	Ph	Inhibición de Corrosión	pH	Retorta

3.5.1. Propiedades de interés en barreras mecánicas

3.5.1.1. Material de construcción

El API Bull E3 indica que el Cast Iron (Hierro Colado) es el material de construcción ideal de las barreras mecánicas usadas en operaciones de abandono, ya que este ofrece un buen desempeño a largo plazo bajo las condiciones de presión, temperatura y estrés mecánico al cual se puede ver sometido, esto reduce en gran medida la probabilidad de que falle la barrera. En comparación, los Bridge Plug composicionales son declarados por el API Bull E3 como barreras inapropiadas para operaciones de P&A, debido a que están contruidos con materiales con una corta vida útil, diseñados para aislar temporalmente fluidos y ser perforados en poco tiempo.

3.5.1.2. Resistencia a diferenciales de presión

Aunque ni el API Bull E3, ni la Norsok D-10, establecen un parámetro de resistencia a diferenciales de presión que las barreras mecánicas deben cumplir para ser usadas en operaciones de abandono de pozos, es lógico que el tapón mecánico a emplear debe tener la capacidad de resistir diferenciales de presión mayores a la máxima presión que se pueda registrar históricamente en el yacimiento, lo cual por lo general corresponde con la presión inicial de yacimiento. Adicionalmente, con base en experiencias de campo y análisis de riesgo, se recomienda que la resistencia a presiones diferenciales de las barreras mecánicas supere en un margen de al menos el 50% la presión máxima registrada históricamente en el yacimiento, esto con el fin de lograr un margen operativo ideal que permita que la barrera presente un buen desempeño a largo termino; sin embargo, el margen de seguridad a implementar queda al criterio del ingeniero que diseñe el programa de abandono y su experiencia en campo.

3.5.1.3. Elemento de sello (elastómero)

El elemento de sello provee la capacidad aislante de fluidos en barreras mecánicas, por lo tanto, es el componente más crítico a ser evaluado dentro de estas ya que determina no solo su desempeño sino también su vida útil. Los elastómeros empleados en las barreras mecánicas utilizadas en operaciones de P&A deben estar diseñados para adaptarse a las condiciones específicas que cada pozo presente, a la vez que responden apropiadamente al cambio de estas en un largo periodo de tiempo; esto implica que las características del elastómero deben adaptarse a las condiciones de presión y temperatura del yacimiento, a las características del fluido con el cual entrará en contacto y a los distintos estreses mecánicos a los cuales pueda llegar a estar sometido.

Dentro de las consideraciones más relevantes en materia de elastómeros, se deben tener en cuenta su resistencia química a fluidos como el H₂S, CO₂ y mercaptanos (si hay presencia de estos), su rango operativo de presiones y el rango de temperaturas para el cual está diseñado.

3.5.2. Propiedades de interés en lodos de abandono

3.5.2.1. Peso del lodo

Al contrario de operaciones como la perforación de pozos, donde el lodo constantemente se encuentra bajo condiciones dinámicas, en las operaciones de abandono, este se encontrará bajo condiciones estáticas, por lo cual, propiedades como el desarrollo de geles y viscosidad deben diseñarse de manera tal que brinden al lodo la capacidad de mantener en suspensión el agente densificante de manera indefinida en el tiempo. Por otra parte el diseño del lodo de abandono debe enfocarse en su principal función, generar una columna hidrostática que balancee el diferencial de presiones al cual está sometido el tapón de abandono (ya sea este mecánico o no) y adicionalmente; de esta manera, controlar cualquier influjo que pudiese llegar a existir.

Aunque, al igual que con los tapones mecánicos, el API Bull E3 y la Norsok D-10 no contemplan ningún requerimiento a cumplir para lodos de abandono, es lógico decir que la mínima densidad de estos debe ser aquella que les permita generar una presión hidrostática efectiva en el tope de los perforados que iguale a la máxima presión registrada históricamente en el yacimiento, esto asegurará en gran medida que en la eventualidad de un influjo, este sea controlado efectivamente. Pesos de lodo mayores pueden ser implementados según experiencia de campo y factores de seguridad y confiabilidad que el ingeniero de diseño de estas operaciones considere factible, sin embargo, no es muy recomendable esta práctica ya que es muy posible que el tapón se vea sometido a un diferencial de presión innecesario y evitable, además de los gastos operativos asociados a la química empleada para elaborar un lodo más denso.

3.5.2.2. Control de corrosión

Los fluidos de abandono tienen la función de extender la vida útil del revestimiento durante el mismo, ya que este constituye la principal barrera que evita la migración de fluidos, con este fin, el lodo de abandono debe tener la capacidad de inhibir la corrosión dentro del revestimiento, generada principalmente por bacterias, esto requiere que agentes bactericidas y controladores de pH sean considerados dentro de la formulación del lodo de abandono para generar las condiciones ideales que logren extender la vida útil del revestimiento.

3.5.3. Propiedades de interés en tapones de Cemento / Resina

3.5.3.1. Permeabilidad

Es una de las propiedades más importantes a la hora de evaluar el futuro desempeño de un tapón y por ende realizar su diseño. Los tapones empleados en operaciones de abandono muy probablemente se encontrarán bajo condiciones en las que experimenten diferenciales de presión durante periodos de tiempo bastante prolongados, esto abre la posibilidad a que fluidos como el gas, percolen a través de los espacios porosos del tapón, resultando en un incorrecto aislamiento de fluidos.

Si bien el API considera que un tapón de cemento competente es aquel cuya permeabilidad relativa al líquido es de 0,1 md, y conociendo que el cemento Portland tiene una que oscila por el orden de $1E-3$ md, es necesario tener muy presente que el flujo de fluidos a través de un medio poroso es función tanto del diferencial de presión al cual este expuesto el medio, como del tiempo durante el cual dure dicha exposición, por lo que es importante que la permeabilidad del tapón empleado en operaciones de abandono sea esencialmente cero.

3.5.3.2. Resistencia compresiva

Esta propiedad permite diseñar el máximo esfuerzo mecánico al cual puede ser sometido un tapón sin perder su integridad, importante a la hora de tener condiciones de presión de fondo dinámicas en el pozo a abandonar o de experimentar cambios abruptos en la presión de fondo del pozo posterior al abandono. El API, en el marco de su documento *API Specification 10A*, establece un requerimiento mínimo de resistencia compresiva para el cemento portland clase G de 1500 psi.

3.5.3.3. Shear Bond Strength (SBS)

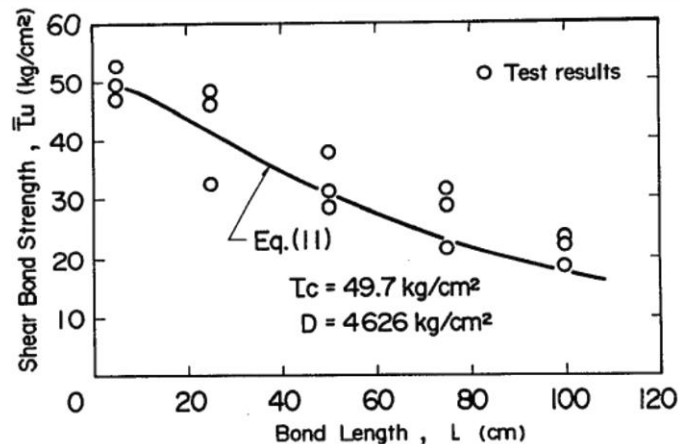
La efectividad de un tapón de cemento o resina, está basada en la capacidad aislante que este tenga, es decir, el diferencial de presión que sea capaz de soportar sin permitir el paso de fluidos a través de ellos, siendo el contacto entre el casing y el tapón el punto más crítico y de mayor falla, dada la distribución de esfuerzos en la interface entre estos dos.

El Shear Bond Strength (SBS) determina la capacidad adhesiva por pulgada cuadrada de área en contacto que el tapón tiene con las paredes del revestimiento, y por consiguiente, la máxima presión diferencial que puede experimentar sin permitir la migración de fluidos a través de esta interface, lo cual en materia de abandono de pozos es de suma importancia para lograr un efectivo

aislamiento zonal y evitar la migración de fluidos de yacimiento hacia áreas de interés, bien sea a acuíferos o a la superficie.

