



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“Desarrollo De Software De Apoyo Para La
Determinación De Parámetros En La Terminación De
Pozos Verticales”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO PETROLERO

PRESENTAN:

RIVERO ROMERO EDGAR JOSUÉ

SALMERÓN GOZÁLEZ MARCO ANTONIO

DIRECTOR DE TESIS:

ING.JOSÉ AGUSTÍN VELASCO ESQUIVEL



MÉXICO, DF.

2011



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION

Designación de sinodales de Examen Profesional

A los señores profesores:

Presidente	DR. RAFAEL RODRIGUEZ NIETO	<i>[Signature]</i> 25/11/2011
Vocal	ING. JOSE AGUSTIN VELASCO ESQUIVEL	<i>[Signature]</i> 25/11/2011
Secretario	ING. Q MARIA CRISTINA AVILES ALCANTARA	<i>[Signature]</i> 25/Nov/2011
1o. suplente	ING. LEONARDO CRUZ ESPINOZA	<i>[Signature]</i> 26/Nov/11
2o. suplente	ING. OSCAR OSORIO PERALTA	<i>[Signature]</i> 26/Nov/2011

Me permito informar a ustedes que han sido designados sinodales del Examen Profesional de los señores:

No. CUENTA	NOMBRE	CARRERA
30305293-5	RIVERO ROMERO EDGAR JOSUE	INGENIERO PETROLERO
09900405-3	SALMERON GONZALEZ MARCO ANTONIO	INGENIERO PETROLERO

quienes han concluido el desarrollo del tema que les fue autorizado . Ruego a ustedes se sirvan revisar el trabajo adjunto y manifestar a esta Dirección, si es el caso, la aceptación del mismo.

Con el fin de asegurar el pronto cumplimiento de las disposiciones normativas correspondientes y de no afectar innecesariamente los tiempos de titulación, les ruego tomar en consideración que para lo anterior cuentan ustedes con un plazo máximo de **cinco días hábiles** contados a partir del momento en que ustedes **acusen recibo de esta notificación**. Si transcurrido este plazo el interesado no tuviera observaciones de su parte, se entendería que el trabajo ha sido aprobado, por lo que deberán **firmar el oficio de aceptación del trabajo escrito**.

Doy a ustedes las más cumplidas gracias por su atención y les reitero las seguridades de mi consideración más distinguida.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D.F. a 24 de Noviembre de 2011.

EL DIRECTOR
Mtro. José Gonzalo Guerrero Zepeda

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos Marco Antonio Salmerón González

La tesis presentada esta dedicada a todas las personas que confiaron en mí, para aquellos que me brindaron su apoyo, su amistad, ánimo, compañía pero sobre todo que me abrieron las puertas de su corazón, con tal de poder concluir este ciclo de mi vida.

El esfuerzo, las lagrimas, las desveladas y el orgullo de no darme por vencido cuando todo parecía sombrío, se lo debo a las personas más importantes en mi vida, que con su infinito amor y apoyo incondicional me ayudaron a realizar este sueño, gracias por ser mis padres, les agradezco por estar conmigo siempre en los buenos y malos momentos.

Mama y Papa, si con este logro les regalo un poco de felicidad, no dudaría ni un segundo en realizarlo una y otra vez con tal de verlos felices, les prometo esforzarme más para que estén orgullosos de su hijo que los ama con todo el alma, no encuentro las palabras que expresen lo que siento, por lo que sólo puedo decirles gracias papás.

Les agradezco a mis hermanos por darme ánimos y mostrarme el camino, que si bien les costó trabajo recorrerlo, al ser el menor me facilitaron mucho las cosas evitándome caer en los mismos errores, gracias por estar siempre conmigo.

Les agradezco a mis amigos, que poco a poco se convirtieron en mis hermanos, gracias por ayudarme, y presionarme para dar lo mejor de mí, se que si no fuera por ustedes hubiera sido difícil lograr este sueño, sé que puedo confiar en ustedes y que estarán a mi lado cuando los necesite, este logro también es suyo.

Le agradezco a Josué por enseñarme el valor de la amistad y el valor de la perseverancia, gracias a Víctor por ser mi conciencia y mi guía, gracias a Diego por ser el amigo incondicional brindando su apoyo en todo momento y gracias a mis hermanitos Daniel, Pablo, Héctor, Daniel, Elisa, Ángel, Elizabeth que confiaron en mí aun antes de que yo confiara en mí mismo.

Agradecimientos *Marco Antonio Salmerón González*

Le agradezco a Sayuri por llenar ese vacío en mi corazón, porque con su apoyo, sus ánimos y al estar al pendiente de mi siempre, pude salir adelante tanto académica como personalmente gracias por ser mi inspiración.

Les agradezco a mis tías Lourdes y Vilma por haberme admitido en su hogar en uno de los semestres más difíciles, gracias por su apoyo.

Agradezco al Ing. Pablo Antonio de la Torre González por haber confiado en mi persona, por su tiempo y por la dirección de este trabajo. Al Ing. José Agustín Velasco Esquivel por el apoyo y las facilidades brindadas para la culminación de este proyecto. Al Dr. Rafael Rodríguez Nieto por su paciencia, por su apoyo dentro y fuera de las aulas y por ser un modelo a seguir en el ámbito profesional, a la Ing. Cristina Avilés Alcantara por la atenta lectura de este trabajo. Al Ing. Leonardo Cruz Espinoza por sus enseñanzas y por participar en la preparación de la tesis y, por último pero no menos importante, a la Ing. Oscar Osorio Peralta por aceptar colaborar en este proyecto.

Finalmente le agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por darme una formación profesional integral, y darme la herramientas que me ayudaran en el ámbito laboral, gracias por la oportunidad de pertenecer a esta memorable institución.

A Leticia, por su interminable amor...

*Con la esperanza de que este logro le retribuya
siquiera una pequeñísima parte de la dicha que me ha dado.*

Al Navia, por ser uno de los principales motivos para educarme y superarme; por soportar mi horrible carácter y por enseñarme a disfrutar más la vida.

A Mario, aun que con una forma poco común, lo aprecio mucho. Por ser una pieza clave en este proyecto de vida, gracias.

A la familia Rivera Romero, con infinito agradecimiento y orgullo de pertenecer a ustedes; por formarme, por mostrarme y hacerme sentir el valor de la familia y por todo su respaldo durante toda una vida.

A un pilar fundamental de este trabajo y de mi vida, por todo su apoyo, tiempo, paciencia y cariño; con profunda admiración, gracias Blanquis.

A mis primos Luis, Alejandro, Elva, Edna, Fati, Israel, Belém..., quienes además de primos, son mis grandes amigos.

"...Alguna veces no puedes lograrlo solo..."

A quienes me regalaron un nuevo concepto de "Amistad", por su paciencia, comprensión, cariño, por enriquecerme con su sabiduría y por haber estado a mi lado siempre que lo necesité, gracias Marco, gracias Víctor, gracias Diego.

Para aquellos con los que compartí más que un espacio, ¡la vida misma!, con sus alegrías, tristezas, retos, derrotas y triunfos, para Vera, Mau, Richi, Vero Palafox, Anel, Ángel, Marióni, Germen, Vampiro, Vero Ramirez...

Para mi amigo el Ing. Pablo Antonio de la Torre, por haberme mostrado una luz, el camino para llegar a ella y ayudarme en el trayecto.

Para ustedes familia Salmerón González, por abrirme más que las puertas de su hogar, las puertas de su amistad, confianza y cariño.

Con admiración, cariño y respeto para mis mentores y amigos del servicio social; por todas las enseñanzas, por explotar mi capacidad y por retarme para lograr una superación continua.

Por ampliarme la visión de mi entorno, por apoyarme sin condición y respaldarme desde hace años, con cariño sincero para el Sr. Armando Gómez.

*"De la ciencia y del corazón humano no existen límites...
el amor y la lógica nos mantienen limpios..."*

*A los profesores que dedicaron su dedicación y esfuerzo en mi formación profesional,
en especial al Dr. Rafael Rodríguez Nieto, Pablo Torres Sálmerón y Nery
Becerra Tapia.*

A mis sinodales, por su tiempo y atención dedicados a este trabajo.

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, por acogerme, formarme y
hacerme sentir la emoción de vivirla.*

*A mi país y a las personas que indirectamente colaboraron en este trabajo y
todo lo que ello conlleva.*

*No creas que me olvidé de ti,... siempre me acompañaste, gracias a ti tengo lo
que tengo y soy lo que soy; por todos los obstáculos y por las herramientas para
superarlos, por todo lo que me has dado y por el lugar que elegiste para mi por
haberme rodeado de personas y situaciones maravillosas , Gracias.*

Índice

<i>Índice</i>	<i>1</i>
<i>Introducción</i>	<i>7</i>
<i>Objetivo</i>	<i>7</i>
<i>Antecedentes</i>	<i>7</i>
<i>Capítulo I. Conceptos fundamentales</i>	<i>9</i>
<i>I.I Diseño de aparejos de producción</i>	<i>11</i>
<i>I.I.1 Ambientes corrosivos</i>	<i>11</i>
<i>I.I.2 Esfuerzos en la tubería de producción</i>	<i>11</i>
<i>I.I.3 Movimiento del aparejo de producción</i>	<i>14</i>
<i>I.II Diseño de empacadores</i>	<i>16</i>
<i>I.II.1 Clasificación de empacadores</i>	<i>16</i>
<i>I.II.2 Parámetros de selección</i>	<i>18</i>
<i>I.III Diseño de fluidos empacadores</i>	<i>21</i>
<i>I.III.1 Tipos de fluidos empacadores</i>	<i>22</i>
<i>I.III.2 Factores que afectan la velocidad de corrosión debido a fluidos empacadores</i>	<i>24</i>
<i>I.IV Diseño de disparos</i>	<i>25</i>
<i>I.IV.1 Factores que afectan la productividad de un pozo</i>	<i>26</i>
<i>I.V Lavado de pozo</i>	<i>31</i>
<i>I.V.1 Tipos de baches</i>	<i>31</i>
<i>I.V.2 Parámetros a considerar para el lavado de pozo</i>	<i>32</i>
<i>I.VI Estimulación de pozos</i>	<i>33</i>
<i>I.VI.1 Tipos de estimulación matricial</i>	<i>33</i>
<i>I.VI.2 Tratamiento de estimulación matricial</i>	<i>34</i>

I.VII Diseño para aislar intervalos probados	38
I.VII.1 Técnicas de aislamiento	38
I.VII.2 Criterios para la selección de la técnica a utilizar	39
I.VII.3 Consideraciones para colocar un tapón con éxito	39
I.VIII Molienda de empacadores	40
I.VIII.1 Operaciones del proceso de molienda	40
I.VIII.2 Consideraciones para la ejecución del proceso de molienda	41
I.VIII.3 Hidráulica en el proceso de molienda	42
<u>Capítulo II. Técnicas y formulario para el desarrollo del software</u>	<u>43</u>
II.I Diseño de aparejos de producción	43
II.I.1 Ambientes corrosivos	43
II.I.1.1 Presión parcial del H₂S	43
II.I.1.2 Presión parcial del CO₂	43
II.I.1.3 Combinación de sistemas H₂S- CO₂	44
II.I.1.4 Efecto de la temperatura sobre la corrosión	45
II.I.2 Esfuerzos en la tubería de producción	45
II.I.2.1 Esfuerzos uniaxiales	45
II.I.2.1.1 Presión interna	45
II.I.2.1.2 Tensión	46
II.I.2.1.3 Colapso	46
II.I.2.2 Esfuerzos triaxiales	48
II.I.3 Movimiento del aparejo de producción	51
II.I.3.1 Efecto de pistoneo	52
II.I.3.2 Efecto de baloneo (ballooning)	53
II.I.3.3 Efecto de pandeo (buckling)	54
II.I.3.4 Efecto de temperatura	55
II.I.3.5 Cambio de longitud total	55
II.II Efectos de presión sobre el empacador	56
II.II.1 Diferencial de presión en el empacador	56

<i>II.II.2 Cargas axiales</i>	57
<i>II.II.3 Temperatura a la cual estará trabajando el empacador</i>	57
<i>II.II.4 Fluidos producidos</i>	57
II.III Diseño de fluidos empacadores (salmueras)	58
<i>II.III.1 Salmuera simple</i>	59
II.IV Disparos	60
<i>II.IV.1 Determinación del tipo de formación</i>	61
<i>II.IV.2 Formaciones consolidadas</i>	61
<i>II.IV.3 Formaciones no consolidadas</i>	63
<i>II.IV.4 Aplicación del registro sísmico</i>	64
II.V Lavado de pozo	66
<i>II.V.1 Sarta de lavado</i>	66
<i>II.V.2 Tipo, posición y cantidad de baches</i>	66
<i>II.V.3 Volumen o longitud lineal de los baches</i>	67
<i>II.V.4 Presión diferencial máxima durante el desplazamiento</i>	68
<i>II.V.5 Ingeniería de fluidos</i>	68
<i>II.V.5.1 Propiedades y régimen de flujo de los baches</i>	68
<i>II.V.5.2 Velocidades anulares</i>	68
<i>II.V.5.3 Gasto mínimo de desplazamiento</i>	70
<i>II.V.5.4 Eficiencia de transporte</i>	70
<i>II.V.6 Nivel de turbidez (NTU)</i>	71
II.VI Estimulación matricial de pozos	72
<i>II.VI.1 Validación del pozo y del yacimiento propuesto</i>	72
<i>II.VI.2 Determinación y caracterización del daño</i>	73
<i>II.VI.3 Selección del sistema de fluidos para el tratamiento</i>	73
<i>II.VI.4 Cálculo de parámetros para la ejecución</i>	74
<i>II.VI.4.1 Diseño de tratamiento ácido en areniscas</i>	74
<i>II.VI.4.1.1 Selección de los fluidos de estimulación</i>	74
<i>II.VI.4.1.2 Determinación de la presión y gasto máximo de inyección</i>	74

ÍNDICE

II.VI.4.1.3 Fluido de prelavado (precolchón). Cálculo de volumen y tiempo de inyección	75
II.VI.4.1.4 Fluido de estimulación (sistema ácido). Cálculo de volumen y tiempo de inyección	76
II.VI.4.1.5 Fluido de desplazamiento. Cálculo de volumen V_3 y tiempo de inyección	79
II.VI.4.1.6 Incremento de productividad esperado	79
II.VI.4.2 Diseño de tratamiento ácido matricial en rocas calcáreas	80
II.VI.5 Consideraciones técnicas	80
II.VII Aislamiento de intervalos probados	82
II.VII.1 Procedimiento de cálculo para el sistema del tapón	82
II.VII.2 Consideraciones técnicas	84
II.VII Molienda de empacadores	86
II.VII.1 Caracterización y determinación de propiedades del fluido	86
II.VII.2 Velocidad de transporte vT	86
II.VII.3 Factor de transporte	90
II.VII.4 Tiempo de atraso	90
II.VII.5 Gasto crítico del fluido de reparación	90
Capítulo III. Desarrollo del software	93
III.I Generalidades del desarrollo	93
III.II Descripción del producto final: de_Terminación.PPV	98
III.II.1 Objetivo	98
III.II.2 Requerimientos mínimos del software	98
III.II.3 Arranque del software	98
III.II.4 Descripción de la barra general	100
III.II.5 Descripción de la barra de herramientas principal	100
III.II.5.1 Primera sección	100
III.II.5.2 Segunda sección	101
III.II.5.3 Tercera sección	102
III.II.6 Descripción de la pantalla de diseño	103
III.II.7 Diagrama de flujo general para de_Terminación.PPV	104

<i>III.II.8 Datos requeridos</i>	105
<u>Capítulo IV. Ejemplos de aplicación y resultados</u>	109
<i>IV.I Funciones y comandos</i>	110
<i>IV.I.1 Selección de una operación particular</i>	110
<i>IV.I.2 Selección de operaciones en la sección general</i>	111
<i>IV.I.3 Nuevo</i>	111
<i>IV.I.4 Guardar</i>	113
<i>IV.I.5 Abrir</i>	115
<i>IV.I.6 Ayuda</i>	117
<i>IV.I.7 Radio buttons</i>	118
<i>IV.I.8 Check box</i>	119
<i>IV.I.9 Combo box</i>	120
<i>IV.II Sección general</i>	120
<i>IV.II.1 Esfuerzos triaxiales</i>	120
<i>IV.II.2 Aparejo de producción, empaques, disparos y lavado de pozo</i>	127
<i>IV.III Sección particular</i>	135
<i>IV.III.1 Presión interna</i>	135
<i>IV.III.2 Movimientos en el aparejo: baloneo</i>	136
<i>IV.III.3 Movimientos en el aparejo: pandeo</i>	138
<i>IV.III.4 Colapso</i>	141
<i>IV.III.5 Aislamiento de intervalos (sistema del tapón)</i>	142
<u>Capítulo V. Discusión y conclusiones</u>	145
<u>Apéndice A. Caracterización reológica de fluidos</u>	147
<u>Apéndice B. Selección de herramientas de molienda</u>	153
<u>Apéndice C. Dimensiones y unidades</u>	161
<u>Bibliografía</u>	171

ÍNDICE

Introducción

Objetivo

Este trabajo pretende facilitar la forma en la que se realizan algunos procesos de la terminación de pozos verticales, mediante un programa de cómputo que calcule sus parámetros necesarios y además ayude a reducir los tiempos de cálculo, haciendo más eficiente el diseño de la terminación.