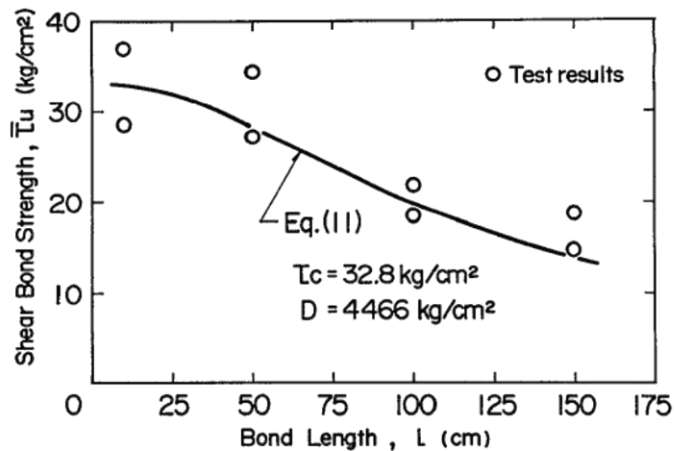
El SBS es una propiedad que varía en función de diversos factores como la temperatura de fraguado, el encogimiento y la longitud del tapón, los cuales deben ser incluidos dentro del diseño del abandono con el fin de optimizar estas características y encontrar el punto de balance entre una optimización económica y un eficaz aislamiento. En esta materia, la longitud del tapón cobra especial importancia debido a que entre mayor sea esta, mayor serán los costos asociados a dichos tapones dentro de la operación de abandono; adicionalmente, como lo muestran las figuras 15 y 16, la relación entre esta propiedad y el SBS es inversamente proporcional y sigue un comportamiento como el mostrado en las figuras, esto permite deducir que existe una longitud óptima para los tapones, en donde las propiedades aislantes de estos sean capaces de tolerar al menos la máxima presión histórica a la cual se haya encontrado el yacimiento y que, adicionalmente, una mayor longitud del tapón no represente un beneficio relevante en su capacidad de aislamiento zonal, permitiendo así lograr un diseño de abandono que sea consistente con los intereses económicos de la empresa operadora y los intereses de protección medioambiental establecidos por el estado.

Figura 15: Relación entre el Shear Bond Strength y la longitud del contacto cemento-acero para modelos de pequeña escala



Tomado de: "Static and dynamic tests on cement-grouted pipe-to-pipe connections" (OTC-3790-MS)

Figura 16: Relación entre el Shear Bond Strength y la longitud del contacto cemento-acero para modelos de gran escala



Tomado de: "Static and dynamic tests on cement-grouted pipe-to-pipe connections" (OTC-3790-MS)

3.5.3.3.1. Shear Bond Approach.

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, está claro lo importante que es esta propiedad en el diseño de los tapones de abandono, pues sus repercusiones van desde el aislamiento hasta los costos finales de la operación. Haciendo un análisis del SBS como propiedad, y teniendo en cuenta que esta es función de la fuerza transversal aplicada al tapón y el área de contacto entre el cemento y el revestimiento, se puede plantear una relación para calcular el CCH (Cement Contact Height on pipe). A esto se le llama *Shear Bond Approach*.

$$SBS = MF/CCA$$

Donde MF, es la fuerza transversal aplicada al tapón, y CCA, es el área de contacto entre el tapón y el revestimiento.

Calculando el área, en contacto se tiene:

$$CCA = CCH * \pi * \frac{ID}{12}$$

Remplazando:

$$SBS = \frac{MF}{CCH * \pi * \frac{ID}{12}}$$

Finalmente despejando CCH:

$$CCH = \frac{MF}{SBS * \pi * ID} * 12$$

Es necesario aclarar que esta herramienta es un enfoque inicial en la apreciación del SBS, pues tal como se ilustró anteriormente, esta propiedad tiene un comportamiento difícilmente equiparable a la linealidad propuesta, si bien el modelo descrito en el paper OTC-3790-MS propone una metodología para la predicción de los valores del SBS al variar la longitud de los tapones, esta se basa en pruebas de SBS con tubería concéntrica, y no con la prueba de Hydraulic Bond Strength, lo que hace imposible aplicar ese modelamiento a casos prácticos de abandono de pozos. Es por esto que al no haberse efectuado los estudios que permitan modelar matemáticamente este fenómeno físico, no queda más alternativa que realizar una aproximación tal y como se propone.

3.5.3.4. Shrinkage (Encogimiento).

El encogimiento es una propiedad de diseño que influye en gran medida en el óptimo desempeño del tapón, independientemente de que no afecta directamente la integridad física de este, si influye en su capacidad aislante al afectar de manera directa al Shear Bond Strength; el encogimiento excesivo puede llegar a reducir esta propiedad al punto de formar micro-anulares o generar comunicación hidráulica plena entre las partes superior e inferior al tapón, permitiendo así la migración de fluidos.

El cemento Portland suele tener un encogimiento volumétrico que oscila entre el 4 y 6%, lo que reduce en gran medida los valores del SBS, en cambio, formulaciones de cementos especiales con aditivos de expansión pueden llegar a suplir este encogimiento y muchas veces lograr que el tapón se expanda volumétricamente, logrando en algunas ocasiones duplicar los valores de SBS comparados con los del cemento Portland, permitiendo que el desempeño y las propiedades aislantes de los tapones mejoren en gran medida.

4. ANÁLISIS DE LAS OPERACIONES DE ABANDONO DE POZOS -P&A- DESARROLLADAS EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN

Las operaciones de abandono de pozo en el campo Caño Limón han sido objeto de optimización en los últimos años, esto con el propósito de reducir el impacto que estos tienen sobre las finanzas de la empresa operadora, en un campo que exhibe un factor de recobro mayor al 60%, donde los cortes de agua son cada vez mayores y el depletamiento del yacimiento es cada vez más marcado, haciendo de las operaciones de P&A algo cada vez más habitual dentro de la administración del campo.

Como una respuesta a estos proyectos de optimización, las operaciones de abandono rigless se han implementado en gran parte del campo, logrando una reducción de costos y tiempos operativos de más del 40%; para dar continuidad al proyecto, es necesario evaluar técnicamente la calidad de los procesos, materiales y técnicas involucrados en la operación de P&A, y así garantizar el óptimo desarrollo de dichas actividades.

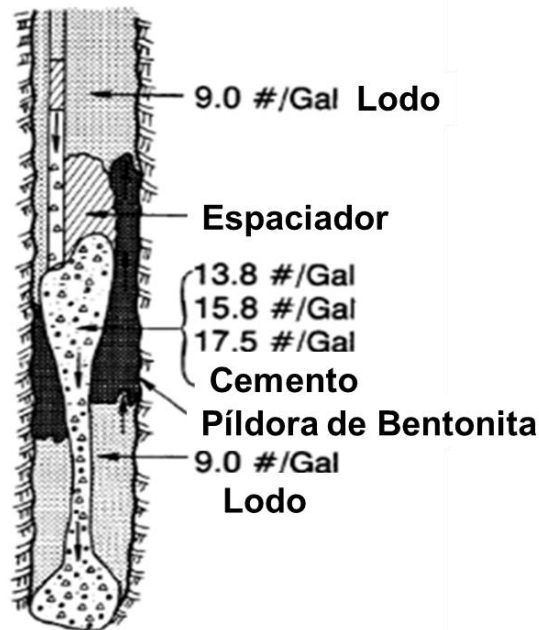
4.1. TÉCNICA DE ABANDONO IMPLEMENTADA

La técnica de abandono empleado en el campo Caño Limón se aproxima a aquella descrita por el API en su documento API Bull E3 como el método CIBP (Cast Iron Bridge Plug). Este se basa en el uso combinado de un Bridge Plug, y un tapón de 10 pies de cemento sobre este con el fin de asegurar el aislamiento de fluidos. El número de taponos asentados mediante esta técnica durante la operación de abandono suele ser dos (tapón de fondo e intermedio) a menos que las condiciones particulares del pozo como presencia de crossflow entre zonas productoras demande la implementación de un mayor número de taponos; aun así, bajo ningún concepto un pozo es abandonado con menos de dos taponos. Adicionalmente se balancea un tapón de cemento en superficie de no menos de 60 pies de longitud.