El software desarrollado en esta tesis nombrado “de_Terminación.PPV” también tiene el objetivo de permitir al usuario desarrollar escenarios de algunas de las principales operaciones realizadas en la terminación de pozos verticales, bajo distintas condiciones de diseño para poder seleccionar el mejor.

Por otro lado, se quiere demostrar la capacidad de los alumnos egresados de la Facultad de Ingeniería, para diseñar software ligeros, que ayuden a mejorar el desempeño del ingeniero o alumno que los utilicen.

Antecedentes

Los programas de cómputo dentro de la industria petrolera han facilitado los procesos que se llevan a cabo dentro de las áreas como producción, simulación, terminación, etc. El uso de software es de gran importancia, pues debido a la complejidad de los cálculos, este tipo de herramientas son indispensables para aligerar la labor del ingeniero.

Debido a la demanda de sistemas de cómputo en la industria petrolera, es necesario hacer notar que las nuevas generaciones de ingenieros petroleros son capaces de desarrollar sistemas de cómputo que puedan llegar a sustituir a sistemas comerciales, generando beneficios económicos a la industria. Otra ventaja de desarrollar un software, es que este se adapta a las necesidades del diseñador y no a la inversa como sucede actualmente.

Lo que pretendemos con este programa es, como ya se mencionó, facilitar el cálculo de parámetros necesarios para una terminación de pozo, proporcionando al ingeniero y al alumno un apoyo para la realización de sus actividades.



Capítulo I. Conceptos fundamentales

La terminación de pozos consiste en la ejecución de una serie de procesos y/o instalación de accesorios dentro del pozo, con el objetivo de conducir o inyectar fluidos de las formaciones a la superficie o viceversa.

La terminación de un pozo petrolero es un proceso operativo, que se inicia después de cementar la última tubería de revestimiento de explotación y se realiza con el fin de dejar el pozo produciendo hidrocarburos o taponado¹.

El propósito primordial de la terminación de un pozo es prepararlo y acondicionarlo con el fin de obtener la producción óptima de hidrocarburos al menor costo, empleando técnicas y equipos adecuados para las características del yacimiento.

Hay dos clases de terminación: de explotación y de desarrollo, cada una de ellas se puede realizar tanto en agujero descubierto como en agujero ademado (**IMAGEN I.1**).

- ⊕ **Terminaciones en agujero descubierto.** Hoy en día estas se efectúan solamente en yacimientos con baja presión, en una zona productora donde el intervalo saturado de aceite y gas sea demasiado grande. Estas terminaciones son recomendables para formaciones calizas.
- ⊕ **Terminaciones con tuberías de revestimiento perforadas.** Actualmente es el mejor procedimiento para terminar un pozo. Pueden probarse indistintamente algunas zonas de interés y explotar varias al mismo tiempo.

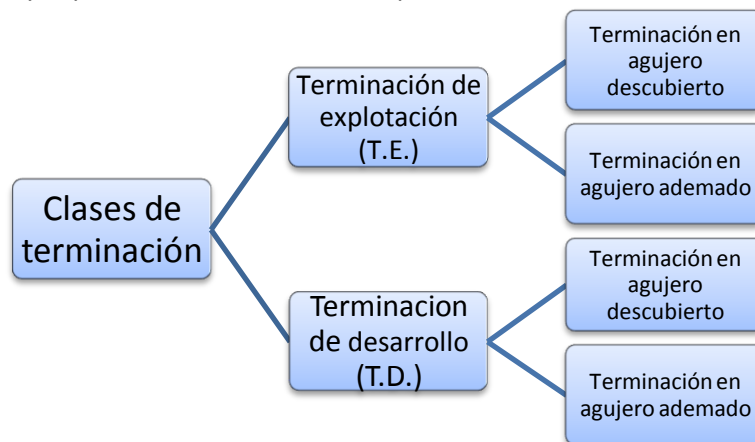


IMAGEN I.1.- Clases de terminación

¹ Rasso, Z.C: "Un siglo de la perforación en México"; Unidad de perforación y mantenimiento de pozos (UPMP); 2000.

Así como existen clases, también existen varios diseños de terminación; a continuación se mencionan algunas de ellas:

- Terminación sencilla con T.P. franca en agujero descubierto.
- Terminación sencilla con T.P., empacador y accesorios en agujero descubierto (AD).
- Terminación sencilla con T.R. Y T.P. franca.
- Terminación sencilla con tubería de revestimiento, tubería de producción, empacador y accesorios.
- Terminación sencilla selectiva con dos empacadores Y T.R.
- Terminación doble con dos T.P's y dos empacadores.
- Terminación doble selectiva con dos T.P's, empacador doble y dos sencillos.
- Terminación con bombeo electrocentrífugo.
- Terminación con bombeo neumático.
- Terminación con bombeo mecánico.

Cada terminación tiene sus ventajas y desventajas, las cuales varían en dificultad, costos, herramientas, y en la disponibilidad del equipo que se requiere para un cierto tipo de terminación, también es importante considerar el tiempo de la terminación y la experiencia del ingeniero de ésta área para la elección y desarrollo de algún tipo de terminación.

La terminación comprende varios procesos, de los cuales se vale para lograr su objetivo. Estos procesos que se mencionarán a lo largo de este capítulo, son la base para la realización de una herramienta de cómputo que permita desarrollar cálculos de manera sencilla y eficaz, ahorrando a los ingenieros tiempo y costos, además de facilitar la reproducción de diversos escenarios de operación para seleccionar el más conveniente.

Los siguientes son los procesos mencionados en el párrafo anterior.

- i. Diseño de aparejos de producción.
- ii. Diseño de empacadores de producción.
- iii. Diseño de fluidos empacantes.
- iv. Diseño de disparos.
- v. Lavado de Pozo.
- vi. Estimulación de pozos.
- vii. Diseño para aislar intervalos probados.
- viii. Diseño para la molienda de empacadores.

Los siguientes subcapítulos dan una reseña general de cada uno de los elementos mencionados.

I.I Diseño de aparejos de producción

I.I.1 Ambientes corrosivos

La corrosión puede ocurrir durante la vida productiva del pozo reduciendo el espesor de la tubería, produciendo pérdida de acero en ciertos lugares o picaduras (pitting). Este fenómeno se incrementa conforme aumenta la concentración de agentes corrosivos, tales como: oxígeno, ácido sulfhídrico (corrosión amarga) y bióxido de carbono (corrosión dulce). A continuación se describe brevemente como actúan algunos efectos de corrosión.

- ⊕ *Presión parcial del H₂S*: El ácido sulfhídrico (H₂S) es sumamente agresivo al acero, específicamente sobre aquellos de alta resistencia, por que produce una falla catastrófica por fragilización. Este fenómeno se acentúa conforme se incrementa el esfuerzo de la tubería (tensión) y la presencia de agua.
- ⊕ *Presión parcial del CO₂*: La corrosión por bióxido de carbono (CO₂) conocida como corrosión dulce y ocurre cuando el agua de formación tiene contacto directo con el acero, esto es crítico en pozos con alta fracción de agua.
- ⊕ *Efecto de la temperatura sobre la corrosión*: El incremento de temperatura produce una disminución en la resistencia a la cedencia de los tubulares; por tanto, un factor de corrección por temperatura tiene que ser aplicado para obtener un valor de cedencia más acertado.

I.I.2 Esfuerzos en la tubería de producción

El aparejo de producción es el medio por el cual se transportan los hidrocarburos desde el yacimiento hasta la superficie². Debe soportar íntegramente las presiones y los esfuerzos a que es sometido durante las operaciones de terminación y mantenimiento, tales como:

- Introducción y recuperación del aparejo (intervenciones).
- Inducciones.
- Pruebas de admisión.
- Estimulaciones.
- Fracturamiento.
- Control del pozo (reparación).
- Disparos e inicio de producción.

Entonces, el aparejo de producción está sujeto a varios esfuerzos los cuales deben ser conocidos bajo diferentes condiciones de operación.

² *Guía de diseño para aparejos de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*

Las propiedades mecánicas más importantes de un tubo de producción son: resistencia a la presión interna, colapso y tensión. Conforme al diseño, estas propiedades se tratan de forma uniaxial, biaxial y triaxial. Estas propiedades pueden estar actuando tanto en forma independiente como combinada. En la **IMAGEN I.2** se presenta una descripción de las tres propiedades.

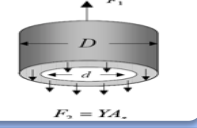
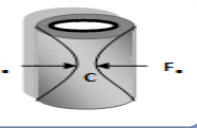
	<h3>Presión Interna</h3> <ul style="list-style-type: none">•Es la cantidad de presión aplicada dentro del tubo, misma que es soportada por la pared interna.
	<h3>Tensión</h3> <ul style="list-style-type: none">•Existe una La fuerza tiende a separar la tubería, pero lo impide la resistencia de las paredes del tubo, las cuales ejercen una contra fuerza.
	<h3>Colapso</h3> <ul style="list-style-type: none">•El colapso es definido como la fuerza generada para aplastar un tubo por efecto resultante de fuerzas externas.

IMAGEN I.2.- Esfuerzos a los que se encuentra sometida la tubería de producción.

En seguida se describen las tres formas en que se presentan los esfuerzos a los que se encuentra sometida la tubería: uniaxial, biaxial y triaxial.

Esfuerzo Uniaxial: Este efecto asume que no hay carga axial (tensión o compresión) en la tubería al mismo tiempo que es aplicada una carga de presión interna o colapso.

Existen diferentes tipos de colapso, pues la resistencia al colapso consiste de cuatro regímenes de colapso (**IMAGEN I.3**), que se determinan con base en la resistencia a la cedencia del material y a la relación D/t (diámetro externo entre espesor de la tubería, también llamada “esbeltez”), y son definidos según el tipo de falla:

1. Colapso de cedencia.
2. Colapso plástico.
3. Colapso de transición.
4. Colapso elástico.

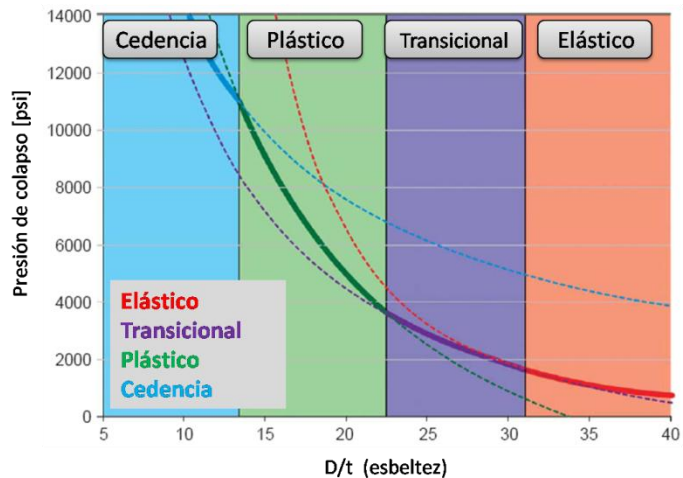


IMAGEN I.3.-Presión de colapso en función de la esbeltez

1.- *Colapso de cedencia*: No es un colapso verdadero, es dependiente de la cedencia del material y del espesor de la tubería, se presenta en tuberías cuya relación es $D/t < 15$.

2.- *Colapso plástico*: Se basa en 2, 488 pruebas, y de acuerdo a un análisis de resultados todas las tuberías fallaron al aplicarles una fuerza de colapso mayor a la presión de colapso mínima.

3.- *Colapso de transición*: La mínima presión de colapso en la zona de transición entre la falla plástica y la elástica.

4.- *Colapso elástico*: Se basa en la teoría de falla por inestabilidad elástica. Este criterio es independiente de la resistencia a la cedencia y es aplicable a espesores de pared delgados ($D/t > 25$).

Esfuerzos Biaxiales: Estos consideran el cambio en la resistencia al colapso y presión interna debido a la tensión o compresión del aparejo, ya que en condiciones reales, la tubería de producción estará bajo la acción combinada de las presiones interna, externa y tensión debido al propio peso de la tubería. En la **IMAGEN I.4** se presentan una relación de la compresión y la tensión con el colapso y la presión interna.

TENSIÓN
Reduce resistencia al colapso (-)
Incrementa resistencia a la presión interna (+)

COMPRESIÓN
Incrementa resistencia al colapso (+)
Reduce resistencia a la presión interna (-)

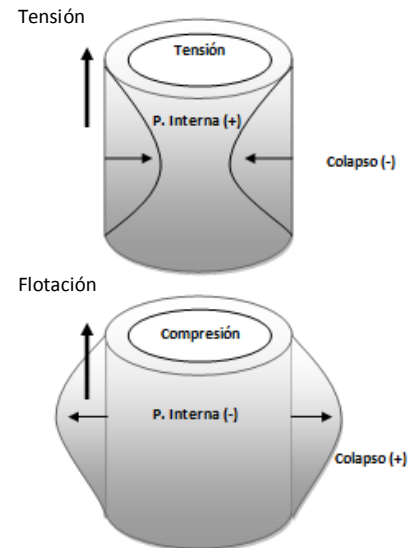


IMAGEN I.4.- Esfuerzos de colapso y presión interna relacionados con la tensión y compresión³

³ *Apuntes de ingeniería de perforación de pozos impartido por el ingeniero José Agustín Velasco Esquivel, semestre 2010-1.*

Esfuerzos Triaxiales: Estos consideran que en cada elemento de acero en la tubería actúan tres esfuerzos sobre su superficie: el esfuerzo axial, radial y tangencial (**IMAGEN 1.5**). La única diferencia entre el concepto triaxial y el biaxial es que el segundo considera el esfuerzo radial igual a cero.

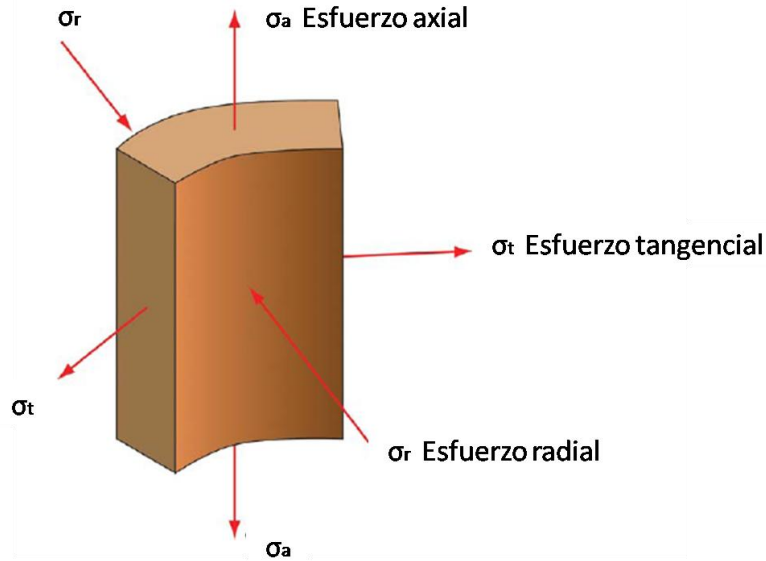


IMAGEN 1.5.- Esfuerzos que actúan en el efecto triaxial⁴

1.1.3 Movimiento del aparejo de producción

Como consecuencia de los efectos axiales, biaxiales, triaxiales, el aparejo de producción tendrá una serie de movimientos que pueden llegar a deformar la tubería seriamente, evitando la producción del pozo, por lo tanto es importante un buen diseño tomando en cuenta todos los cambios de presión y temperatura que pudieran presentar.

El cambio de longitud del aparejo, originado por cambios de presión y temperatura, puede ser positivo o negativo y generar grandes esfuerzos en la tubería y/o empacador cuando éste no permita el libre movimiento de la tubería.