Dada la necesidad de optimización de costos y tiempos operativos, las técnicas de abandono que involucran bajar al fondo del pozo una sarta para asentar taponos de cemento de gran longitud, no eran una opción rentable y congruente con el objetivo de la empresa operadora, por lo que se implementó el método CIBP, el cual permite generar un aislamiento de fluidos confiable a la vez que es versátil y se adapta a los proyectos de optimización en desarrollo. Adicionalmente este método permite alcanzar una mayor confiabilidad de la integridad del cemento al impedir que este se segregue, como se ilustra en la figura 17, lo cual suele suceder al momento de dejar taponos de cemento balanceados en fondo. Dada la necesidad de calibrar el diámetro interno del revestimiento antes de asentar las

barreras mecánicas al implementar la técnica del CIBP, se puede confirmar la existencia o no de colapsos en el casing, lo cual aumenta en mayor medida la confiabilidad del aislamiento de fluidos y abandono permanente del pozo en comparación con otras técnicas donde este proceso no se lleva a cabo.

Figura 17: Segregación de fluidos durante el asentamiento de un tapón balanceado



Tomado de: “*Improved method of setting successful cement plugs*” (SPE-11415-PA)

4.2. BARRERAS MECÁNICAS

La tabla 5 resume las propiedades de yacimiento que se vivencian en el campo Caño Limón; en base a estas propiedades se debe evaluar el comportamiento de las distintas barreras con el fin de asegurar el correcto aislamiento de fluidos a largo plazo y de esta manera lograr los objetivos del abandono de pozos.

Teniendo como referencia las características de las barreras mecánicas producidas y comercializadas por Baker Hughes, específicamente de sus Bridge Plugs modelo N-1, ampliamente usados en operaciones de P&A en el campo Caño Limón, se realiza un análisis en base a los criterios establecidos en el capítulo tres para el diseño de barreras mecánicas de abandono, estas son: Material de construcción, resistencia a diferenciales de presión y desempeño del elemento de sello (elastómero); este último aspecto estará enfocado hacia la tolerancia a temperaturas debido a la no presencia de gases como H₂S, CO₂ o

mercaptanos en el yacimiento, además del bajo GOR y presión de burbuja, lo cual permite asegurar que poco o nada de gas natural entrará en contacto con el elastómero.

Tabla 5: Propiedades de yacimiento y fluido de Caño Limón

Propiedades de Yacimiento	
Propiedad	Valor
<i>Profundidad promedio (ft)</i>	7600
<i>Presión inicial (psi)</i>	3213
<i>Presión actual (psi)</i>	700-2800
<i>Temperatura (°F)</i>	207
<i>Porosidad promedio (%)</i>	24,5
<i>Permeabilidad promedio (md)</i>	1500
Propiedades del Fluido	
<i>Gravedad del crudo (°API)</i>	29
<i>Presión de burbuja (psi)</i>	50
<i>GOR (scf/STB)</i>	8
<i>β @ 207 °F & 3200 psi (RB/STB)</i>	1,05
<i>Viscosidad del aceite @ 207 °F & 3200 psi (cp)</i>	4

Tomado de: “Caño Limón Field, Colombia: The Latest Giant Oil Reservoir in South America” (SPE-15566-PA)

Las operaciones de abandono en el campo Caño Limón involucran el asentamiento de dos barreras mecánicas, una ubicada en la mitad de la junta de revestimiento inmediatamente encima de aquella en la cual se encuentran los perforados (aproximadamente 40 pies), y otro a 1200 pies MD.

4.2.1. Material de construcción

Los Bridge Plug Baker Hughes modelo N-1 son tapones con cuerpo construido en Cast Iron, material que por diseño es capaz de resistir los distintos estreses mecánicos a los cuales se verá sometido el tapón sin comprometer la integridad de este, cumpliendo así con los criterios estipulados en el API Bull E3 y la Norsok-D10.

4.2.2. Resistencia a diferenciales de presión.

Los tapones N-1 tienen un rango operativo de diferenciales de presión que resisten un máximo de 8000 psi y 10000 psi, para casings de 9 5/8" y 7" respectivamente, bajo la cual se puede garantizar un correcto desempeño del tapón sin comprometer la integridad de este o de su elemento de sello.

Para el caso particular del campo Caño Limón, donde no se tienen implementados proyectos masivos de inyección de agua y se cuenta con un acuífero activo que brinda un mantenimiento de energía al yacimiento, la máxima presión registrada corresponde a la presión inicial de yacimiento de 3213 psi, la cual corresponde solo al 40.16% de la máxima presión diferencial operativa de los Bridge Plug N-1 en el caso de revestimientos de 9 5/8", y de un 32.13% en el caso de revestimientos de 7", lo cual permite garantizar el buen desempeño de estos tapones en materia de aislamiento de fluidos.

4.2.3. Desempeño del elemento de sello (elastómero)

De acuerdo a las especificaciones técnicas de los Bridge Plug Baker N-1, el elemento de sello está constituido por un elastómero 90 HD, el cual tiene un rango de tolerancia térmica que va desde 125 °F hasta 400 °F, este se adapta muy bien a la temperatura de yacimiento descrita en la tabla 5. Esto permite alcanzar mayores niveles de confiabilidad en el desempeño del elastómero a lo largo de su vida útil, y por ende, en el sello que este realiza.

Como se mencionó anteriormente, la ausencia de gases que deterioren el elastómero como el H₂S, CO₂, mercaptanos y gas natural permiten incrementar en mayor medida la confiabilidad del desempeño del elastómero, y garantizar que este tendrá una vida operativa óptima.

4.3. LODO DE ABANDONO

A través del proyecto de optimización de costos operativos del cual fue objeto las operaciones de P&A en el campo Caño Limón, se estableció la formulación de lodo de abandono óptima así:

Por cada 100 barriles:

- 5 Sacos de Bentonita
- 0.5 Caneca de Bactericida
- 0.5 Sacos de viscosificante.
- 12 Sacos de Carbonato de Calcio 325 o M200

Esta formulación está diseñada para obtener una densidad del lodo de 8.6 ppg.

4.3.1. Peso del lodo

Como se estableció en el capítulo 3, la densidad del lodo de abandono debe ser tal que permita balancear la presión de yacimiento con la presión hidrostática generada por este. Siguiendo este principio y teniendo en cuenta los datos consignados en la tabla 5, se realizan los siguientes cálculos para determinar el peso de lodo de abandono ideal:

$$P = 0.052 * MW * TVD \gg MW = \frac{P}{0.052 * TVD}$$

Siendo P sustituida por la presión inicial de yacimiento, y la TVD por el promedio de profundidad de perforados, se tiene:

$$MW = \frac{3213}{0.052 * 7600} = 8.13 \text{ ppg}$$

De esta manera, se establece que la densidad mínima que debe tener el lodo de abandono para poder balancear la presión de yacimiento es de 8.13 ppg. Al establecer un peso de lodo mayor a este, como el diseñado en las operaciones de abandono en el campo Caño Limón (8.6 ppg), se están involucrando factores de seguridad que, aunque no son del todo necesarios, permiten aumentar la confiabilidad en la operación de abandono.

4.3.2. Control de corrosión

El diseño del lodo de abandono debe basarse en el control de la corrosión tanto como en la generación de presión hidrostática, buscando principalmente inhibir el crecimiento bacteriano mediante el uso de bactericidas. La formulación es susceptible a ser complementada mediante el uso de reguladores de pH (usualmente soda cáustica), de tal manera que se pueda asegurar la integridad del revestimiento durante un periodo de tiempo más extenso.

4.4. TAPONES DE CEMENTO / RESINA

Los tapones de cemento o resina, o el uso combinado de estos, son el punto de especial interés en el análisis y aseguramiento de la calidad de las operaciones de abandono, no solo por los paradigmas establecidos en torno a estos, sus especificaciones y características, sino también por el papel que juegan en la mitigación del potencial de migración de fluidos. Las operaciones de P&A realizadas en el campo Caño Limón suelen involucrar el uso de cemento portland clase G con una adición de retardante de fraguado en una concentración tal, que garantice su fluidez hasta que se encuentre sobre los tapones mecánicos previamente asentados, para dejar así un tapón de diez pies sobre estos.

La siguiente tabla resume las propiedades del cemento portland clase G.

Tabla 6: Propiedades de interés del cemento Portland clase G

Propiedad	Cemento Portland
<i>Esfuerzo compresivo (psi)</i>	1991 (Destructivo)
<i>Shear bond (psi)</i>	90.21
<i>Expansión lineal (%)</i>	
1 día	-1 a -3
3 días	-1 a -3
7 días	-1 a -3
<i>Permeabilidad (md)</i>	1.0 E -03

Tomado de: "Improved cement formulations for well abandonment" (OMC-2001-077)

4.4.1. Permeabilidad

Como se menciona en el capítulo 3, la permeabilidad promedio del cemento portland clase G ronda por el orden de $1E-3$ md, aunque esta es bastante baja, aun representa un potencial relevante frente a la migración de fluidos, ya que compuestos críticos en estado gaseoso como el H_2S o el gas natural, al estar expuestos a diferenciales de presión durante largos periodos de tiempo pueden percolar a través del tapón de cemento haciendo uso de esta permeabilidad. Aunque el API Bull E3 no especifica las características ni los materiales ideales para abandonar permanentemente un pozo, se aconseja que la permeabilidad de estos sea esencialmente cero con el objetivo de maximizar la confiabilidad del procedimiento de abandono y evitar la migración de fluidos a largo plazo.

4.4.2. Resistencia Compresiva

Esta propiedad se vuelve crucial en el momento que el tapón experimente cambios en los esfuerzos mecánicos que actúan sobre este o en la distribución del estrés generado por estos esfuerzos, ya que permite garantizar la integridad mecánica del tapón de cemento bajo estos escenarios. En el caso del cemento portland clase G, la resistencia compresiva ronda los 1991 psi, esto representa entre el 20% y 25% de la capacidad operativa de los Bridge Plug. Aunque la función principal del tapón de cemento en los abandonos realizados mediante el método CIBP es reforzar y asegurar el sello realizado por el tapón mecánico, ante una posible falla de este último, el tapón de cemento debe ser capaz de mantener su integridad y evitar la migración de fluidos, por lo que es necesario que su resistencia compresiva sea mayor a la máxima presión a la que pueda llegar a estar expuesto el tapón, siendo en este caso la presión inicial de yacimiento de 3213 psi.

4.4.3. Shear Bond Strength (SBS)

Como se discutió en el capítulo 3, esta propiedad es de especial interés ya que a través de esta se puede establecer la capacidad aislante que tiene un tapón frente a la migración de fluidos. Como se establece en la tabla 6, el SBS del cemento portland clase G ronda por el orden de los 90.21 psi; esto indica que para separar una pulgada cuadrada de la interface cemento – revestimiento, se requieren 90.21 libras fuerza. Este valor es bastante bajo si se tiene en cuenta que, en este caso particular, la máxima presión que puede llegar a experimentar el pozo posterior a su abandono corresponde a la presión inicial de yacimiento de 3213 psi, lo cual sería aproximadamente equivalente a una fuerza de 96502 lbf en un casing de 7 pulgadas, muy por encima de la capacidad aislante de un tapón de cemento

portland clase G, por lo que generalmente se recurre a tapones con grandes longitudes que implican altos costos operativos. Adicionalmente, como lo sugiere el paper “*Static and dynamic tests on cement-grouted pipe-to-pipe connections*” (OTC-3790-MS), la relación entre el SBS y la longitud del tapón es inversa, esto evidencia la necesidad de contar con un tapón que tenga capacidades aislantes superiores a las del cemento portland y que permita abrir la puerta a optimizaciones operativas en costos asociados a la preparación y asentamiento de tapones de menor volumen.

4.4.4. Shear Bond Approach

$$MF = P * \pi * \frac{ID^2}{4} = 8000psi * \pi * \frac{(8,755in)^2}{4} = 481606,31 lbf$$

$$CCH_{G class} = \frac{MF}{SBS * \pi * ID * 12} = \frac{481606,31 lbf}{90,21psi * \pi * 8,755in * 12} = 16,18 ft$$

Tabla 7: Calculo del Cement Contact Height (CCH) para cada formulación de cemento objeto de estudio

	CEMENTO ADITIVADO	CEMENTO/RESINA	CEMENTO PORTLAND
MF (LBF)	481606.31		
ID (IN)	8.755		
SHEAR BOND (PSI)	699	393.67	90.21
CCH (FT)	2.1	3.7	16.18

La tabla 7 resume los resultados de la evaluación de tres tapones constituidos por distintas formulaciones de acuerdo al enfoque establecido por el Shear Bond Approach, a una presión de 8000 psi (máxima presión diferencial soportada por los Bridge Plug Baker N1 para casing de 9 5/8 in); de esta resalta la superioridad en materia de aislamiento de fluidos ofrecida por los sistemas de cemento aditivado y cemento/resina, los cuales son capaces de aislar efectivamente los fluidos a esta presión con longitudes mucho menores que aquella del cemento portland clase G.

4.4.5. Shrinkage (Encogimiento)

El encogimiento de los tapones durante su etapa de fraguado es de especial interés dada la alta sensibilidad que el Shear Bond Strength presenta frente a pequeñas variaciones de esta propiedad, es decir, el encogimiento o expansión del tapón es el principal precursor y determinante del desarrollo de un apropiado SBS, lo que a su vez, como se indicó anteriormente, determina la capacidad aislante del tapón. En el caso del cemento portland clase G, el encogimiento neto varía entre el 1 y el 3% y se puede extender a lo largo de meses de acuerdo al proceso de fraguado que el cemento experimente, esto explica en cierta medida el porqué de los bajos valores de SBS que un tapón de cemento portland presenta.

La interface entre el revestimiento y el tapón de cemento es el punto de mayor estrés mecánico, por tanto es allí donde existe mayor probabilidad de falla del aislamiento; debido a esto es necesario emplear en el abandono de pozos, fluidos que tengan la capacidad de expandirse o en su defecto, de mantener su volumen inicial, buscando así no comprometer los valores de SBS o por el contrario aumentarlos.

5. RECOMENDACIONES OPERATIVAS

5.1. FORMULACIÓN MEJORADA DE LECHADAS DE CEMENTO PARA OPERACIONES DE ABANDONO DE POZOS -P&A-

En base a los resultados del análisis de las operaciones de P&A realizadas en Caño Limón, se recomienda reevaluar la composición de la lechada de cemento Portland clase G como material constituyente de los tapones empleados para el aislamiento de fluidos de yacimiento; el objetivo, es lograr una formulación que posea mejores características aislantes y un mejor desempeño a largo termino.

El paper OMC-2001-077, desarrolla una formulación de lechada de cemento bastante prometedora, diseñada para ser usada en operaciones de abandono de pozos; esta se orienta a conseguir aquellas propiedades de especial interés que permitan garantizar un adecuado aislamiento a largo termino, tal como se discutió en el capítulo 3, enfocándose principalmente en la obtención de buenos valores de SBS gracias a la expansión que experimenta el tapón durante su proceso de fraguado.

La formulación que presenta mejor desempeño para el aislamiento zonal, según lo desarrollado en el paper OMC-2001-077, es:

Tabla 8: Composición de la lechada de cemento aditivada objeto de estudio

Composición de la lechada propuesta	
Componente	Cantidad
Agua (L)	52,3
Antiespumante (L)	0,01
Sílice en suspensión (L)	10
Aditivo de control de perdida de fluido (Kg)	0,6
Retardante de Fraguado (Kg)	0,5
Intensificador del retardante de fraguado (Kg)	0,375
Aditivo de expansión HT (Kg)	5
Sílice pulverizado (Kg)	35
Cemento (Kg)	100

Tomado de: *“Improved cement formulations for well abandonment”* (OMC-2001-077)

Tabla 9: Propiedades de interés de la lechada de cemento aditivada objeto de estudio

Propiedad	Propuesta Cemento
Esfuerzo compresivo (psi)	3653*
Shear bond (psi)	699*
Expansión lineal (%)	
1 día	0,174%
3 días	0,321%
7 días	2,74%
Permeabilidad (md)	0

Tomado de: *“Improved cement formulatios for well abandonment”* (OMC-2001-077).

Nota: *Medidas tomadas mediante un Ultrasonic Cement Analyzer (UCA).

La tabla 9 resume las propiedades obtenidas durante el estudio desarrollado en el paper OMC-2001-077; de estas, resalta principalmente la capacidad de la lechada de expandirse un 2,74%, apalancando el desarrollo de altos valores de SBS; esto le otorga mayor capacidad aislante al tapón, lo cual se complementa con una permeabilidad esencialmente nula. Por otra parte, los altos valores de esfuerzo compresivo permiten garantizar en mayor proporción la integridad del tapón frente al efecto de los distintos estreses a los cuales puede llegar a estar sometido, logrando así una mayor confiabilidad del aislamiento de fluidos.