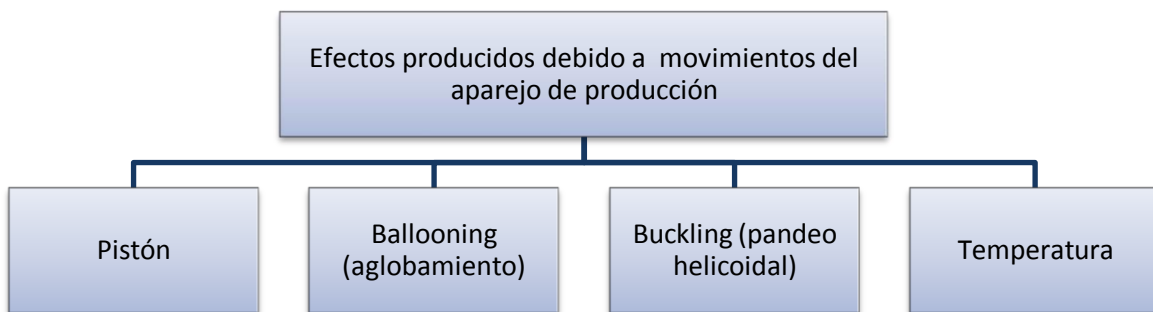


IMAGEN 1.6.- Relación de efectos producidos debido a los movimientos del aparejo

⁴ Jonathan Bellarby; " Well completion design"; Elsevier;2009.

Pistón: El efecto de pistón se basa en la ley de Hooke, Este efecto es producido por la aplicación de presión sobre un área expuesta, el cual puede causar elongación si la diferencial de presión es mayor arriba del empacador ó contracción si la diferencial de presión es mayor bajo el empacador, lo cual significa que esta presión está actuando en la sección transversal de los sellos multi-v ó zapata guía e intenta comprimir el aparejo de producción.

Balaneo (ballooning): Cuando la presión interna en un aparejo de producción es mayor que la presión externa, los esfuerzos radiales que actúan sobre la pared generan una expansión (balaneo) del tubo, este fenómeno causa una contracción longitudinal del aparejo. Cuando la presión exterior es mayor que la presión interna, se presenta el efecto contrario y se produce una elongación de la tubería.

Pandeo helicoidal (buckling): Se presenta cuando hay un incremento de presión en el interior de la tubería de producción, la cual actúa en el área transversal de la parte inferior de un aparejo que tiene movimiento libre, es decir, los sellos multi-v se pueden mover a través del área pulida del empacador. Este efecto acorta el aparejo de producción y el pandeo se produce del punto neutro hacia abajo. El punto neutro es donde el esfuerzo axial es igual al esfuerzo tangencial y radial, es decir, el valor de los tres esfuerzos es igual. El pandeo helicoidal es importante, ya que puede ocasionar de formación permanente del aparejo.

Temperatura: El efecto de la temperatura produce un cambio de longitud de la sarta de producción. Ésta se contrae cuando existe inyección de fluidos a temperatura de superficie, en el caso de calentamiento del aparejo de producción, ya sea por las condiciones de producción o por la inyección de fluidos calientes, se genera una elongación.

Debido a los efectos mencionados, cuando se diseña una terminación con el aparejo de producción libre al movimiento, se requiere introducir una “longitud de sellos multi-v” que permita absorber las elongaciones y contracciones generadas en la tubería.

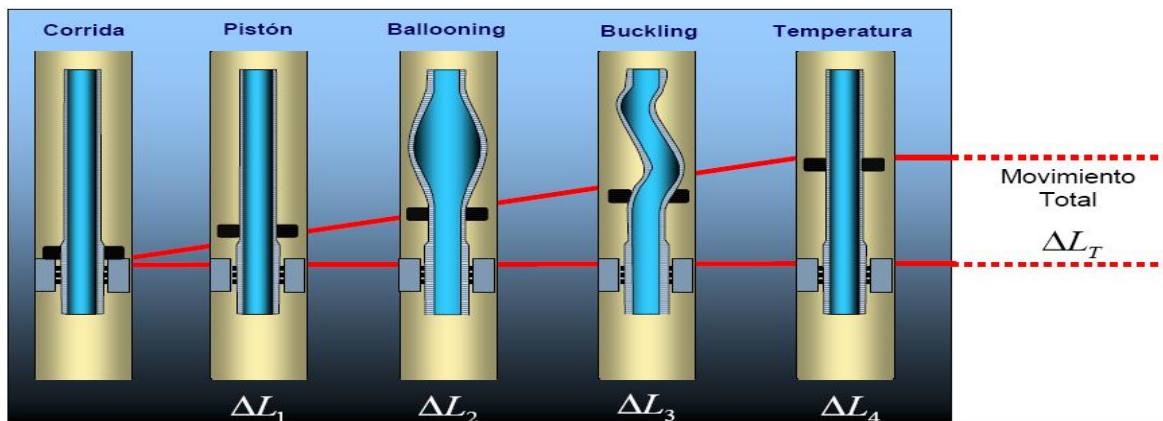


IMAGEN I.7.- Relación de movimiento del aparejo con los efectos de pistoneo, balaneo (buckling), pandeo (ballooning) y temperatura.⁵

⁵ Guía de diseño para aparejos de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).

I.II Diseño de empacadores

El empacador es un accesorio empleado para sellar la parte exterior del aparejo de producción y la parte interior de la tubería de revestimiento ó de explotación.

El diseño de empacadores ayudará a calcular el número de sellos multi-v que se tienen que utilizar para absorber los cambios de longitud en la tubería que se dan debido a la presión y temperatura. Este se complementa con diversas herramientas, las cuales se muestran en la **IMAGEN I.8.**

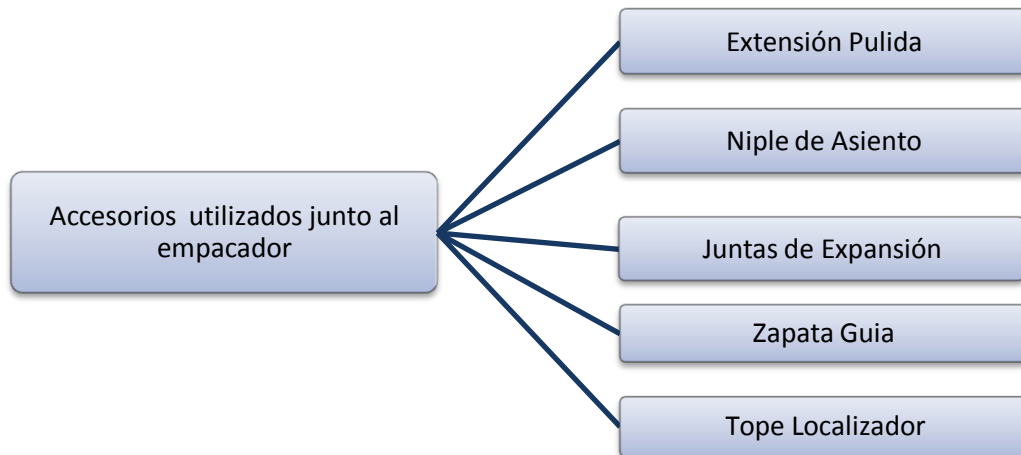


IMAGEN I.8.- Accesorios utilizados junto al empacador

Las funciones principales de un empacador son:

- Proteger el revestimiento de la presión del yacimiento y de operaciones tales como estimulación ó fracturamiento.
- Evitar el contacto entre los fluidos producidos y el revestimiento.
- Aislar zonas con daño ó perforaciones re-cementadas.
- Mantener un fluido empacador en el espacio anular.

I.II.1 Clasificación de empacadores

Los empacadores de producción se clasifican en permanentes ó recuperables.

Los empacadores permanentes quedan fijos a la tubería de revestimiento mediante cuñas de acción opuesta, su recuperación requiere la molienda de los mismos.

Los empacadores recuperables son diseñados para ser anclados y desanclados después de cierto tiempo para su recuperación, estos son acondicionados para utilizarse en una nueva intervención, teniendo la misma función que un empacador permanente.

Los elementos principales de un empacador son:

- a) Elementos de sello.- Su función es generar un sello entre el empacador y la tubería de revestimiento.
- b) Cuñas.- Se incrustan en la tubería de revestimiento para fijar esta con el empacador y así evitar el movimiento de este, además permiten la aplicación de peso y tensión para comprimir el elemento de sello.
- c) Conos.- Sirve como un expansor para forzar las cuñas hacia la tubería de revestimiento, también sirven como soporte a los elementos de sello.
- d) Cuerpo del empacador.- Se encuentra en la parte interior del empacador, la cual forma un sello con las unidades de sellos multi-v impidiendo el flujo entre el empacador y el aparejo de producción y mantiene unidos todos los componentes de la herramienta.

La matriz de carga de un empacador provee las bases para evaluar los efectos simultáneos de, presión diferencial y cargas axiales.

Las bases (matriz de carga) para evaluar los efectos simultáneos de presión diferencial y carga axial son representadas en la **IMAGEN I.9**:

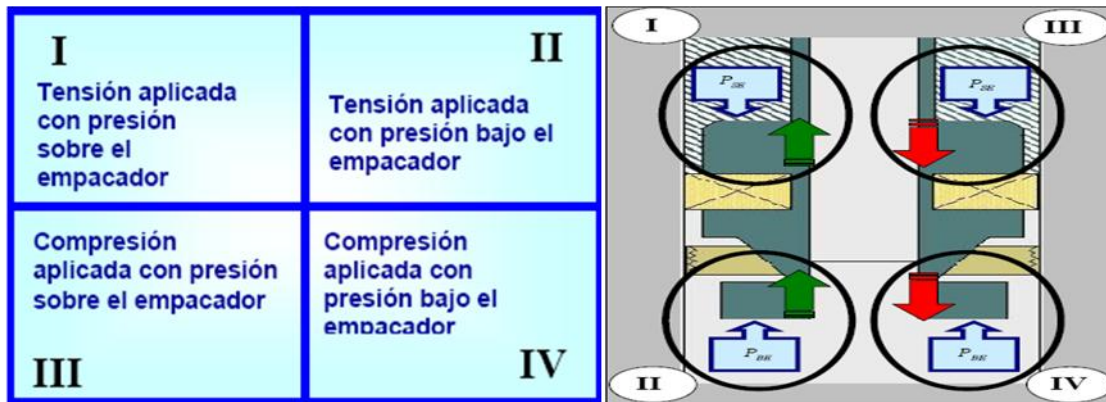


IMAGEN I.9.- Esfuerzos aplicados sobre y debajo del empacador⁶

El ingeniero de terminación tiene que tener en cuenta los cuatro cuadrantes de condiciones de carga junto con los modos ó tipos de falla, por lo tanto se requiere la una envolvente de desempeño, esta varia respecto al diámetro y libraje de la T.R.

La envolvente de desempeño: Representa los límites de resistencia de un empacador cuando es sometido a cargas combinadas, es decir, cuando los valores de presión y esfuerzo axial se encuentran dentro del área, el empacador esta dentro de sus rangos de operación, de lo contrario cuando estos valores están fuera de la envolvente, se puede presentar la falla de alguno de los componentes.

⁶ *Guía de diseño para empacadores de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*

I.II.2 Parámetros de selección

Dentro de los parámetros de selección que se deben tener para un empacador, es muy importante tener en cuenta: a) la diferencial de presión, b) cargas axiales, c) temperatura y d) fluidos producidos.

a) **Presión diferencial:** Es generada por las presiones que existen arriba y abajo del empacador, generadas principalmente por:

- ⊕ *Inducción:* Durante la inducción se desplaza el fluido de terminación ó fluido producido por el yacimiento por nitrógeno, por lo regular este proceso se realiza con el auxilio de la tubería flexible.
- ⊕ *Prueba de admisión:* La prueba de admisión es realizada mediante el represionamiento del sistema con la finalidad de conocer el valor de presión en el que la formación cede a la admisión de fluido.
- ⊕ *Estimulación/fracturamiento:* Las operaciones de estimulación ó fracturamiento involucra la inyección de fluidos con el objetivo general de mejorar las condiciones de permeabilidad.

La presión diferencial es soportada por el sello generado entre el elemento sellante y la tubería de revestimiento, así como por los sellos multi-v con el cuerpo del empacador.

El empacador de producción es sometido a presión diferencial durante las operaciones de terminación y reparación del pozo.

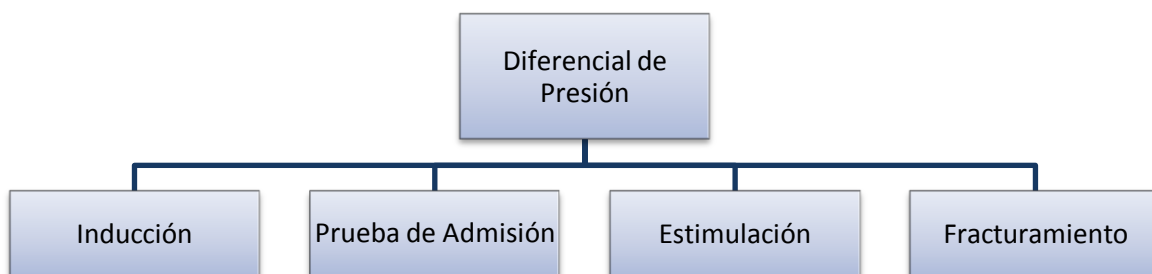


IMAGEN I.10.1.- Parámetros de selección de empacadores: Diferencial de presión

b) **Cargas axiales:** Se deben a esfuerzos generados por el movimiento del aparejo de producción y son transmitidos al empacador, en el que estos pueden causar tensión ó compresión dependiendo de las condiciones en cada operación.

Estas se presentan durante las operaciones de terminación y mantenimiento de los pozos (inducción, prueba de admisión, estimulación, fracturamiento y la vida productiva del pozo), la tubería de producción es sometida a diferentes condiciones de presión y a cambios de temperatura, generando esfuerzos en el acero los cuales se reflejan en la

contracción y elongación del mismo, causando un movimiento neto del aparejo de producción. El efecto de tensión ó compresión en el empacador, reduce su resistencia a la presión diferencial, llegando a causar la falla del empacador. Por lo tanto es substancial la determinación de los esfuerzos axiales a que será sometido el empacador. Los efectos que generan este fenómeno son Ballooning, Pistón, Buckling y Temperatura

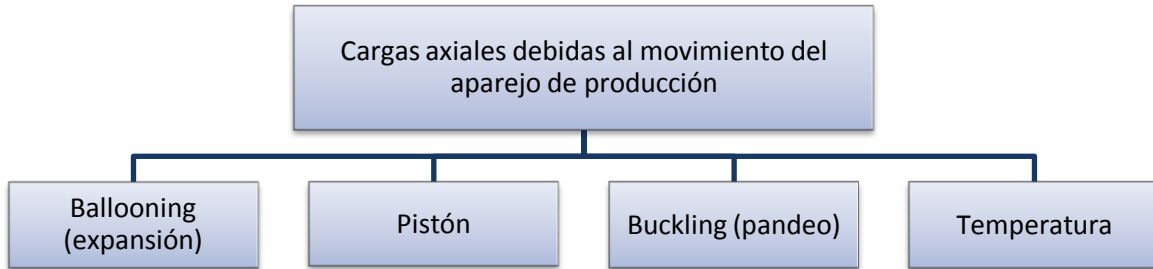


IMAGEN I.10.2.- Parámetros de selección de empacadores: Cargas axiales

- c) **Temperatura:** Este parámetro es fundamental para la selección de los elastómeros. La temperatura a la cual estará trabajando el empacador se determina a través del gradiente de temperatura del pozo (G_T).
- d) **Fluidos producidos:** Conocer la composición de los fluidos producidos es fundamental, pues se puede conocer el ambiente al cual será sometido el empacador permitiendo una selección adecuada de la metalurgia, esto es importante para determinar la corrosión esperada y los materiales que se recomiendan para los diferentes ambientes. Principalmente se deberá calcular la presión parcial del H_2S y la presión parcial del CO_2 , también deberá conocerse la salinidad del agua de formación y el pH del agua de formación.

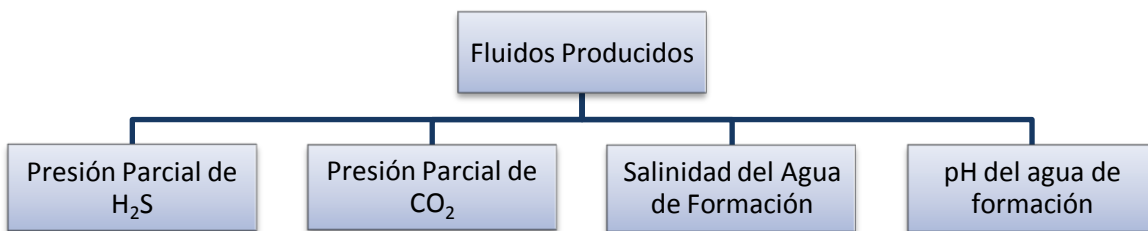


IMAGEN I.10.3.- Parámetros para la selección de empacadores: Fluidos producidos

Existen otros factores a considerar para la selección del empacador de producción: las condiciones del pozo, el procedimiento para correrlo y anclarlo, las intervenciones futuras, además de la envolvente de desempeño.