En concordancia al Shear Bond Aproach establecido en el capítulo 3, esta formulación de lechada de cemento permitiría generar un aislamiento equivalente a aquel generado por un tapón de 16,2 pies de cemento Portland clase G con tan solo un tapón de 2,1 pies; lo anterior, teniendo en cuenta que generalmente se asienta un tapón de 10 pies sobre el Bridge Plug (Metodo CIBP), asegura la eficacia del aislamiento de fluidos en los abandonos de pozos.

Se recomienda evaluar económica y logísticamente la posible implementación de esta lechada de cemento en operaciones de abandono de pozos.

5.2. USO DE RESINAS EN OPERACIONES ABANDONO DE POZOS -P&A-

Las resinas son un material que ha ganado gran relevancia en materia de abandono de pozos, especialmente en aquellas circunstancias donde se necesita aislar espacios reducidos a los cuales el cemento, debido su cantidad de partículas en suspensión, no es capaz de llegar.

Una mezcla de cemento clase G y resina Halliburton WellLock en una proporción másica de 70/30, presenta las propiedades descritas en la siguiente tabla:

Tabla 10: Propiedades de interés del sistema cemento/resina objeto de estudio

Propiedad	Cemento / Resina
Esfuerzo compresivo (psi)	3733*
Shear Bond Strength (psi)	393.7*
Expansión lineal (%)	
1 día	0
3 días	0
7 días	0
Permeabilidad (md)	0

Tomado de: LockCem™ Halliburton

Nota: *Medidas tomadas mediante ensayo destructivo.

Gracias a la capacidad de la resina de rellenar espacios diminutos, la permeabilidad esencial de un tapón constituido por el sistema cemento/resina es cero, al igual que su encogimiento. Los valores de SBS, aunque son inferiores a las de la lechada de cemento modificada que se mencionó anteriormente, son muy superiores a los de un tapón de cemento Portland clase G, indicando una mayor capacidad aislante en comparación con este último. Finalmente, los altos valores de resistencia compresiva brindan una gran confianza frente a la integridad del tapón bajo ambientes de grandes estreses mecánicos.

La implementación de tapones constituidos 100% por resina puede resultar más convenientes bajo criterios técnicos, pero puede acarrear consigo grandes costos operativos que afecten negativamente el desarrollo de las operaciones de

abandono. Adicionalmente, los requerimientos operativos y logísticos para la implementación de este tipo de materiales deben ser evaluados para determinar su viabilidad.

Se recomienda evaluar operativa, económica y logísticamente la posible implementación de sistemas cemento/resina en operaciones de abandono de pozos.

5.3. RECOMENDACIONES OPERACIONALES

Las siguientes recomendaciones operativas se plantean con la ánimo de lograr operaciones de abandono permanente más eficientes, de mayor confiabilidad, que cumplan con los objetivos y lineamientos básicos trazados en el API Bul E3 y normas alternas como la NORSOK D-10; Además de esto, se basan en la metodología de diseño propuesta a lo largo del capítulo 3 y el análisis de las operaciones de abandono realizadas en el campo Caño Limón desarrollado en el capítulo 4.

5.3.1. Tapón mecánico

Como lo menciona explícitamente el API Bul E3, los tapones mecánicos composicionales no representan una barrera confiable ni idónea para operaciones de abandono, se debe usar tapones de Cast Iron, con especificaciones similares o superiores a las de los Bridge Plug Baker Hughes N1. Se recomienda adquirir estos productos con un proveedor que garantice la integridad y confiabilidad operativa del tapón, a la vez que brinde asistencia y asesoría en el uso adecuado de estos.

5.3.2. Tapón de cemento / resina

Se recomienda implementar cementos aditivados (diseñados para operaciones de P&A), resinas o el uso combinado de estos como nuevas y mejores alternativas para el aislamiento y taponamiento permanente de pozos; El diseño de estos debe enfocarse en la consecución de características mecánicas y propiedades aislantes (Shear Bond Strength) significativamente mayores a las del cemento portland, con el fin de garantizar un adecuado, eficiente y longevo aislamiento de fluidos.

5.3.3. Lodo de abandono

Se recomienda reevaluar la formulación del lodo de abandono actualmente empleada en el campo Caño limón, el cual, aunque cumple con los lineamientos mencionados en el capítulo 3 en materia de control de la corrosión del revestimiento, aún es susceptible de ser mejorado al añadir controladores de pH, lo cual permitiría garantizar en mayor proporción la integridad del revestimiento a lo largo del tiempo. Además, se recomienda no usar agua como fluido de abandono.

5.3.4. Herramientas, equipos y unidades de superficie

El uso de unidades de mezclado de cemento en superficie, como lo indica el paper “*A laboratory study of cement and resin plugs placed with thru-tubing Dump Bailers*” (SPE 24574), es indistinto a la calidad de la lechada de cemento, siendo este un factor poco o nada relevante dentro del aseguramiento de la calidad de los procesos involucrados en las operaciones de abandono; se recomienda seleccionar el mecanismo de mezclado en base a criterios económicos, logísticos y de HSE.

Se recomienda emplear balanzas de lodo en sitio, para constatar que las densidades del lodo de abandono y de la lechada de cemento, o resina, sean las correctas. Adicionalmente, se recomienda filtrar la lechada de cemento con el fin de eliminar posibles partículas grandes.

El uso de Dump Bailers gravitacionales o de desplazamiento positivo no incide en la calidad del tapón de cemento a asentar, lo cual los hace completamente intercambiables según se menciona en el paper SPE 24574, se recomienda seleccionar estos mecanismos en base a criterios económicos, logísticos y de HSE. El uso de Dumb Bailers eléctricos abre la posibilidad de realizar múltiples corridas, logrando de esta manera asentar taponos de mayor longitud. Se recomienda evaluar la implementación de este tipo de herramientas en las operaciones de P&A en el campo Caño Limón.

La posibilidad de implementar Dump Bailers compatibles con unidades de E-Line o Digital Slick-Line traería consigo muchas ventajas como el aumento de la capacidad volumétrica del Dump Bailer (en el caso de las unidades de E-Line) actualmente limitada por la resistencia del cable de las unidades de Slick-Line, además de poder disponer de una telemetría que proporcione mayor precisión en

el asentamiento de tapones y reducir el requerimiento de unidades de superficie dedicadas a la operación de abandono, lo cual facilitaría la logística requerida para la planeación y ejecución de las operaciones de P&A.

5.3.5. Operación de abandono

Según el estudio realizado en el paper SPE 24574, es recomendable ubicar los tapones de cemento o resina en zonas desviadas del pozo, cuando esto sea posible, ya que esto permite reducir la contaminación de estos fluidos con lodo de abandono, alterando en menor proporción sus características. Adicionalmente, se debe procurar que los tapones no queden asentados en zonas en las cuales el revestimiento no presente precipitaciones de parafinas o asfaltenos por pequeñas que estas puedan llegar a ser, debido a que esto reduce el SBS entre tres y seis veces.

En lo referente al proceso de vertimiento del cemento, o resina, con el Dump Bailer, se recomienda que sea realizado a máximo un pie de distancia del Bridge Plug, con el fin de reducir la posibilidad de contaminación del fluido con lodo de abandono. Además, se recomienda mantener una relación entre el ID del revestimiento y el OD del Dump Bailer lo mayor posible, en aras de prevenir la migración de partículas finas del cemento, que pueden llegar a alterar las propiedades del mismo. Es muy importante que el vertimiento del fluido se haga bajo condiciones estáticas del Dump Bailer, evitando la práctica de subir y bajar reiteradamente el mismo para asegurar el vertimiento del fluido (yo-yoing); el paper SPE 24574, muestra que esta práctica altera las propiedades del cemento o resina, por lo que es altamente recomendado evitarla, en cambio, tras la descarga del Dump Bailer, se recomienda dejarlo en condiciones estáticas durante dos o tres minutos para asegurarse del vertimiento total del contenido.

Finalmente, en trabajos que impliquen múltiples corridas del Dump Bailer, se recomienda minimizar el tiempo entre corridas al máximo, o asegurarse que el fluido tenga la cantidad de retardante adecuada para que se fragüen de manera homogénea todas las lechadas.

6. CONCLUSIONES

El método de abandono implementado en Caño Limón constituye una forma efectiva de evitar la migración de fluidos, siempre y cuando se acompañe de una adecuada metodología de diseño que involucre tanto el Bridge Plug (Elastómero), como el cemento y/o resina que lo acompañe. Sin embargo, el cemento portland clase G, en las cantidades descritas, no garantiza un aislamiento adecuado a largo plazo, tal como lo describen los resultados obtenidos al aplicar la metodología del Shear Bond Approach. Considerando lo anterior, se debe aumentar la cantidad de cemento portland clase G dentro del proceso, o debe plantearse el uso de otras alternativas en cementos y/o resinas.

Desde un enfoque cualitativo se encontró que la propuesta operacional del cemento aditivado o del sistema resina-cemento, superan las características operativas del cemento portland clase G.

Debido a la ambigüedad existente en la normativa referente al abandono de pozos (API y legislación local), esta propuesta constituye un enfoque técnico/operativo aplicable como norma o estándar de la industria a nivel nacional. Su aplicación garantiza un correcto aislamiento de los pozos abandonados y salvaguarda el medio ambiente.

Existe una clara diferencia entre una barrera de control de pozos y una barrera de abandono, su tiempo de vida útil. Esta última debe diseñarse para que funcione esencialmente a perpetuidad, por lo que sus características, requerimientos y propiedades deben diseñarse con base a esta premisa.

El abandono de pozos debe realizarse mediante un enfoque que tenga en cuenta distintos factores de diseño como las condiciones naturales, construcción del pozo y las prácticas de abandono; así mismo, el potencial de migración de fluidos debe evaluarse en el diseño de la operación de abandono de cada pozo, asegurándose de que este sea congruente ambiental, operativa y económicamente.

Tras analizar técnicamente el desempeño de los equipos convencionales (Rig) y los equipos rigless se determina que su uso es indistintamente aplicable a las operaciones de abandono siempre y cuando las condiciones operativas permitan la implementación de equipos rigless. En términos económicos, las operaciones rigless son mucho más baratas, pero limitadas por las condiciones operacionales como pozos arenados o con sistemas de levantamiento artificial tal como se menciona anteriormente.

El enfoque requerido para la evaluación de las operaciones de abandono de pozos, debe ser capaz de comparar cualitativa y cuantitativamente la eficiencia de los distintos materiales que constituyen una barrera de abandono, buscando así establecer una longitud óptima que incremente la eficiencia económica de los procesos involucrados.

El método empleado para el abandono de pozos usado en Caño Limón, aunque cumple con la mayoría de los lineamientos descritos en este documento, es susceptible a mejorarse mediante la implementación de un sistema de cemento – resina, o el uso de una lechada aditivada como la propuesta; además, agregar controladores de pH al lodo de abandono prolonga la vida del revestimiento del pozo, aumentando la confiabilidad de la operación de abandono.

7. RECOMENDACIONES

Reevaluar la composición de la lechada de cemento Portland clase G como material constituyente de los tapones empleados para el aislamiento de fluidos de yacimiento, reemplazándolo por un sistema cemento – resina o una lechada diseñada para el abandono de pozos.

Evaluar económicamente las alternativas propuestas para reemplazar el cemento Portland clase G, de forma tal que se logre identificar aquella que permita optimizar este aspecto de la operación.

Asegurar la integridad de los elementos mecánicos usados en las operaciones de abandono, estableciendo buenas prácticas para el almacenamiento y transporte de los mismos, así como adquirirlos con distribuidores confiables.

Reevaluar las operaciones de asentamiento de tapones usando Dump Bailer, incorporando prácticas como evitar el yo-yoing, mantener una relación entre el ID del revestimiento y el OD del Dump Bailer lo mayor posible, verter el cemento a no más de un pie de distancia del tapón, entre otras.

Evaluar la viabilidad de efectuar múltiples corridas de Dump Bailer a fin de aumentar la longitud de los tapones de cemento asentados mediante este método.

Analizar económica y operativamente la implementación de unidades de E-Line, para el asentamiento de tapones usando Dump Bailers.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). Environmental Guidance Document: Well Abandonment and Inactive Well Practices for U.S Exploration and Production Operations. API bulletin E3. Primera Edición. Washington DC, Estados Unidos. 1993.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). Isolating Potential Flow Zones During Well Construction. API standard 65 – Part 2. Segunda Edición. Washington DC, Estados Unidos. 2010.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). Recommended Practice For Testing Well Cements. API RP 10B. Duodécimo Segunda Edición. Washington DC, Estados Unidos. 1997.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). Recommended Practice On Determination Of Shrinkage And Expansion Of Well Cement Formulations At Atmospheric Pressure. ANSI/API RP 10B-5. Primera Edición. 2005.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). Specification For Cements And Materials For Well Cementing. API specification 10A. Duodécimo segunda edición. Washington DC, Estados Unidos. 1995.

BAKER HUGHES INC. Technical Unit Baker Hughes Service Tools and Remedial Systems, “N-1™ And NC-1™ Bridge Plugs And Wireline Adapter Kit. 2011.

JAMES WALKER Ltd. Elastomer engineering guide. <www.jameswalker.biz/cn/pdf_docs/148-elastomer-engineering-guide>. [Citado el 10 de Marzo de 2016]

NORSOK: NORSK SOKKELS KOUNLURANSEPOSISJON (Norwegian Petroleum Industry Standards). Well Integrity In Drilling And Well Operations. NORSOK Standard D-010. Tercera revisión. Noruega. 2004.

OIL & GAS UK. Guidelines For The Suspension And Abandonment Of Wells. Londres, Inglaterra. Cuarta Edición. 2012.

PARCEVAUX, P.A. y SAULT, P.H. Cement Shrinkage And Elasticity: A New Approach For A Good Zonal Isolation. 59th Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas, Estados Unidos. 1984. SPE 13176.

RIVERO, T; DOMINGUEZ, J; SLATER, A. y HEARN, L. Cano Limon Field, Colombia: The Latest Giant Oil Reservoir In South America. Journal of Petroleum Technology. 1988. SPE 15566.

SINGH, Ramesh. Cast Iron En: Applied Welding Engineering: Processes, Codes, and Standards. Chapter 7 – Cast Iron. Segunda Edición. 2016. p. 57-64.

SMITH, R.C; BEIRUTE, R.M. y HOLMAN, G.B. Improved Method Of Setting Successful Cement Plugs. IADC/SPE Drilling Conference. New Orleans, Estados Unidos. 1984. SPE 11415 PA.

VIJIN, P. y FRABOULET, B. Improved Cement Formulations For Well Abandonment. Offshore Mediterranean Conference and Exhibition. Ravenna, Italy. 2001. OMC-2001-077.

WHITE, W. S; CALVERT, D. G; BARKER, J. M. y BOUR, D. L. A Laboratory Study Of Cement And Resin Plugs Placed With Thru-tubing Dump Bailers. 67th Annual Technical Conference and Exhibition. 1992. SPE 24574.

YAMASAKI, T; HARA, M. y TAKAHASHI, C. Static And Dynamic Tests On Cement-grouted Pipe-to-pipe Connections. Annual OTC. Houston, Texas. 1980. OTC 3790.4

ANEXO 1:

DISEÑO Y OPERACIÓN DE ABANDONO DE POZOS RIGLESS CON EL MÉTODO CIBP

El siguiente esquema, resume los pasos básicos necesarios para diseñar y ejecutar una operación de abandono de pozos Rigless con el método CIBP en concordancia con lo establecido en el capítulo 3 del documento.

1. ALCANCE

Aplica para el diseño y ejecución de las operaciones de abandono de pozos rigless desarrolladas con el método CIBP (Cast Iron Bridge Plug).

2. REQUERIMIENTOS PREVIOS AL DISEÑO DEL P&A

2.1. Identificar Puntos Críticos:

Identifique los siguientes puntos críticos: nivel freático, profundidad y espesor de acuíferos de agua dulce, además de la profundidad y espesor de zonas productoras.

2.2. Revisar el historial del pozo y la información disponible:

Revise el historial de intervenciones del pozo en busca de sucesos (colapsos, pegas, recañoneos, toçadas de fondo, pérdidas de fluido, cementaciones remediales, aislamientos de zonas, presencia de crossflows, arenamientos, rectificaciones del revestimiento, pescados, tope de liners, presencia de depósitos de asfaltenos o parafinas, entre otros) que le permitan tener un panorama de la integridad actual del pozo. Adicionalmente, se debe poseer toda la información existente del pozo, principalmente registros CBL, CCL, GR y de calibración, los cuales son fundamentales a la hora de diseñar la operación de abandono.