Dentro de las *condiciones del pozo se considera*:

- El diámetro interior de la T.R.- Los productos (o sus residuos) utilizados durante el proceso de perforación y terminación pueden adherirse a la tubería de revestimiento, lo que puede ocasionar un cambio en el diámetro interior, este cambio de diámetro a su vez puede provocar que el empacador se atore. Es por eso que se recomienda efectuar un viaje con escariador previo a la corrida del empacador.
- El fluido de terminación.- Se debe considerar el tipo de fluido tanto de terminación como el fluido empacador. En caso de que el fluido empacador sea un lodo de perforación los sólidos tenderán a precipitarse sobre el empacador, lo que en la mayoría de los casos produce el atrapamiento de este. Si el fluido fuera una salmuera, entonces se deberá tener compatibilidad entre esta y los elastómeros del empacador.
- Desviación y severidad.- En pozos con severidades muy altas ó “patas de perro” se tiene que considerar lo largo del empacador y sus accesorios.

En el *procedimiento para correr y anclar el empacador* se considera si esto debe hacerse mediante:

- Tubería de perforación
- Cable línea
- Tubería flexible
- Integral.

Para *intervenciones futuras* se considera si habrá:

- Reparaciones mayores
- Reparaciones menores
- Intervenciones sin equipo

Conocer si existirá una intervención en el futuro es un factor importante para considerar la conveniencia de colocar un empacador permanente o recuperable.

La *selección del empacador a partir de la envolvente de desempeño*.- Una vez conocidos los parámetros anteriores se debe solicitar a las compañías de servicio las envolventes de los empacadores a emplear con el objetivo de realizar el análisis de cargas combinadas a las operaciones programadas ó probables a efectuar y comparar los resultados con la envolvente de diseño para mantener en todo momento el área de operación segura⁷.

⁷. *Guía de diseño para empacadores de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*

I.III Diseño de fluidos empacadores

El diseño de fluidos es de suma importancia para el desarrollo de un pozo, en este apartado también se mencionará la diferencia entre el fluido de terminación y el fluido empacador (**TABLA I.1**).

La diferencia entre los fluidos de terminación y los fluidos empacadores es que los primeros están frente del intervalo productor al momento del disparo y el fluido empacador permanece en el espacio anular durante la vida productiva del pozo, en algunos casos un mismo fluido cumple las dos funciones.

TABLA I. 1.- Características de distinción entre un fluido de terminación y un fluido empacador

Fluidos Empacadores	Fluidos de Terminación
<p>Un fluido empacador: es un fluido que ocupa el espacio anular entre la tubería de producción y la tubería de revestimiento desde el empacador, hasta el cabezal de tuberías.</p>	<p>El fluido de terminación es aquel que se utiliza durante la terminación del pozo y nos proporciona la carga hidrostática suficiente para mantener el pozo bajo control mientras se realizan operaciones como: <i>registros, introducción del aparejo de producción, disparos, etc.</i></p>

Las funciones de un fluido empacador son:

- Ejercer una columna hidrostática para controlar el pozo en caso de fugas en el empacador o aparejo de producción.
- Reducir la presión diferencial entre los espacios anulares de TP-TR y TR-agujero, para evitar movimientos en el aparejo.
- Reducir el efecto de corrosión de las tuberías de producción y de revestimiento.
- Minimizar la transferencia de calor a través del aparejo para reducir la depositación de parafinas y asfáltenos. Se necesita un fluido empacador que tenga baja conductividad térmica y no permitir el fenómeno por convección de calor, para tener una mayor temperatura y evitar la depositación de parafinas y asfaltenos.
- Facilitar la recuperación del aparejo durante las reparaciones, el fluido debe evitar depósitos de sólidos en el espacio anular.

Las características de un fluido empacador son:

- No dañar el medio ambiente.
- No dañar los elastómeros del empacador
- Química y mecánicamente estables
- Minimizar la corrosión
- No dañar la formación (hinchazón de arcillas, cambio de mojabilidad, formación de emulsiones, etc.)

I.III.1 *Tipos de fluidos empacadores*

Existen básicamente dos tipos de fluidos empacadores los de *base aceite* y los de *base agua*.

Fluidos Empacadores Base Aceite: Estos fluidos se formulan con fluidos base aceite-diesel, tienen por lo general baja conductividad térmica, la viscosidad es pequeña y sensible a la temperatura además, evitan la corrosión de las tuberías debido a su naturaleza no polar, su conductividad térmica es menor a los de base agua. Se deben considerar ciertos parámetros para el uso de aceite o diesel con el fin de evitar problemas con el pozo o la formación. Las ventajas y desventajas de este tipo de fluidos empacadores se muestran en la **TABLA I.2.**

TABLA I.2.- Ventajas y desventajas de algunos fluidos empacadores base aceite

Fluidos base aceite		
Fluidos	Ventajas	Desventajas
Acéite Diesel	<ul style="list-style-type: none"> • Evita la corrosión en las tuberías • Buen aislante térmico • No daña la formación • Libre de sólidos • Estable a altas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> • No se puede densificar • Costo alto • El aceite no debe contener parafinas y asfáltenos, agua de formación o finos que puedan dañar el intervalo productor • El diesel debe considerar su contenido de azufre para evitar el daño de los elastómeros del empacador
Emulsión Diesel-Salmuera	<ul style="list-style-type: none"> • Evita el daño a la formación • Baja corrosión en las tuberías • Estable a alta temperatura • Se puede densificar 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo alto
Diesel Gelificado	<ul style="list-style-type: none"> • No daña la formación • Excelente aislamiento térmico • Evita la corrosión en las tuberías • Estable a alta temperatura • Se puede densificar 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo alto

El costo del diesel es alto, pero deben considerarse las ventajas que tiene en cuanto a su estabilidad con la temperatura y sus propiedades de no-polaridad evitando el uso de inhibidores de corrosión

Fluidos Empacadores Base Agua: El agua es el fluido base para formular salmueras, a la cual se le agregan sales para densificar y aditivos de control de pérdida de fluido, inhibidores de arcillas y de corrosión, controlador del pH, secuestrantes de O₂ y biocidas según las necesidades. A continuación se muestra la **TABLA I.3** donde se observan las características de estos fluidos.

TABLA I. 3.- Ventajas y desventajas de algunos fluidos empacadores base agua

Fluidos Base Agua		
Fluidos	Ventajas	Desventajas
Agua Dulce o de Mar	<ul style="list-style-type: none"> • No contiene sólidos • Bajo costo • Buena disponibilidad • No contamina 	<ul style="list-style-type: none"> • Daño a la formación • No se puede densificar • Puede generar problemas de corrosión • Baja capacidad como aislante térmico
Fluidos de Perforación (Debido a sus desventajas no se recomienda usarlo.)	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo • Se puede densificar 	<ul style="list-style-type: none"> • Asentamiento de sólidos sobre el empacador y tubería dificulta la recuperación del aparejo • Daña la formación (Alto contenido de sólidos) • Puede generar problemas de corrosión si no es tratado adecuadamente (aditivos degradan con la temperatura y forman CO₂ y H₂S)
Salmueras	<ul style="list-style-type: none"> • No contiene sólidos • Se puede densificar • No dañan la formación 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede generar problemas de corrosión si no es tratado • Baja capacidad como aislante térmico • No es muy estable a altas temperaturas (fenómeno de cristalización) • Las salmueras triples de bromuro de calcio y zinc son corrosivas, tóxicas y alto costo
Salmueras con Biopolímeros	<ul style="list-style-type: none"> • Estable a altas temperaturas (150°C) • No contiene sólidos • No contamina • No daña la formación • Se puede densificar • Es biodegradable 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo alto • Puede generar problemas de corrosión si no es tratado • Baja capacidad como aislante térmico

L.III.2 Factores que afectan la velocidad de corrosión debido a fluidos empacadores

Existen varios factores que deben ser considerados al momento de realizar el diseño de los empacadores, debido a que pueden mermar su capacidad por diversas razones, entre ellas la corrosión principalmente. A continuación se presentan algunos de los factores que tienen un efecto de corrosión sobre los empacadores⁸:

- **El pH** es la medida de acidez o alcalinidad de un fluido. El pH de salmueras de densidad 1.39 gr/cm³ es casi neutro, disminuye con el aumento de Densidad.

Por lo general los factores de expansión térmica aumentan con la concentración de sal para todas las salmueras, La temperatura afecta la estabilidad de la salmuera y la velocidad de corrosión.

- **El punto de nube** (condiciones de temperatura a las que se empiezan a formar los primeros cristales de parafina) y la depositación de parafina y asfálteno, esto es debido al cambio de temperatura en el aparejo. Mediante el uso de un fluido empacador cuyo valor de conductividad térmica sea pequeño, se puede evitar la pérdida de calor y por consiguiente en algunos casos la depositación de material inorgánico en el aparejo.
- **Cristalización:** En un proceso de enfriamiento en una salmuera formada por una sal; al ir disminuyendo se formara el primer cristal a una temperatura determinada (aparición del primer cristal); continuando este proceso y disminuyendo la temperatura se alcanza la temperatura absoluta de cristalización TCT. Esto sucede debido a las condiciones termodinámicas de la cristalización; si después se calentara, entonces se tendrá un cambio continuo hasta donde el último cristal desaparece (LCTD). Si el efecto de cristalización ocurre, el fluido pierde completamente sus funciones, lo cual sería catastrófico.

⁸ *Guía de diseño para fluidos empacadores de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*

I.IV Diseño de disparos

El proceso de disparar consiste en perforar la tubería de revestimiento, cemento y formación para establecer comunicación entre el pozo y los fluidos del yacimiento. La correcta selección del sistema de disparos es muy importante ya que de esto dependerá la productividad del pozo y la disminución de intervenciones adicionales que implican altos costos.

Las cargas para perforar la tubería dependen de los explosivos para generar la energía necesaria y tener una penetración efectiva de la tubería de revestimiento, cemento y formación; debido a su relación energía – peso, se prefiere los explosivos sobre otra fuente de energía. Los explosivos pueden clasificarse en altos y bajos, de acuerdo a su velocidad de reacción, como puede apreciarse en la **IMAGEN I.11**.

Existen dos conceptos necesarios para trabajar con los explosivos utilizados durante este tipo de procesos: sensibilidad y estabilidad⁹.

Sensibilidad: La sensibilidad es una medida de la energía mínima, presión o potencia requerida para iniciar la dinámica de un explosivo y nos refleja la facilidad con la que puede iniciarse. Existe la sensibilidad al impacto y la sensibilidad a la chispa.

- **Sensibilidad al impacto.**- Es la altura mínima de la cuál puede dejarse caer un peso sobre el explosivo para que detone.
- **Sensibilidad a la chispa.**- Es la cantidad de energía que debe tener una chispa para detonar un explosivo.

Estabilidad: La estabilidad se refiere a la habilidad de un explosivo para perdurar por largos periodos de tiempo (almacenados) o para soportar altas temperaturas sin descomponerse.

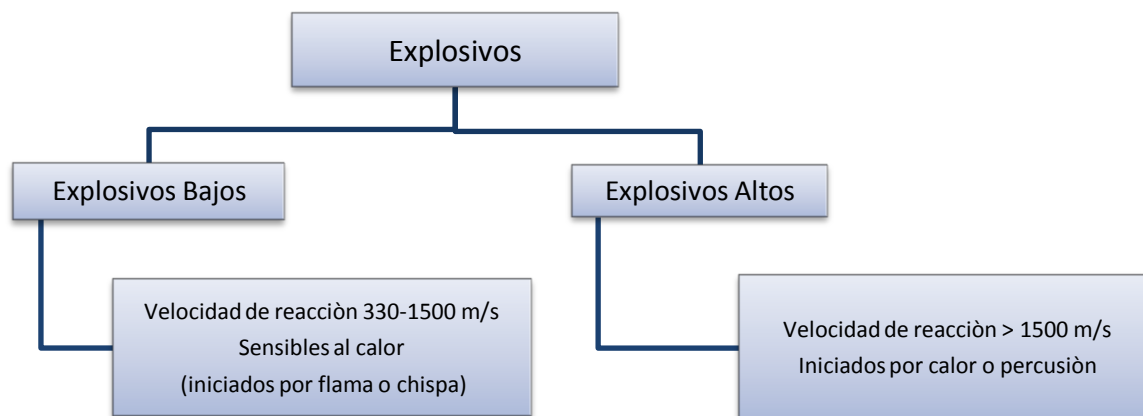


IMAGEN I.11.- Clasificación de explosivos

⁹ Guía de diseño para disparos de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).

Como se mencionó anteriormente, el análisis de las condiciones del pozo y la selección del sistema de disparo adecuado, ayudará a obtener la máxima producción del pozo.

L.IV.1 Factores que afectan la productividad de un pozo

Entre los principales factores de este tipo encontramos los siguientes: a) factores geométricos del disparo, b) la presión diferencial al momento del disparo, c) el tipo de pistolas y cargas, d) el daño generado por el disparo, e) el daño causado por el fluido de la perforación y f) el daño causado por el fluido de la terminación¹⁰. A continuación se explica cada uno de esos factores.

a) Factores geométricos del disparo: La geometría de los agujeros hechos por las cargas explosivas en la formación influye en la “Relación de Productividad” del pozo y está definida por los Factores Geométricos, estos determinan la eficiencia del flujo en un pozo disparado y son:

- Penetración
- Densidad de cargas por metro
- Fase angular entre perforaciones
- Diámetro del agujero (del disparo)

Efecto de la penetración y densidad de carga en la RP.

La penetración es importante para mejorar la relación de productividad. La densidad de cargas influye también en la relación de Productividad (RP), observando la gráfica (**IMAGEN I.12**) se tiene que para una densidad de 6 cargas/m es necesaria una penetración de 7 pulgadas para obtener una RP de 1.0 mientras que para una densidad de 25 cargas/metro se necesitan sólo 3 pulgadas.

Efecto de la fase en RP.

La fase angular entre perforaciones sucesivas es un factor importante. Suponiendo que se use un sistema de 0° de fase, con una penetración de 6 pulgadas, se obtiene una RP de 0.9, mientras que para un sistema de 120° se obtiene una RP de 1; representando una diferencia del 10% en la RP (**IMAGEN I.13**).

¹⁰ *Guía de diseño para disparos de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*

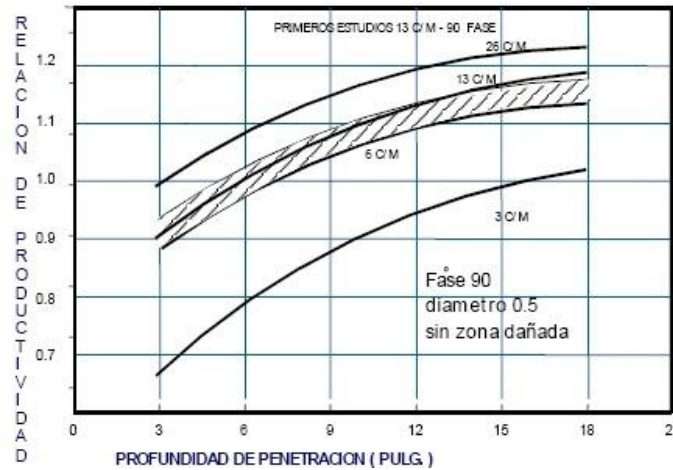


IMAGEN I.12.- Efecto de la presión y densidad en la PR.¹¹

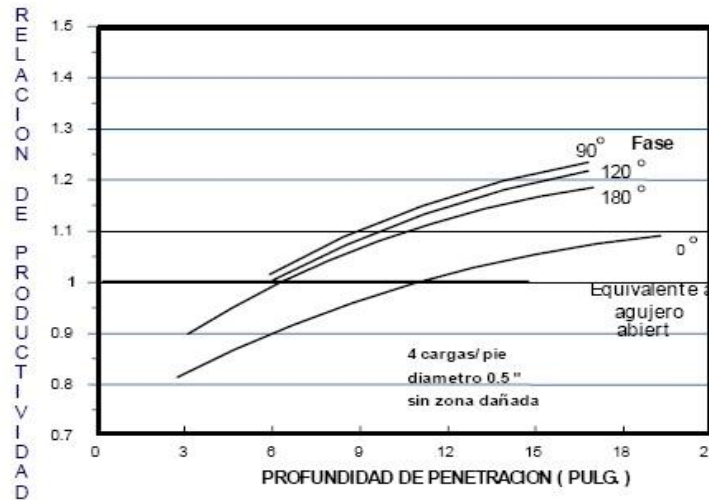


IMAGEN I.13.-Efecto de la fase en la RP¹²

b) Presión diferencial al momento del disparo.