2.3. Generar el estado mecánico actual del pozo:

Es de suma importancia poseer un estado mecánico del pozo que refleje la condición actual del mismo, incluyendo todos aquellos puntos que puedan llegar a generar dificultades durante la operación de abandono.

2.4. Establecer las condiciones naturales del yacimiento y los máximos valores históricos de estas:

Determine a partir de la data histórica de producción, o de cualquier otro medio disponible, las condiciones actuales del yacimiento: presión, GOR, BSW, presencia de H₂S, CO₂ y/o mercaptanos. Igualmente, determine la máxima presión efectiva en fondo que se ha registrado históricamente en los pozos productores del yacimiento; si el pozo candidato para abandono es o fue un pozo inyector, emplear la máxima presión de inyección efectiva en fondo. Cabe resaltar la necesidad de evaluar la conectividad hidráulica que un pozo productor pueda llegar a tener con inyectores mediante pruebas de interferencia, haciendo factible o no la transmisión de transientes de presión entre ambos, afectando así el diseño del abandono.

3. DISEÑO DE LA OPERACIÓN DE ABANDONO

3.1. Operaciones de acondicionamiento del pozo para el abandono:

Si el pozo presenta problemas como colapsos del casing, depósitos de parafinas, asfaltenos o carbonatos, washouts en el casing, cemento de calidad pobre detrás del revestimiento o cualquier otra situación que comprometa la integridad y el correcto desempeño del wellbore frente a la mitigación de la migración de fluidos, esta debe ser rectificadas previamente al abandono permanente del pozo haciendo uso de cementaciones remediales, casing patch, raspadores o cualquier otra tecnología que permita asegurar un aislamiento de fluidos eficiente y longevo.

3.2. Número y ubicación de barreras:

- Seleccione el número de barreras según la cantidad de puntos críticos que haya identificado y la distribución de estos.
- Diseñe la operación de abandono con un mínimo de dos barreras que eviten el flujo de fluidos a través del wellbore, excluyendo al tapón de superficie.
- Por defecto, siempre debe dejar un tapón en superficie de al menos 50 pies de longitud.
- Ubique una barrera aproximadamente a 50 pies encima de los perforados más someros y otra debajo del acuífero de agua dulce más profundo, en caso de que no haya presencia de acuíferos, se debe ubicar una barrera debajo del nivel freático.
- La barrera más próxima a los perforados deben ubicarse en zonas con una resistencia compresiva del cemento mínima de 1500 psi, según lo establecido en el *API Specification 10A*, haciendo uso de la tabla contenida en el anexo 3 para interpretar los valores del CBL, o

su homóloga según la empresa contratista que haya tomado el registro; en caso de no contar con zonas con esta calidad de cemento se debe planear una cementación remedial.

- Para el caso particular de las barreras mecánicas, estas no deben ser asentadas cerca a collares del revestimiento, deben ubicarse lo más cercano posible a la mitad de la junta. Esto se debe diseñar y confirmar haciendo uso de registros GR-CCL de correlación.
- Si se presentan zonas con crossflow, se recomienda ubicar una barrera en medio de estas que evite este fenómeno.

3.3. Características de las barreras:

3.3.1. Barreras Mecánicas:

- Las barreras mecánicas deben ser de Cast Iron y tener una capacidad de tolerancia a presiones diferenciales de al menos 1.5 veces la máxima presión efectiva en fondo registrada históricamente en el yacimiento.
- El elastómero debe ser capaz de resistir el rango de presiones y temperaturas de fondo sin comprometer su integridad operativa. Adicionalmente debe evaluarse la resistencia de estos frente a los fluidos que puedan llegar a estar presentes en el yacimiento como el gas, H₂S, CO₂ y mercaptanos; en caso de existir incompatibilidad de cualquier elastómero frente a estos, se debe rechazar el uso de barreras mecánicas en operaciones de P&A y considerar el uso de metodologías alternas al CIBP.

3.3.2. Barrera de Cemento / Resina:

- La longitud mínima requerida de estas barreras debe ser diseñada en base al Shear Bond Approach expuesto en el capítulo 3.
- Estas deben estar compuestas por materiales que sean compatibles con los fluidos de yacimiento.
- Las barreras se deben diseñar de tal manera que se expandan o en su defecto, que no se encojan, durante el proceso de fraguado.
- La permeabilidad de estas barreras debe ser esencialmente de cero.

3.4. Características del fluido de abandono:

- El fluido de abandono (lodo o salmuera) debe ser diseñado con una densidad tal que la columna hidrostática generada por el mismo, a la profundidad del tope de los perforados, balancee la presión diferencial a la que está sometida la barrera.

$$Ph = 0.052 * TVD * MW$$

- Debe contener bactericidas y controladores de pH que mantengan la alcalinidad del fluido e inhiban el crecimiento bacteriano de manera prolongada.
- Nunca se debe emplear agua como fluido de abandono.
- El fluido debe tener las características adecuadas que le permitan mantener en suspensión el material densificante.

3.5. Equipos y herramientas de superficie:

Además de los equipos y herramientas establecidos según las políticas HSE de la empresa operadora (extintores, kits de primeros auxilios, cinta de señalización, etc.), se requiere de los siguientes equipos y herramientas para realizar la operación de abandono de pozos rigless con el método CIBP:

- Equipo de cierre en cabeza de pozo (Control Valve, según especificaciones de diámetro del casing)
- Equipo de mezclado de cemento (es indistinto su diseño o especificación)
- Balanza de lodos atmosférica
- Dump Bailer
- Back Pressure Valve
- Bridge Plugs
- Anillo de Calibración (Gauge Ring)

3.6. Unidades de superficie:

Se requieren las siguientes unidades para la realización de un abandono de pozos rigless con el método CIBP:

- Unidad de E-Line (dedicación parcial a la operación)
- Unidad de Slick-Line (dedicación parcial a la operación)
- Grúa telescópica (dedicación completa a la operación)

4. EJECUCIÓN DE LA OPERACIÓN DE ABANDONO

4.1. Control de pozo y bombeo del fluido de abandono:

De ser posible, previo a la operación de abandono, monitoree el nivel de fluido y la presión en cabeza de pozo.

Para que el pozo pueda ser abandonado exitosamente de manera rigless, no debe tener instalada ninguna sarta.

4.1.1. Haciendo uso de los datos de nivel de fluido y de presión en cabeza de pozo, controle el pozo empleando el método de Bull Heading,

bombeando fluido de abandono a través del Cup del X-Mass Tree; en caso que no se pueda aplicar este método debido a que la formación no admite fluido, se debe suspender la operación y rediseñar la operación de abandono.

4.1.2. Tome y descargue la presión en cabeza de pozo, Instalar Back Pressure Valve.

4.1.3. Retire X-Mass Tree e instalar Control Valve

4.2. Asentamiento de tapones:

4.2.1. Ice poleas con ayuda de la grúa y armar equipo de calibración de pozo

4.2.2. Calibre el pozo con el Anillo de Calibración según el diámetro del revestimiento.

4.2.3. Arme la sarta de asentamiento de los tapones con la unidad de E-Line, según las especificaciones del Bridge Plug.

4.2.4. Baje y asiente el Bridge Plug a la profundidad de asentamiento diseñada; corroborar la posición con ayuda del registro de correlación y las lecturas de GR y CCL.

4.2.5. Retire la herramienta de asentamiento (Setting Tool).

4.2.6. Arme la sarta de Slick-Line con el Dump Bailer.

4.2.7. Prepare la cantidad de cemento / resina requerida según el diseño del abandono, la capacidad del Dump Bailer y de la capacidad de la unidad de Slick-Line. Deje testigos de fraguado en superficie que le permitan monitorear el comportamiento del fluido.

4.2.8. Llene el Dump Bailer y bajelo con cuidado hasta estar a un pie encima del Bridge Plug previamente asentado.

4.2.9. Descargue el Dump Bailer a máximo un pie de distancia del Bridge Plug, evite mover el Dump Bailer verticalmente pues eso es contraproducente para la calidad del tapón; confirme la pérdida de peso en el indicador de la unidad de Slick-Line, equivalente al volumen de cemento contenido en el Dump Bailer; espere 5 minutos y retire la herramienta.