Existen dos técnicas que pueden aplicarse durante la ejecución de los disparos:

Sobre – Balance	Bajo – Balance
▪ P. hidrostática > P. formación	▪ P. hidrostática < P. formación

Una terminación **sobre-balanceada** implica fracturar la formación al momento del disparo, sin embargo si la presión no es alcanzada después del disparo y antes de que fluya el pozo, se forman tapones con los residuos de las cargas. Después de dejar fluir el pozo, es posible que aun se tenga una perforación parcialmente taponada y una zona compactada de baja permeabilidad.

¹¹ Guía de diseño para disparos de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).

¹² Ídem 11.

En una terminación diferencial **bajo-balanceada**, los residuos de las cargas y la zona comprimida podrían ser expulsados por la acción del brote de fluido de terminación. Disparar el pozo con una presión diferencial a favor de la formación es recomendable para obtener la limpieza de los agujeros. Sin embargo, usar presiones diferenciales muy altas es inadecuado ya que puede provocar arenamiento o aporte de finos de formación que impedirán el flujo a través de la perforación, o un colapso de la TR.

Dentro de la Presión Bajo Balanceada en arenas se tiene que saber si es una formación consolidada o no consolidada. Para conocer si es consolidada o no consolidada, se tiene que realizar un registro de densidad o sónico, y con el análisis de respuesta en las lutitas limpias adyacentes de la zona productora se sabrá qué tipo de formación se tiene.

La razón de usar el tiempo de tránsito de las barreras de lutitas adyacentes, abajo o arriba, en lugar de la arena misma, es que el tiempo de tránsito de la lutita está relacionado directamente con su compactación. El grado de compactación de las lutitas adyacentes indica la compactación de la arena. Si se usara el tiempo de tránsito de la arena para determinar su compactación, sería necesario hacer correcciones por tipo de hidrocarburo, densidad de los granos de arena, porosidad de la zona, saturación de agua, etc., muchos de estos datos no están disponibles y deben ser supuestos, por lo que es posible tener un resultado erróneo.

c) Tipos de pistolas y cargas.

Un sistema de disparo consiste de una colección de cargas explosivas, cordón detonante, estopín y portacargas. Esta es una cadena explosiva que contiene una serie de componentes de tamaño y sensibilidad diferente y puede ser bajado con cable y/o con tubería.

Pistolas bajadas con cable.- El sistema de **Disparo Bajado con Cable (DBC)** puede usarse antes de introducir la tubería de producción, o después de introducir la TP. Al introducirlo antes, se pueden emplear pistolas de diámetro más grande, generando un disparo más profundo.

Los componentes explosivos son montados en un portacargas el cuál puede ser un tubo, una lámina ó un alambre y estos se clasifican en recuperables, semidesechables y desechables:

- Recuperables (no están expuestos los explosivos al ambiente del pozo).

También llamadas no expuestas: los residuos de los explosivos y lámina portadora son recuperados y prácticamente no queda basura en el pozo, este sistema es adecuado para ambientes hostiles.

- Semidesechables (los explosivos están expuestos al ambiente del pozo)

Este sistema es similar al desechable con la ventaja de que la cantidad de residuos dejados en el pozo es menor, ya que se recupera el portacargas.

- Desechables (los explosivos están expuestos al ambiente del pozo)

Los residuos de las cargas, cordón, estopín y el sistema portador (.lámina, alambre, uniones de cargas) se quedan dentro del pozo dejando una considerable cantidad de basura. Una ventaja es que al no estar contenidas las cargas dentro de un tubo, pueden ser de mayor tamaño con lo que se obtiene mayor penetración. La principal desventaja es que los componentes explosivos están expuestos a la presión y fluido del pozo, por lo que, este sistema está limitado por estas condiciones.

Pistolas bajadas con tubería.-En el sistema de **Disparo Bajado con Tubería (DBT)**, la pistola es bajada al intervalo de interés con tubería de trabajo. A diferencia de las pistolas bajadas con cable, en este sistema solo se utilizan portacargas entubados, y la operación de disparos puede ser efectuada en una sola corrida, lo cual favorece la técnica de disparos bajo balance. El objetivo fundamental del sistema DBT es crear agujeros profundos y grandes favoreciendo la productividad del pozo, además los sistemas entubados soportan mayor presión y temperatura que los sistemas expuestos.

El diámetro interno de la TR define el tamaño mayor de pistola bajada con tubería que se puede usar. Para el caso de pistolas bajadas con cable, el diámetro mínimo de la pistola es definido por el diámetro interno mínimo de las partes que componen el aparejo de producción.

d) Daño generado por el disparo.

El proceso de perforación de formaciones permeables y porosas con las cargas moldeadas crea una "película" que se opone al flujo en el agujero. El jet penetra la formación a alta velocidad, desplazando radialmente el material de formación, creándose una zona compactada alrededor del agujero y reduciendo la permeabilidad original. Para disminuir el efecto pelicular deberá incrementarse la penetración para librar la zona de daño.

e) Daño generado por el fluido de la perforación

Durante el proceso de perforación del pozo se causa un daño a la formación debido al lodo de perforación. Este daño se asocia al taponamiento de los poros alrededor del pozo.

El enjarre puede resolver el problema de la invasión del filtrado pero si no es removido completamente antes de depositar el cemento en el espacio anular, las partículas sólidas pueden ser arrastradas dentro del agujero abierto por el jet del disparo, aunque se use un fluido supuestamente limpio de terminación.

f) Daño causado por el fluido de la terminación.

Si existe algún material extraño en el fluido de terminación, puede ser empujado hacia adentro de la formación por el Jet lo que podría causar un pequeño taponamiento. Debido a la alta presión generada por la explosión, momentáneamente se crea una condición de sobre-

balance con fuerzas de impacto y si el fluido no es completamente limpio, las partículas serán adheridas a las paredes del agujero y podría haber invasión de extensión limitada

El daño del pozo, las perforaciones de las cargas, penetración parcial y la desviación provocan un cambio en la geometría radial del flujo que afecta la productividad del pozo. El efecto combinado de estos factores se denomina "Efecto Pelicular" y genera una caída de presión que afecta la producción del yacimiento.

I.V Lavado de pozo

El lavado del pozo se define como un proceso mediante el cual se limpia el pozo evitando así la depositación de sólidos en el intervalo productor, la cual causaría disminución de la permeabilidad de la formación en dicho intervalo.

Este proceso tiene la finalidad de desplazar el lodo y remover los sólidos adheridos a las paredes de la tubería para eliminar partículas como barita, recortes, cemento y sedimento; esto, con el objeto de tener un fluido libre de contaminantes, y así evitar daño a la formación durante las operaciones de disparos, estimulación, y/o fracturamiento. Si la operación de lavado es ineficiente, los sólidos no removidos pueden taponar los poros y canales de la formación productora durante los disparos, causando una drástica reducción de la permeabilidad y provocando la disminución de la producción.

I.V.1 Tipos de baches

Para la ejecución de este proceso se emplean baches espaciadores, lavadores y viscosos, así como un fluido de terminación (**IMAGEN I.14**); las funciones de los baches y del fluido de terminación son las siguientes:

- ⊕ Bache espaciador.- Es el bache que separa a dos fluidos para evitar que un fluido limpio que ingresará posterior mente se contamine con el fluido alojado originalmente en el pozo.
- ⊕ Bache lavador.- Es el bache de fluido que realiza la limpieza del pozo, es decir, el desprendimiento de los sólidos y en una menor parte el acarreo de los mismos.
- ⊕ Bache viscoso.- Este tipo de bache tiene la función principal de acarrear la mayoría de los sólidos desprendidos por el bache lavador
- ⊕ Fluido de terminación.- Es un fluido libre de contaminantes con el que se llenará el pozo, sus funciones principales son equilibrar las fuerzas de las paredes del pozo para evitar derrumbes y debido a que está libre de contaminantes se evita daño a la formación durante el desarrollo de operaciones posteriores al lavado.

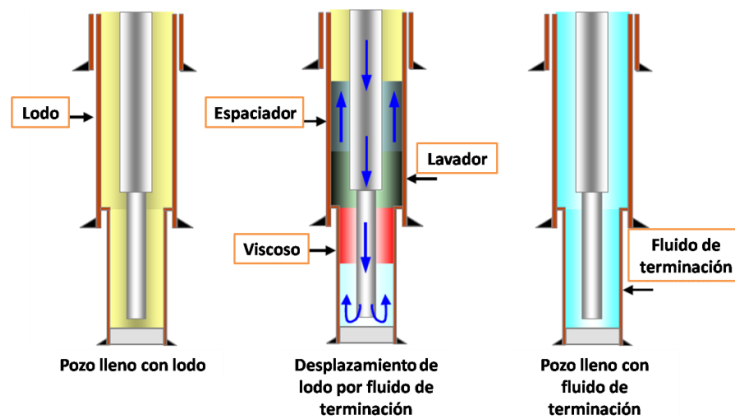


IMAGEN I.14.- Proceso de circulación de fluidos en el lavado de pozo

IV.2 Parámetros a considerar para el lavado de pozo

Para el diseño de este proceso se consideran principalmente los siguientes parámetros:

a) Sarta de lavado

La sarta de lavado es una herramienta que se utiliza para “cepillar” el interior de las tuberías. Se recomienda utilizar la tubería de perforación, tubo o niple aguja en la parte inferior y escareadores en serie cuando existan dos diámetros de tubería de revestimiento. Toda herramienta o elemento mecánico que se desee introducir para mejorar la eficiencia de la limpieza deberá analizarse antes de su introducción al pozo con la finalidad de evaluar el riesgo y el beneficio esperado, tomando en consideración los costos de los recursos adicionales a emplear.

b) Tipo, posición y cantidad de baches.

En la mayoría de las operaciones de lavado del pozo se requieren únicamente emplear cuatro tipos de fluidos, (los cuales se mencionan en el orden adecuado en que deben ser introducidos): espaciador, lavador, viscoso y de terminación.

c) Volumen o longitud lineal de los baches

Cada bache debe poseer un cierto volumen de fluido, dicho volumen se encuentra en función del tipo de bache, el tipo de fluido y restricciones económicas. El cálculo del volumen del bache es importante debido a que de este volumen depende que el lavado del pozo se realice de manera eficiente tanto técnica como económicamente.

d) Presión diferencial máxima durante el desplazamiento.

Esta presión es la máxima que se deberá de alcanzar con algún equipo mecánico para bombear los fluidos dentro del proceso de lavado. Se debe calcular esta presión con el fin de determinar el equipo de bombeo que deberá ser utilizado. Si la presión diferencial es mayor a la presión de trabajo que pueden alcanzar las bombas de lodo se deberá utilizar una unidad de alta presión, en caso contrario se podrán utilizar las bombas de lodo con el mayor diámetro de camisa posible para alcanzar el mayor gasto de bombeo.

e) Ingeniería de fluidos.

Todos los fluidos que pretendan ser ingresados al pozo para realizar el proceso de lavado del pozo deben diseñarse para que cumplan con su función de la mejor forma posible, evitando costos innecesarios. “Los fluidos que realizan el desprendimiento y el acarreo de los sólidos se han analizado, y se ha encontrado que los fluidos lavadores se comportan como fluidos Newtonianos, mientras que los fluidos viscosos se comportan como no Newtonianos siguiendo el modelo de Ley de potencias”¹³. Estos dos tipos de fluidos son los que deben diseñarse con mayor cuidado de acuerdo a su comportamiento mencionado.

¹³ Guía de diseño de lavado de pozo. Gerencia de ingeniería, PEMEX.

I.VI Estimulación de pozos

El proceso de estimulación de pozos es uno de los más importantes para el mantenimiento o incremento de la producción de los pozos (tanto de aceite como de gas). Puede definirse como un proceso mediante el cual se crea ó se restituye un sistema de canales en la roca productora de un yacimiento para facilitar el flujo de fluidos de la formación hacia el pozo.

Este proceso tiene como finalidad remover el daño ocasionado por la invasión de los fluidos a la formación durante las etapas de perforación y terminación de pozos así como por otros factores durante la vida productiva del pozo.

Comúnmente se emplean dos tipos de estimulación: matricial y fracturamiento hidráulico; en este trabajo de tesis únicamente se abordará el sistema matricial. *(Ver nota al final del subcapítulo).*

I.VI.1 Tipos de estimulación matricial

La estimulación matricial de pozos, consiste en la inyección de fluidos de tratamiento a gastos y presiones bajas, las cuales no deben rebasar la presión de fractura¹⁴ (actualmente también se pueden inyectar dichos fluidos a través de las fracturas). Un tratamiento de estimulación matricial puede ser de dos tipos: reactivas o no reactivas.

La estimulación reactiva se caracteriza por que los fluidos de tratamiento reaccionan químicamente disolviendo materiales que dañan la formación así como los sólidos contenidos en la roca, se utiliza principalmente en la remoción del daño causado por partículas sólidas, generalmente arcillas y precipitaciones inorgánicas.

En la estimulación no reactiva, los fluidos de tratamiento no reaccionan químicamente con los materiales de la roca, se utiliza principalmente para la remoción de daños ocasionados por bloqueos de agua, aceite o emulsión, así como pérdidas de fluido de control o depósitos orgánicos.

Como se sabe, cada pozo es diferente, por ello para determinar el tipo de estimulación que se debe realizar, es necesario considerar para cada caso particular:

- a) El tipo de daño que tiene la formación.
- b) El análisis nodal
- c) Las pruebas de laboratorio como verificadores del tipo y cantidad de daño

El diseño del tratamiento de estimulación de un pozo, se encontrará basado en los tres parámetros anteriores además de los siguientes datos del yacimiento:

¹⁴ *Rasso, Z.C: "Un siglo de la perforación en México"; Unidad de perforación y mantenimiento de pozos (UPMP); 2000.*

- Presión del yacimiento.
- Porosidad.
- Mineralogía de la formación.
- Densidad de los fluidos de la formación.
- Saturación de los fluidos de la formación.
- Temperatura del yacimiento.
- Profundidad de la formación.
- Factor de daño.

A continuación se presentan algunas de las consideraciones más importantes para realizar un tratamiento de estimulación adecuado.

- Durante un tratamiento (sea o no reactivo) el aparejo debe estar libre de materiales que dañen la formación
- En rocas carbonatadas la matriz crítica de penetración es de 3 a 6 [pie] en areniscas es de 1 a 3 [pie].
- La presión de bombeo debe ser mayor a la presión de formación pero menor al gradiente de fractura
- En cuerpos de espesores considerables es necesario el uso de divergentes.
- En pozos depresionados el uso del nitrógeno resulta conveniente.
- La mineralogía, el tipo de formación, la temperatura y las pruebas de laboratorio (compatibilidad y de emulsión) son los factores que determinarán el tipo de sistema de fluidos a utilizar.

I.VI.2 Tratamiento de estimulación matricial

La mayor parte de la producción de hidrocarburos se presenta en formaciones carbonatadas o en areniscas. En México la mayor parte de las estimulaciones se efectúan en rocas carbonatadas (calizas) utilizando ácido clorhídrico (HCL) a diferentes concentraciones; una menor parte de las estimulaciones se realizan en formaciones productoras compuestas por areniscas, en las que se ha utilizado ácido fluorhídrico (HF)¹⁵.

El tratamiento de estimulación para las formaciones de tipo carbonatado y arcilloso se pueden clasificar de manera general en:

- ⊕ Base del sistema.- Se refiere al elemento que da soporte al fluido con el que se pretende estimular a la formación. La base es función del tipo de estimulación matricial: reactiva o no reactiva.
- ⊕ Aditivos.- Son componentes que pueden ser añadidos al fluido de inyección para que este tenga una mayor efectividad.

¹⁵ *Guía de diseño para estimulación de pozos. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*

De acuerdo a lo anterior, en la **IMAGEN I.15**, se presenta un diagrama que relaciona a la estimulación matricial con las bases y aditivos además, para las bases se presenta una división de acuerdo al tipo de estimulación: reactiva o no reactiva.