4.3. Verificación del asentamiento y aislamiento de los tapones:

4.3.1. Espere el tiempo de fraguado de diseño; monitoree los testigos de cemento o resina en superficie.

4.3.2. Toque fondo con ayuda de la unidad de Slick-Line; confirme que la profundidad coincide con la profundidad de asentamiento de los tapones.

4.3.3. Termine de llenar el pozo hasta tener el nivel en superficie; monitoree que no hayan cambios en el nivel de fluido.

4.3.4. Cierre el pozo en cabeza e inyecte fluido a presión; espere 15 minutos, si la presión no se mantiene en por lo menos un 90% durante ese tiempo suspenda la operación y replantee el diseño del abandono, de lo contrario descargue controladamente la presión y continúe según

lo planeado; se recomienda confinar una presión de 1000 psi en cabeza de pozo para realizar esta prueba.

Los puntos 5.2 y 5.3, junto con sus distintos componentes, deben repetirse según el número de tapones que se vaya a asentar. Al finalizar este proceso se debe proceder a dejar un tapón en superficie de al menos 50 pies de longitud.

La decisión de recuperar o no secciones de casing, secciones del cabezal u otras instalaciones que pueda llegar a tener el pozo, depende completamente de la empresa operadora, pero se debe tener en cuenta las consideraciones especiales que debe tener el diseño de abandono una vez se realizan estos procedimientos.

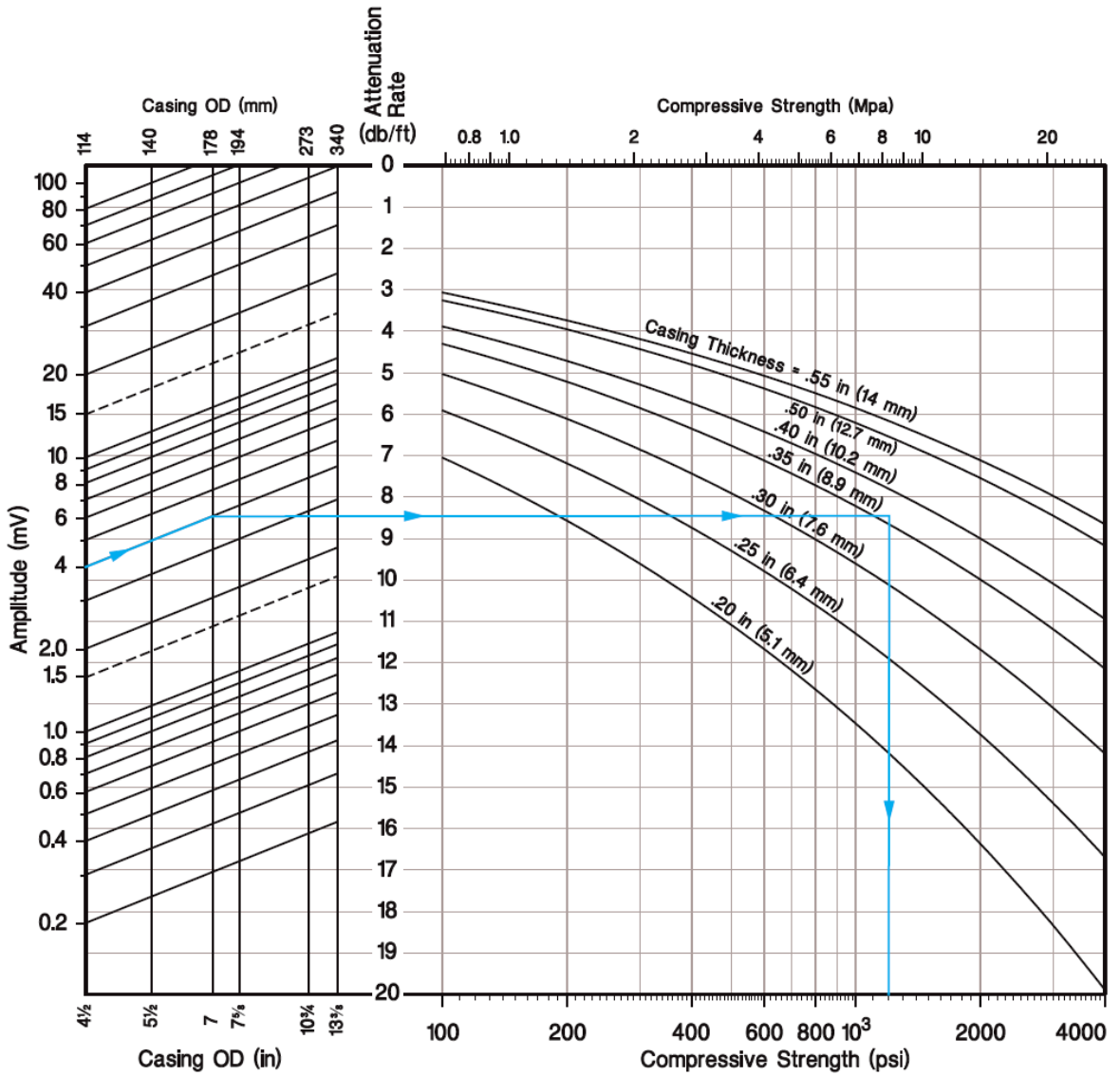
Posterior a esta operación de abandono, se debe proceder a realizar las operaciones de:

- Desmantelamiento de las facilidades de superficie del pozo y obras civiles.
- Recuperación y remediación ambiental.
- Instalación de la placa de abandono.

ANEXO 3

CARTA DE INTERPRETACION DE CBL DE HALLIBURTON

Cement Bond Log Interpretation Chart
3 Foot (914.4 mm) Transmitter to Receiver Spacing



CARTA: CBL-1 (CARTA DE INTERPRETACIÓN DE REGISTROS CBL: 3 ft (914.4-mm) DE ESPACIO)

1. **Aplicación:** Determinación de la Resistencia compresiva del cemento a partir de medidas de amplitud acústica
2. **Nomenclatura:**
 - a. A Amplitud de la medición acústica
 - b. OD_{CSG} Diámetro externo del revestimiento
 - c. h_{CSG} Espesor del revestimiento
 - d. a Tasa de atenuación acústica
3. **Data:** La herramienta de logging CBL tiene un espacio de tres pies entre el transmisor y el receptor.

$$A = 4 \text{ mV}$$

$$OD_{CSG} = 7 \text{ in}$$

$$h_{CSG} = 0.36 \text{ in}$$

4. **Hallar:** Resistencia compresiva del cemento.
5. **Procedimiento:** ya que el espacio entre el transmisor y el receptor en la herramienta de logging CBL es de tres pies, la tabla se puede utilizar.

Entre a la tabla con $A = 4 \text{ mV}$ en el eje de amplitud. Siga la curva de $A = 4 \text{ mV}$ hasta interceptar con $OD_{CSG} = 7\text{-in}$ en la línea de Casing OD. Luego proyecte horizontalmente hasta alcanzar la escala de tasa de atenuación estimándola en 8.5 dB/ft. Continúe horizontalmente hasta las curvas de Casing thickness, usando las curvas de 0.35 in y 0.40 in para estimar la ubicación de la curva de 0.36 in. Al cortar con la curva anterior proyecte una línea vertical hacia el eje de Compressive strength, estimando así la resistencia compresiva del cemento en 1200 psi.

Respuesta: La Resistencia compresiva del cemento es de 1200 psi.

ANEXO 4

FUTUROS ESTUDIOS

Se propone continuar el desarrollo de la metodología de diseño planteada en este documento haciendo uso de los ensayos de laboratorio para tener una concepción más clara del rol del Shear Bond Strength en el proceso de abandono de pozos y su potencial para optimizarlo. Así mismo dada la importancia en aumento que tienen estas operaciones, es necesario enfocar esfuerzos en entender de manera más clara cada uno de los fenómenos físicos involucrados en el aislamiento de las denominadas zonas críticas, para así poder diseñar barreras de forma más eficiente.

En aras de lograr lo anteriormente mencionado se propone:

1. Realizar pruebas de Hydraulic Bond a tapones de diferentes longitudes y diámetros para determinar el rol que el Shear Bond Strength tiene en la capacidad aislante de las barreras para abandono.
2. Desarrollar una clasificación de las operaciones de abandono y sus variaciones según parámetros del yacimiento y del estado mecánico del pozo.
3. Evaluar diferentes metodologías y materiales que pueden utilizarse para abandonar de manera eficiente un pozo.