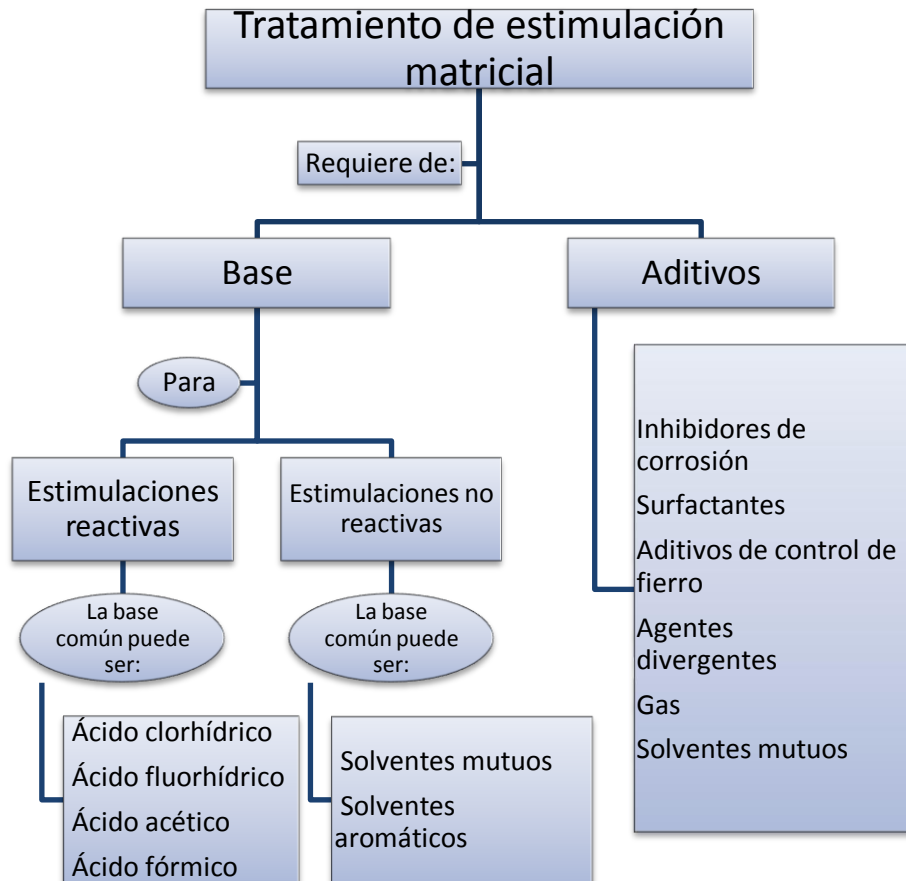


IMAGEN I.15.- Estimulación matricial.- Relación de bases y aditivos

Ahora bien, de acuerdo a que con anterioridad se mencionó a las formaciones carbonatadas o de areniscas como las principales productoras de hidrocarburos, en seguida se realizara una breve descripción de las estimulaciones matriciales en cada una de estas formaciones.

A) Estimulación matricial en carbonatos

⊕ Estimulación reactiva.-

Para las formaciones de carbonatos los tipos de ácido que pueden usarse son:

- Ácido Clorhídrico (HCL).
- Ácidos Orgánicos (Acético y Fórmico).

Este tipo de estimulaciones, ya sea en formaciones calizas o en dolomitas, dan la oportunidad no tan solo de remover el daño sino de mejorar la permeabilidad en la vecindad del pozo debido a la generación de canales por la disolución de material que genera el ácido.

La acidificación matricial en carbonatos puede considerarse como un proceso más sencillo que una acidificación en formaciones areniscas, esto es debido a que la mayoría de los productos de reacción tanto en calizas como en dolomitas son solubles en el ácido gastado. La mayoría de los tratamientos ácidos matriciales utilizan de 75 a 250 galones de ácido por pie de intervalo productor.

Entre los parámetros más importantes de una estimulación matricial ácida en carbonatos están los siguientes:

- Efectividad del desviador
- Limite de los agujeros de gusano y la excesiva pérdida de filtrado
- Aplicaciones en baja y alta temperatura.
- Concentración del ácido

Existen también estimulaciones reactivas utilizando ácidos orgánicos (ácidos acético y fórmico), estos reaccionan más lentamente con la mayoría de los minerales de la formación en comparación con los inorgánicos, esta característica permite que se obtenga una penetración más profunda y con mayor calidad.

Los factores que influyen en el efecto de reacción del ácido con las formaciones son en general: la relación volumen-área de contacto, presión, temperatura, concentración del ácido y productos de reacción, composición de la roca y viscosidad.

⊕ Estimulación no reactiva.-

Este tipo de estimulación tiene el propósito principal de atender a los fenómenos de superficie como: tensión interfacial, mojabilidad y capilaridad, estos fenómenos pueden provocar daños en la permeabilidad absoluta así como en la permeabilidad relativa y crear alteraciones de la permeabilidad; para tratar de remover este tipo de daño se utilizan principalmente agentes de superficie (surfactantes), los cuales pueden estabilizar las altas viscosidades de las emulsiones que pudieran ser ocasionadas por la mezcla de fluidos base agua y aceite.

B) Estimulación matricial en areniscas.

Para este tipo de formaciones se utiliza estimulación reactiva. Así pues, el ácido que comúnmente es la base es el fluorhídrico, y se puede mezclar con ácido clorhídrico o con ácidos orgánicos; la mezcla con ácido clorhídrico sirve para disolver minerales arcillosos, feldespatos y arenas mientras que la mezcla con ácidos orgánicos es utilizada para retardar la reacción con la arena y las arcillas, mejorando así la profundidad de penetración y en consecuencia tener mayor remoción de daño.

La razón principal para acidificar una formación de areniscas es remover el daño causado por la invasión de partículas sólidas y el daño causado por el hinchamiento, dispersión, migración o floculación de finos. Estos tratamientos están limitados para daños someros de 1 a 3 pies de la vecindad del pozo.

En la estimulación de areniscas existen tres etapas básicas de bombeo¹⁶:

1. Pre-colchón.- Se bombea por delante del ácido fórmico y proporciona un barrido entre la mezcla del ácido vivo y los fluidos de la formación.
2. Fluido de tratamiento.- Este removerá el daño por arcillas, para completar esto, el sistema ácido deberá contener iones de fluoruro (surfactantes tipo no iónico)
3. Fluido de desplazamiento.- Se utiliza para desplazar el ácido fórmico, asegura que la mayoría de éste reaccione en la formación.

Nota: El fracturamiento hidráulico también se considera un método de estimulación y puede definirse como un proceso mediante el cual se inyecta un fluido fracturante con alta viscosidad a la formación con el objeto de generar en ella canales de flujo (fracturas), dentro de los cuales deberá ser colocado un elemento de empaque (generalmente arena)¹⁷.

Dicho proceso tiene como finalidad que el elemento empaque permita incrementar la conductividad de la formación y de esta forma mejorar el flujo de fluidos hacia el pozo.

En este documento, debido a la complejidad que se tiene para desarrollar modelos de fractura, el fracturamiento hidráulico no será tratado.

¹⁶ Guía de diseño para estimulación de pozos. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).

¹⁷ Guía de diseño para fracturamientos hidráulicos. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).

I.VII Diseño para aislar intervalos probados

Aislar un intervalo probado es un proceso mediante el cual se impide que fluidos de un intervalo de interés tengan contacto con los fluidos de otro intervalo.

Este proceso tiene varios fines, según sea el caso que se trate: a) aislar un intervalo inferior para seguir produciendo el intervalo superior, en el caso de un pozo de explotación; b) aislar intervalos probados, en pozos exploratorios y c) abandono de un pozo. Para el primer caso, la finalidad es evitar la migración de fluidos o evitar la pérdida de producción del nuevo intervalo puesto en producción (intervalo superior), para el segundo caso la finalidad es evitar la interferencia y problemas de interpretación durante las pruebas de producción del nuevo intervalo y para el último caso la finalidad es dejar el intervalo aislado para mayor seguridad técnica y medioambiental al dejar abandonado el pozo.

I.VII.1 Técnicas de aislamiento

Para realizar el aislamiento de intervalos probados, se requiere el uso de tapones mecánicos y de técnicas para colocar tapones de cemento que permitan de manera segura su aislamiento.

Los tapones de cemento pueden ser colocados en agujeros abiertos o entubados, sin embargo existe mayor dificultad en agujeros descubiertos debido a la irregularidad en su diámetro. Cuando se va a abandonar un pozo aislando los intervalos probados, las longitudes, profundidades y número de tapones son dados por las condiciones del pozo. Debido a que el volumen de lechada de cemento es mucho menor que el volumen de fluido del pozo, la primera puede contaminarse fácilmente, lo que provocaría cambio de las propiedades de la lechada, y esto a su vez, una mal aislamiento. Las técnicas que se mencionan para aislar intervalos probados mediante tapones de cemento y mecánicos se mencionan en la **TABLA I.4.**

TABLA I. 4.- Técnicas para aislar intervalos probados

Usando sarta de trabajo	A través de la tubería de producción	En agujero descubierto
<ul style="list-style-type: none">•Técnica del tapón balanceado•Técnica para una cementación forzada (con y sin retenedor de cemento)• Uso de un tapón mecánico permanente• Técnica de dos tapones con tubería de aluminio en la punta de la sarta de perforación.	<ul style="list-style-type: none">•Técnica para colocar un tapón de cemento con cable eléctrico•Uso de la tubería flexible para colocar un tapón de cemento•Uso de tapones anclados a la tubería de producción	<ul style="list-style-type: none">•Técnica general para aislar un intervalo en agujero descubierto

I.VII.2 Criterios para la selección de la técnica a utilizar

Para seleccionar la técnica apropiada deberá estudiarse el objetivo de la operación, las condiciones y estado mecánico del pozo, así como la información geológica, la selección de la lechada y la profundidad de los intervalos.

Así pues, se deriva lo siguiente:

Información requerida:

- Datos del agujero descubierto
- Datos de la formación
- Temperaturas
- Zonas con problemas
- Datos de desviación
- Datos de la TR
- Datos de la TP
- Datos de la TF
- Fluidos
- Datos del Cemento

I.VII.3 Consideraciones para colocar un tapón con éxito

Para tener éxito en este proceso es necesario contar con los datos exactos del pozo, seleccionar bien la lechada y desplazar los fluidos eficientemente, de acuerdo a lo anterior es necesario tomar en cuenta la calibración de las herramientas de registros, la limpieza del agujero y las condiciones reológicas de los fluidos tanto de terminación como de reparación y minimizar los riesgos operativos que se puedan presentar durante la operación¹⁸.

¹⁸ *Guía de diseño para aislar intervalos probados. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*

I.VIII Molienda de empacadores

La molienda de empacadores puede definirse como un proceso mediante el cual es intervenido un pozo y se remueve un empacador mediante un sistema de molinos y motores de fondo.

El objetivo primordial de este proceso es recuperar la capacidad productora del pozo mediante la remoción del elemento mecánico dentro del pozo. La dificultad de esta operación es alta debido a la heterogeneidad de los materiales que componen un empacador, es por el grado de dificultad que se le considera una actividad crítica.

I.VIII.1 Operaciones del proceso de molienda

Se han logrado identificar 14 operaciones dentro del proceso de molienda¹⁹, las cuales se señalan a continuación en el orden que se realizan:

1. Armar y meter sarta de molienda (molino, martillo, combinaciones, tubería extrapesada y tubería de trabajo).
2. Circular y acondicionar el fluido seleccionado para la molienda en el fondo del pozo, homogenizando columnas.
3. Moler el empacador desde su parte superior hasta alcanzar las cuñas y el elemento de empaque en un rango de 0.60 a 1.0 m. Es importante determinar la interacción molino-empacador, ya que de esto depende en gran parte el tipo de recortes que se obtendrán durante la molienda y podrán definirse las condiciones de hidráulica para recuperarlos eficazmente.
4. Después de moler las cuñas del empacador y el elemento de empaque, se procede a circular un bache viscoso para acarrear los recortes generados en la molienda.
5. Sacar el molino a superficie para observar y analizar la condición física del mismo, determinando el desgaste sufrido por el molino en función del tiempo de operación efectivo.
6. Efectuar viaje de limpieza al fondo del pozo con niple de aguja y canastas colectoras para remover la chatarra.
7. Operar las canastas colectoras con niple de aguja con presión hidráulica para recoger los restos de recortes que no fueron recuperados durante la molienda.
8. Sacar a superficie las canastas colectoras y el niple de aguja, y registrar el peso (kg) de la cantidad de recortes recuperados. Es importante llevar un registro detallado de las condiciones de hidráulica y la cantidad de recortes recuperados considerando el peso y tamaño del recorte.
9. Armar y meter aparejo de pesca con pescante tipo arpón o en última instancia, meter un pescante tipo machuelo para recuperar los restos del empacador. Es importante notar que, si

¹⁹ *Guía de diseño para la molienda de empacadores. Gerencia de ingeniería, PEMEX.*

existe suficiente fondo en el pozo que no sea de interés, se deberá deslizar el empacador hacia abajo y no recuperar sus restos.

10. Operar el aparejo de pesca sobre los restos del empacador, trabajando con rotación de la herramienta a la derecha y a la izquierda, aplicándole peso sobre la misma, con el propósito de enchufarse firmemente y tratar de jalarlo sin que se suelte, recuperándolo hasta la superficie.

11. Sacar a superficie la herramienta de pesca con el propósito de recuperar los restos del empacador, vigilando durante la recuperación de los restos del empacador el peso de la sarta; de lo contrario, se procederá a realizar otro viaje.

12. Después de recuperar los restos del empacador, se arma y mete la canasta de circulación inversa con el propósito de recuperar los remanentes de pedacería de fierro. El dispositivo está formado de canastas magnéticas que generan un contra-flujo dentro del pozo, lo cual permite que cualquier resto de pedacería de fierro sea removido.

13. Operar la canasta de circulación inversa durante 1 hora aproximadamente, por efecto de la circulación del fluido y el campo magnético, para retirar del seno del fluido el resto de rebaba fina y pedazos de metal. Considerar la introducción de un niple de aguja o zapata dentada para recuperar pedacería, circulando en inversa.

14. Sacar a superficie la canasta de circulación inversa y cuantificar los recortes recuperados (peso y tamaño).

El proceso de molienda descrito con las 14 operaciones puede realizarse con la zapata lavadora, realizar la molienda de esta forma implica que el pozo no deberá tener más de 20° de desviación y en la operación 3 sería la zapata lavadora el mecanismo utilizado para moler las cuñas superiores. De igual forma, esta metodología es útil para moler cualquier herramienta metálica dentro del pozo, inclusive las tuberías de revestimiento y perforación; también se utiliza en operaciones de molienda con tubería flexible.

Existe una amplia variedad de molinos y motores para este proceso, la selección de las herramientas se basa en el principio de menor desgaste y mayor velocidad de operación para cada caso particular. Aún siendo de diferentes marcas y modelos, los usos y procedimientos de los molinos son parecidos.

I.VIII.2 Consideraciones para la ejecución del proceso de molienda

Durante el proceso de molienda deben considerarse: a) la geometría del pozo, b) las velocidades anular y de desplazamiento, c) el factor de transporte, d) el patrón de flujo y e) las propiedades reológicas del fluido.²⁰

²⁰ *Guía de diseño para aislar intervalos probados. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*

Estos parámetros así como las propiedades del material molido ejercerán influencia sobre el factor de transporte, parámetro que indica que tan efectivo esta siendo el proceso de molienda.

Nota: Las condiciones operativas rpm y psm también deben considerarse durante el proceso de molienda pero en este documento no serán señaladas.

I.VIII.3 Hidráulica en el proceso de molienda

Es necesario señalar que se requiere que el fluido de reparación se encuentre en circulación durante el desarrollo de la operación. Para determinar la hidráulica durante la molienda se deberá:

1. Caracterizar el fluido de reparación.
Para determinar el modelo reológico al cual se ajusta el comportamiento del fluido de reparación.
2. Determinar las propiedades reológicas del fluido.
Para determinar propiedades como: viscosidad, viscosidad plástica, punto de cedencia, índice de comportamiento e índice de consistencia así como viscosidad aparente; según el modelo al cual se haya ajustado el comportamiento del fluido (Newtoniano, Bingham o Ley de potencias)
3. Calcular la velocidad de transporte
La velocidad de transporte se refiere a la velocidad con que son transportados los recortes hasta la superficie por medio del fluido de reparación
4. Determinar el factor de transporte
El término “factor de transporte” para esta sección se define como la velocidad de transporte dividida entre la velocidad promedio del fluido en el espacio anular, representa la eficacia con que los recortes se acarrear.
5. Seleccionar del gasto crítico del fluido de reparación
Se sabe que el mejor acarreo de recortes se da cuando se trabaja con flujo turbulento. Entonces es necesario seleccionar un gasto con el cual se logre llegar a un punto donde el fluido de reparación presente características de flujo turbulento.

En el capítulo siguiente se detallará la metodología de los cálculos para la determinar la hidráulica mencionada. Además en el Apéndice B de este documento se presenta una lista de herramientas de molienda así como recomendaciones de uso de acuerdo al elemento a moler.

Capítulo II. Técnicas y formulario para el desarrollo del software

En este apartado se da a la conocer la metodología de las operaciones mencionadas en el capítulo anterior y a su vez las fórmulas matemáticas utilizadas para la realización del software: de_Terminación.PPV.

II.I Diseño de aparejos de producción

II.I.1 Ambientes corrosivos

Un factor que se considera para el diseño del aparejo de producción tiene que ver con el tipo de ambiente corrosivo en el que se encuentre el pozo. Como ya sabemos la corrosión deteriora el acero, por lo que se debe seleccionar el tipo de material que se va utilizar de acuerdo a los siguientes parámetros:

- Presión Parcial del H₂S
- Presión Parcial del CO₂
- Efecto de la temperatura sobre la corrosión

II.I.1.1 Presión parcial del H₂S

El ácido sulfhídrico (H₂S) es sumamente agresivo al acero, ya que en cuanto se incrementa la tensión en la tubería y hay presencia de agua, se produce una separación de átomos de hidrogeno debido a la reacción química entre el H₂S y el H₂O, estos se introducen en el acero incrementado la presión en los espacios intergranulares y generando fisuras (Fragilización).

La presión parcial del H₂S se expresa de la siguiente manera:

$$P_{parcialH_2S} = p * \% mol H_2S$$

$$p = \text{Presión a la profundidad de interés} \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

II.I.1.2 Presión parcial del CO₂

La concentración del CO₂ en el agua está determinada por la presión parcial del gas en contacto con el agua de formación y se expresa de la siguiente manera:

$$P_{parcialCO_2} = p * \%mol CO_2$$

II.1.1.3 Combinación de sistemas H₂S- CO₂

Cuando se encuentran los dos compuestos, H₂S y CO₂, el sistema será muy corrosivo, por lo que se deberán calcular ambas presiones, así como determinar el nivel de corrosión y el material requerido para ese ambiente con la ayuda de la **TABLA II.1** y la **IMAGEN II.1**.

TABLA II. 1 Recomendación de acero en base a la relación: compuesto - presiones parciales - corrosión esperada²¹

Compuesto	Presiones Parciales	Corrosión Esperada	Acero Recomendado
CO ₂	● Mayores o iguales a 30 psi	● Alta	● TRC-95
	● Entre 3 a 30 psi	● Media	● TRC-95, L-80
	● Menores a 3 psi	● No se presenta	● Cualquier grado
H ₂ S	● Mayores a 1.5 psi	● Alta	● TRC-95
	● Entre 0.05 a 1.5 psi	● Media	● TRC-95, L-80
	● Menores a 0.05	● No se presenta	● Cualquier grado

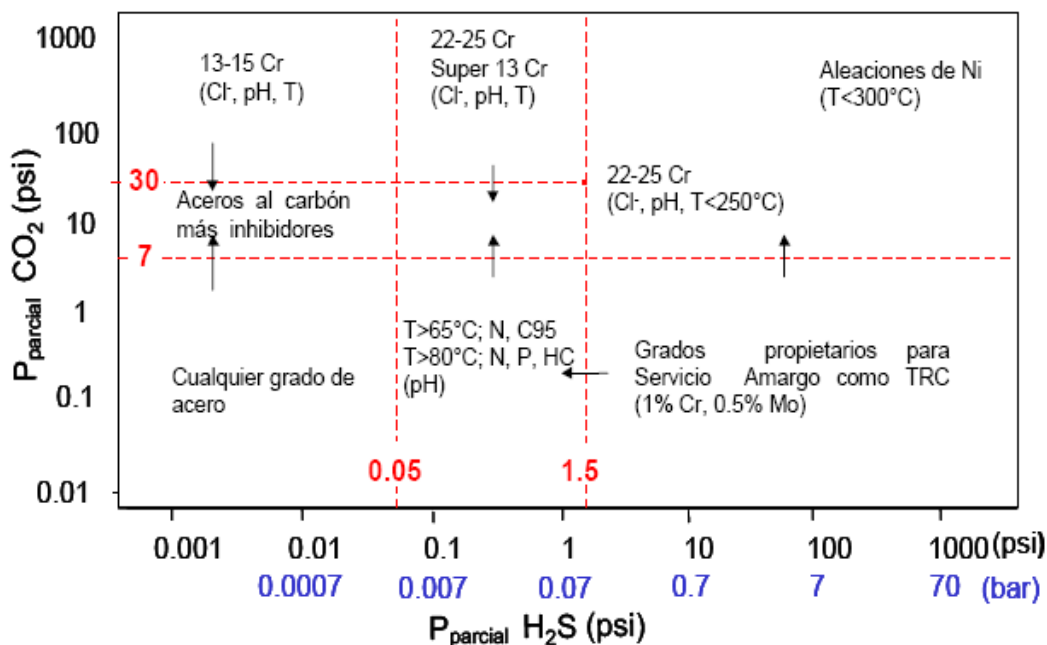


IMAGEN II. 1.- Determinación del material requerido de acuerdo a un sistema combinado de H₂S - CO₂

²¹ Guía de diseño para aparejos de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).

II.1.1.4 Efecto de la temperatura sobre la corrosión

Para el caso de la temperatura se tiene que utilizar un factor de corrección por temperatura, los cuales son proporcionados por los fabricantes de tuberías, a continuación, en la **TABLA II.2**, se mencionan algunos de los factores más utilizados en la industria.

TABLA II. 2.- Factores de reducción de acuerdo a la temperatura más utilizados

Temperatura [°C]	Factor de reducción				
	N-80	TRC-95	P-110	TAC-110	TAC-140
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	0,97	0,99	0,94	0,94	0,94
125	0,96	1,00	0,94	0,94	0,94
150	0,92	0,93	0,91	0,91	0,94
175	0,93	0,97	0,94	0,94	0,97
200	0,90	0,95	0,90	0,90	0,89
300	0,94	0,95	0,92	0,92	0,83
400	0,89	0,86	0,84	0,84	0,83

II.1.2 Esfuerzos en la tubería de producción

II.1.2.1 Esfuerzos uniaxiales

El aparato de producción está sujeto a varios esfuerzos; por tanto, las cargas como resistencia a la presión interna, colapso y tensión de la tubería, deben ser calculadas bajo diferentes condiciones ya que las principales fallas de las tuberías se dan por dichas cargas. Estos esfuerzos se calcularán en primer lugar bajo condiciones uniaxiales.

II.1.2.1.1 Presión interna

Cuando la falla es por presión interna (Burst) se genera estallamiento, esto pasa cuando se tiene una p_i mayor a la resistencia que opone el cuerpo del tubo al estallamiento.

$$p_i = 0.875 \left(\frac{2 Y_x t}{D} \right)$$

$$t = \text{Espesor de la Pared} \left(\frac{D-d}{2} \right)$$

$$D = \text{Diámetro externo de la tubería} [pg]$$

$$d = \text{Diámetro interno de la tubería} [pg]$$

$$p_i = \text{Presión Interna de la Tubería} [psi]$$

$$Y_x = \text{Esfuerzo de Cedencia (Tablas)} [psi]$$

$$0.875 = \text{Constante de mínimo espesor permisible}$$

II.1.2.1.2 Tensión

Cuando la tubería está expuesta a una fuerza de tensión mucho mayor a lo que resiste el grado del acero sufrirá una deformación permanente.

$$T = \frac{\pi}{4} Y_x (D^2 - d^2) \quad \text{ó} \quad T = Y_x A_s$$

$$\text{donde: } A_s = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

$T = \text{Tensión}[\text{lbs}]$

$A_s = \text{Área transversal de la tubería}$

$Y_x = \text{Esfuerzo de Cedencia (tablas) [psi]}$

El grado nos define el esfuerzo de cedencia de la tubería, el cual consiste en una letra seguida de un número. Por ejemplo una tubería de revestimiento de grado de acero N-80, tiene un esfuerzo mínimo de cedencia de $Y_x = 80,000 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$.

II.1.2.1.3 Colapso

La falla por colapso de una tubería se da cuando la TP está expuesta a una presión externa superior a su capacidad de resistencia. El API emplea cuatro formulas para determinar la presión de colapso basado en diferentes tipos de fallas, la relación entre el diámetro externo y el espesor de la pared (esbeltez), dará la formula a utilizar.

$$\text{Esbeltez } e = \frac{D}{t}$$

De acuerdo a la grafica siguiente, se diseñara para el tipo de colapso que se podría presentar en la tubería tomando la relación ya mencionada.

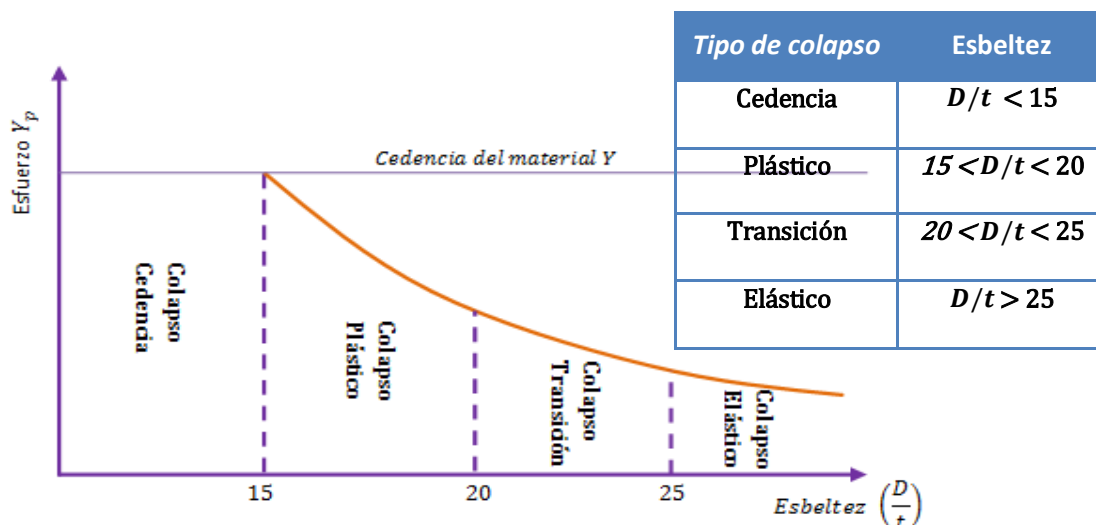


IMAGEN II. 2.-Relación esfuerzo de cedencia / esbeltez, para determinar el tipo de colapso

$$P_{cc} = 2Y_x \left[\frac{\frac{D}{t} - 1}{\left(\frac{D}{t}\right)^2} \right]$$

P_{cc} = Presión de Colapso de Cedencia [psi]

$$P_{cp} = Y_x \left[\frac{A}{\left(\frac{D}{t}\right)} - B \right] - C$$

P_{cp} = Presión de Colapso Plástico [psi]

Las constantes A, B y C son:

$$A = 2.8762 + 0.10679 \times 10^{-5} Y_x + 0.21301 \times 10^{-10} Y_x^2 - 0.53132 \times 10^{-16} Y_x^3$$

$$B = 0.026233 + 0.50609 \times 10^{-6} Y_x$$

$$C = -465.93 + 0.038867 Y_x - 0.10483 \times 10^{-7} Y_x^2 + 0.36989 \times 10^{-13} Y_x^3$$

$$P_{ct} = Y_x \left[\frac{F}{\left(\frac{D}{t}\right)} - G \right]$$

P_{ct} = Presión de Colapso de Transición [psi]

Los valores se obtienen de la siguiente manera:

$$F = \frac{46.95 \times 10^6 \left(\frac{3B/A}{2+B/A} \right)^3}{Y \left(\frac{3B/A}{2+B/A} - B/A \right) \left(1 - \frac{3B/A}{2+B/A} \right)^2} \quad G = FB/A$$

$$P_{ce} = \frac{46.95 \times 10^6}{\left(\frac{D}{t}\right) \left[\left(\frac{D}{t}\right) - 1 \right]^2}$$

P_{ce} = Presión de Colapso Elástico [psi]

Nota: Para obtener el esfuerzo de cedencia en algún punto de interés es necesario recurrir a la siguiente formula, tomando en cuenta el efecto de la fuerza de flotación.

$$Y_x = \frac{F}{AS} \quad \text{donde:} \quad F = \sum w_i h_i$$

F = fuerza ejercida por el peso total de la sarta (aire) [lb_f]

w_i = Peso unitario de la tubería $\left[\frac{lb_f}{pie} \right]$

h_i = Longitud de la sarta [pies]

Debido a que no se consideran esfuerzos simultáneos en el diseño uniaxial, se tienen que tomar en cuenta los efectos triaxiales, ya que en una terminación real la tubería siempre está expuesta a combinación de esfuerzos.

II.1.2.2 Esfuerzos triaxiales

El esfuerzo triaxial no es un esfuerzo verdadero, es un valor teórico de la resultante de esfuerzos en tres dimensiones que puede compararse con el esfuerzo de cedencia de la tubería, es decir, si el esfuerzo triaxial excede el esfuerzo de cedencia se presentara una falla²².

El efecto triaxial es representado matemáticamente como:

$$\sigma_t = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2} \quad \text{Ec 1.1}$$

donde:

$$\sigma_\theta = \text{Esfuerzo tangencial (psi)} \quad \sigma_\theta = \frac{p_i r_i^2 (r_o^2 + r^2) - p_o r_o^2 (r_i^2 + r^2)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)}$$

$$\sigma_r = \text{Esfuerzo radial (psi)} \quad \sigma_r = \frac{-p_i r_i^2 (r_o^2 - r^2) - p_o r_o^2 (r^2 - r_i^2)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)}$$

$$\sigma_z = \text{Esfuerzo axial (psi)} \quad \sigma_z = \frac{T}{A_s}$$

$$p_o = \text{Presión externa TP (lb/pg}^2\text{)} \quad P_o = \frac{\rho h}{10}$$

$$p_i = \text{Presión interna TP (lb/pg}^2\text{)} \quad P_i = \frac{\rho h}{10}$$

$$r = \text{distancia radial entre TP y TR [pg]} \quad r = r_{\text{int.TR}} - r_{\text{ext.TP}}$$

$$r_o = \text{Radio externo (pg)}$$

$$r_i = \text{Radio interno (pg)}$$

$$t = \text{Espesor (pg)}$$

²² Ingrid Devora Almeida García; "Cuaderno de ejercicios de Terminación de Pozos"; Facultad de Ingeniería (UNAM); 2005.

Para determinar el esfuerzo triaxial en cualquier punto del cuerpo de la tubería se utiliza la ecuación del modelo triaxial:

$$\sigma_t = \sqrt{f_3^2 + f_1^2 f_2^2} \quad \text{que representa la simplificación de la ecuación Ec 1.1}$$

donde:

$$f_1 = \left(\frac{r_i}{r}\right) \frac{\sqrt{3}}{2} (p_o - p_i)$$

$$f_2 = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{D}{t}\right)^2}{\left(\frac{D}{t} - 1\right)}$$

$$f_3 = \sigma_z - \frac{r_i^2 p_i - r_o^2 p_o}{r_o^2 - r_i^2}$$

Este modelo queda representado por las variables de presión externa, presión interna, esfuerzo axial, delgadez y cedencia del material. Para determinar la resistencia de las tuberías se utilizan las siguientes consideraciones:

- 1) Capacidad de Resistencia a la falla por colapso.
- 2) Capacidad de Resistencia a la presión por estallamiento.

Para el primer caso se tienen las ecuaciones:

$$\sigma_z = -\omega_1 p_o \pm \sqrt{Y_x^2 - \left[\frac{\sqrt{3}}{2} p_o f_2\right]^2}$$

$$p_o = \pm \sqrt{\frac{Y_x^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2}}$$

ω_1 y ω_2 se representan como:

$$\omega_1 = \frac{r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad \text{y} \quad \omega_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} f_2$$

Nota: Se supone que no hay presión por el interior de la tubería.

Para el segundo caso se tienen las ecuaciones:

$$\sigma_z = \omega_3 p_i \pm \sqrt{Y_x^2 - \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} p_i f_2\right]^2}$$

$$p_i = \pm \sqrt{\frac{Y_x^2}{\omega_3^2 + \omega_2^2}}$$

ω_2 y ω_3 se representan como:

$$\omega_3 = \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad y \quad \omega_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} f_2$$

Nota: se supone que no hay presión por el exterior de la tubería.

El resultado de estas ecuaciones representa en forma gráfica una elipse (IMAGEN II.3) cuyos contornos simbolizan la resistencia tanto al colapso como el estallamiento para las diferentes condiciones del esfuerzo axial.

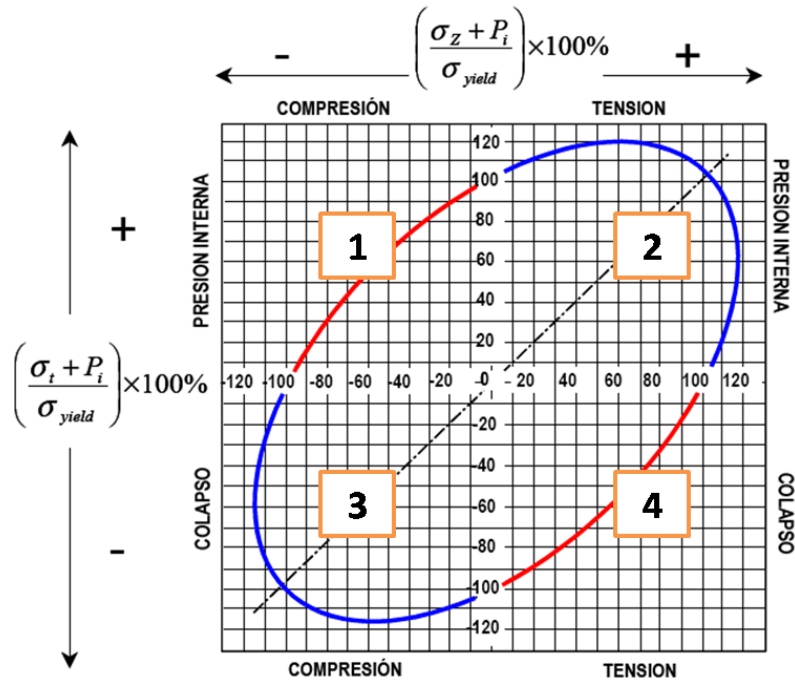


IMAGEN II. 3.- Elipse de esfuerzos triaxiales²³. Se observan cuatro cuadrantes: 1) capacidad de resistencia al estallamiento / falla por compresión, 2) capacidad de resistencia al estallamiento / falla por tensión, 3) capacidad de resistencia al colapso / falla por compresión, 4) capacidad de resistencia al colapso / falla por tensión

Para el caso resistencia al colapso, se utiliza la región del tercer y cuarto cuadrante de la gráfica (parte negativa de las resultantes), mientras que para el caso resistencia por estallamiento, se utiliza la región del primer y segundo cuadrante (parte positiva de las resultantes).

²³ Guía de diseño para aparejos de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).

II.1.3 Movimiento del aparejo de producción

Debido a los esfuerzos mencionados anteriormente se presentan los siguientes efectos en la tubería una vez conocido el tipo de material y grado:

- ⊕ Pistoneo
- ⊕ Baloneo
- ⊕ Alabeo
- ⊕ Temperatura

Estos efectos también se producen por los cambios de presión y temperatura que se presentan al cambiar la densidad del fluido de control y al efectuar operaciones que demandan presión, los efectos axiales provocan un cambio en la longitud en la TP debido a la elasticidad que tiene la tubería.

La elasticidad de las tuberías de acero da lugar a la deformación axial, que se da por el incremento de la carga axial, por lo que la ley de Hooke nos representa este fenómeno de deformación elástica.

La ley de Hooke es una relación entre la elongación y los esfuerzos axiales, esta se expresa matemáticamente como:

$$\frac{\text{Esfuerzo unitario}}{\text{Deformación unitaria}} = \text{constante} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E$$

$$\sigma = \text{Esfuerzo unitario} \frac{F}{A}$$

$$\varepsilon = \text{Deformación unitaria} \frac{e}{L}$$

“E” representa la constante elástica del material, a tensión o compresión y se le da el nombre de *módulo de Young*.

$$E = 3 \times 10^7 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \text{Módulo de Young para el acero.}$$

II.1.3.1 Efecto de pistoneo

Este efecto se basa en la ley de Hooke, y se debe a la diferencial de presión que actúa sobre la diferencial de área entre la tubería de producción y el mandril del empacador.

$$\Delta L_{\text{pistón}} = -\frac{LF_r}{EA_s}$$

L = Longitud TP [pies]

F_r = Fuerza resultante [lb]

ΔL = cambio de Longitud [pies]

A_s = Área transversal de la tubería

$$F_r = p_i(A_p - A_i) - p_o(A_p - A_o)$$

A_i = Área interior de la TP [pg^2]

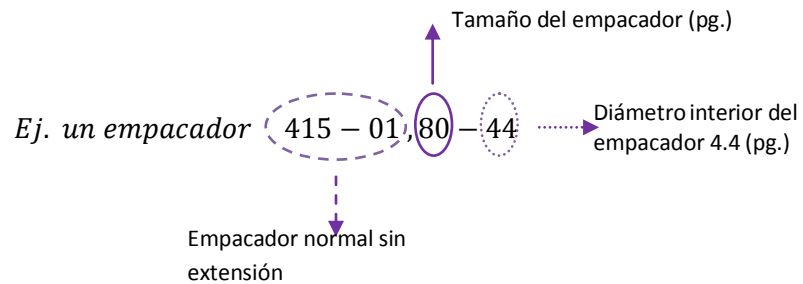
$$A_i = \frac{\pi}{4} (d_{\text{int TP}}^2)$$

A_o = Área exterior de la TP [pg^2]

$$A_o = \frac{\pi}{4} (d_{\text{ext TP}}^2)$$

A_p = Área interior del empacador [pg^2]

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{\text{int empacador}}^2)$$



Nota: Para disminuir el efecto de acortamiento se inyecta presión en la T.R. y para anular el efecto pistón se tendría que manejar una fuerza resultante igual a cero.

II.1.3.2 Efecto de baloneo (ballooning)

El cambio en la longitud de la tubería se puede dar generalmente por el cambio en la densidad de los fluidos debido a trabajos de estimulación, cierre del pozo o por la producción.

$$\Delta L_{Balloning} = -\frac{\mu L^2}{E} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o - \left(\frac{1+2\mu}{2\mu} \right) \xi}{R^2 - 1} \right) - \frac{2\mu L}{E} \left(\frac{\Delta p_i - R^2 \Delta p_o}{R^2 - 1} \right)$$

L = Longitud TP [pies]

E = Módulo de Young $E = [3 \times 10^7] \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$

R = Relación de diámetros $R = \left(\frac{D}{d} \right) [pg]$

μ = Relación de Poisson del material ($\mu = 0.3$)

Δp_i = Cambio de presión dentro de la TP $\left[\frac{lb}{pg^2} \right]$

Δp_o = Cambio de presión fuera de la TP $\left[\frac{lb}{pg^2} \right]$

$\Delta \rho_i$ = Cambio de densidad dentro de la TP $\left[\frac{lb}{pg^3} \right]$

$\Delta \rho_o$ = Cambio de densidad fuera de la TP $\left[\frac{lb}{pg^3} \right]$

ξ = Caída de Presión en la tubería debido al flujo

Despreciando la caída de presión ξ la ecuación se reduce de la siguiente forma:

$$\Delta L_{Balloning} = -\frac{0.3L^2}{E} \left(\frac{\Delta \rho_i - R^2 \Delta \rho_o}{R^2 - 1} \right) - \frac{0.6L}{E} \left(\frac{\Delta p_i - R^2 \Delta p_o}{R^2 - 1} \right)$$

El primer término se refiere al efecto por el cambio en la densidad de fluidos y el segundo término considera el cambio de presión en el interior y exterior de la tubería.

II.1.3.3 Efecto de pandeo (buckling)

Este efecto se da cuando hay un incremento de presión en el interior de la tubería, como resultado de este efecto se acorta el aparejo de producción y el pandeo se produce del punto neutro hacia abajo.

Para el efecto de buckling se tienen que tener en cuenta las siguientes consideraciones²⁴:

- $P_i > P_o$
- Tubería con empacador que permita el **Libre Movimiento**
- $F = \text{Fuerza de compresión [lb]}$
- $n < L_{TT}$ *No esta totalmente alabeada*
- $n > L_{TT}$ *Esta totalmente alabeada*

$n = \text{Punto neutro}$
 $L_{TT} = \text{Longitud total de la tubería}$

Donde:

$$n = \frac{F}{\omega} \quad \text{y} \quad F = A_p(p_i - p_o)$$

$$\omega = \omega_T + \omega_i - \omega_o$$

$\omega_T = \text{Peso de la tubería por unidad de longitud (lb/pie)}$

$\omega_i = \text{Peso del fluido en el interior de la TP (lb/pie)} \quad \omega_i = 0.43(\rho_i)(A_i)$

$\omega_o = \text{Peso del fluido en el espacio anular (lb/pie)} \quad \omega_o = 0.43(\rho_o)(A_o)$

En el efecto "Pandeo helicoidal" se tienen dos casos:

El primer caso se tiene cuando la n es menor a la longitud total de la tubería, se considera que parte de la tubería se encuentra alabeada y se calcula de la siguiente forma:

$n < L_{TT}$ *Parcialmente alabeada*

$$\Delta L_{\text{Buckling}} = -\frac{r^2 F^2}{8 E I \omega}$$

Se tiene que:

$$I = \frac{\pi}{64} (D_{\text{ext TP}}^4 - d_{\text{int TP}}^4) \quad \text{y} \quad r = \frac{d_{\text{int TR}} - D_{\text{ext TR}}}{2}$$

$I = \text{Momento de inercia}$

$r = \text{Claro radial [pg}^2]$

²⁴ Apuntes del curso de terminación y reparación de pozos impartido por el ingeniero Leonardo Cruz Espinoza, semestre 2010-2.

En el segundo caso donde n es mayor que la longitud total de la tubería, por lo que se considera que toda la tubería se encuentra alabeada y se calcula de la siguiente forma:

$$n > L_{TT} \quad \text{Totalmente Alabeada}$$

$$\Delta L = -\frac{r^2 F^2}{8 E I \omega} \cdot \frac{L \omega}{F} \left(2 - \frac{L \omega}{F} \right)$$

de igual forma se calculan "I", "r" y se adiciona el parámetro "Pitch":

$$I = \frac{\pi}{64} (D_{ext TP}^4 - d_{int TP}^4) \quad \text{y} \quad r = \frac{d_{int TR} - D_{ext TR}}{2}$$

La distancia entre los espirales, conocida como "Pitch" se calcula como:

$$Pitch = \pi \sqrt{\frac{8 E I}{F}} \quad ; \quad Pitch = \frac{Distancia}{No. Espirales} = \frac{n}{No. Espirales}$$

$$No. Espirales = \frac{n}{Pitch}$$

Nota: para evitar el efecto de Buckling se tienen que igualar las presiones de p_i y p_o .

II.1.3.4 Efecto de temperatura

El cambio en la sarta de producción por causa del efecto de temperatura se da cuando existe inyección de fluidos a temperatura de superficie, este efecto sucede siempre y cuando se tenga un movimiento libre de los sellos multi-v, de lo contrario solo se producirán fuerzas sobre el empacador.

$$\Delta L_{Temp} = \frac{\beta L}{2} (T_{S2} - T_{S1})$$

$$\beta = \text{Coeficiente de expansión térmica del acero} \quad \beta = 69 \times 10^{-7} [^{\circ}\text{F}^{-1}]$$

$$T_{S1} = \text{Temperatura superficial antes de la prueba} [^{\circ}\text{F}]$$

$$T_{S2} = \text{Temperatura superficial despues de la prueba} [^{\circ}\text{F}]$$

$$L = \text{Longitud TP [pies]}$$

II.1.3.5 Cambio de longitud total

La suma de las elongaciones y contracciones generadas en la tubería debido a los efectos mencionados producen un cambio de longitud, se representa matemáticamente como:

$$\Delta L_{Total} = \Delta L_{Pistón} + \Delta L_{Balloning} + \Delta L_{Buckling} + \Delta L_{Temperatura}$$

Estos acortamientos o elongaciones dependen de la operación que se esté realizando al pozo.

II.II Efectos de presión sobre el empacador

El proceso sugerido en este documento para la selección de un empacador se basa en las cuatro consideraciones mencionadas en el primer capítulo: a) condiciones de operación, b) condiciones del pozo, c) procedimiento para correrlo y anclarlo y d) intervenciones futuras. De acuerdo con dichas consideraciones, pueden obtenerse una serie de parámetros que servirán para determinar empacadores candidatos, de los cuales finalmente deberá seleccionarse el adecuado teniendo en cuenta además de que cumpla con las condiciones de operación, el costo.

A continuación se presentan las fórmulas y métodos para la determinación de: la diferencial de presión en el empacador, cargas axiales y temperatura a la cual estará sometido el empacador según la guía propuesta²⁵.

II.II.1 Diferencial de presión en el empacador

$$\Delta P_{Emp} = P_{SE} - P_{BE} \quad Ec 2.1$$

ΔP_{Emp} = Presión diferencial en el empacador [psi]

P_{SE} = Presión sobre el empacador [psi]

P_{BE} = Presión bajo el empacador [psi]

Para las pruebas de inducción:

$$P_{SE} = 1.422 * \rho_{fe} * D_{VE} + P_{TR} \quad Ec 2.2$$

$$P_{BE} = 1.422 * \rho_{N2} * D_{VE} + P_{fN} + P_{TP} \quad Ec 2.3$$

ρ_{fe} = Densidad del fluido empacador $\left[\frac{gr}{cm^3}\right]$

D_{VE} = Profundidad vertical del empacador [m]

P_{TR} = Presión en el espacio anular [psi]

ρ_{N2} = Densidad del nitrógeno $\left[\frac{gr}{cm^3}\right]$

P_{fN} = Pérdidas por fricción del nitrógeno [psi]

P_{TP} = Presión en la tubería de producción [psi]

Nota: Para fines prácticos pueden ser despreciadas las pérdidas por fricción del nitrógeno

Para las pruebas de admisión:

$$P_{SE} = 1.422 * \rho_{fe} * D_{VE} + P_{TR} \quad Ec 2.4$$

$$P_{BE} = 1.422 * \rho_{ft} * D_{VE} + P_{bba} - P_{ft} \quad Ec 2.5$$

²⁵ Guía de diseño para empacadores de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).

ρ_{ft} = densidad del fluido de terminación $\left[\frac{gr}{cm^3}\right]$

P_{bba} = Presión de bombeo [psi]

P_{fT} = Pérdidas por fricción del fluido de terminación [psi]

Para las pruebas de estimulación y fracturamiento.

$$P_{SE} = 1.422 * \rho_{fe} * D_{VE} + P_{TR} \quad Ec 2.6$$

$$P_{BE} = 1.422 * \rho_{finy} * D_{VE} + P_{bba} - P_{finy} \quad Ec 2.7$$

ρ_{finy} = densidad del fluido de inyección $\left[\frac{gr}{cm^3}\right]$

P_{finy} = pérdidas por fricción del fluido de inyección [psi]

II.II.2 Cargas axiales

Los cálculos para determinar los efectos que general el movimiento del aparejo (Baloneo, Pistón, Buckling y Temperatura) se detallan en la sección 1 del capítulo 2 de este documento (aparejos de producción).

II.II.3 Temperatura a la cual estará trabajando el empacador

$$G_T = \frac{T_Y - T_S}{D_{Vy}} \quad Ec 2.8$$

G_T = Gradiente de temperatura $\left[\frac{^{\circ}C}{m}\right]$

T_Y = Temperatura del yacimiento [$^{\circ}C$]

T_S = Temperatura en superficie [$^{\circ}C$]

D_{Vy} = Profundidad vertical del yacimiento [m]

$$T_{Emp} = T_S + G_T * D_{VE} \quad Ec 2.9$$

T_{Emp} = Temperatura a la profundidad del empacador [$^{\circ}C$]

II.II.4 Fluidos producidos

La salinidad del agua de formación.- En soluciones de cloruro de sodio la conductividad eléctrica es mayor que en las soluciones libres de cloruros, por lo tanto la probabilidad de corrosión se incrementa.

El pH del agua de formación.- La presión parcial del H₂S y la concentración del ion hidrógeno influyen en la cantidad de hidrógeno atómico que entra en el acero, lo que ocasiona la corrosión.

Nota: Para más detalles sobre la acción corrosiva de los fluidos sobre el aparejo y el empacador, revisar la sección 1 del capítulo 2 de este documento.

II.III Diseño de fluidos empacadores (salmueras)

La importancia de un buen diseño del fluido empacador en la terminación de un pozo, implica evitar la corrosión de las tuberías, mantener el control del pozo en caso de falla del empacador, y también ayuda a la recuperación de los aparejos durante las reparaciones del pozo, etc.

Debido a los altos costos de los fluidos empacadores base-aceite, en esta sección sólo se manejan los fluidos empacadores base-agua (salmueras), siendo estas las más comúnmente utilizadas por: a) su bajo costo, b) no dañan a la formación, c) son densificables, y d) se les puede agregar aditivos para tener un mejor control del pozo.

Se calcula la P_h de una salmuera con la siguiente expresión:

$$P_h = 1.422 \cdot \rho_{prom} \cdot H$$

H = Profundidad vertical de la columna hidrostática [m]

P_h = Presión hidrostática ejercida en el fondo [psi]

ρ_{prom} = Densidad promedio de la salmuera $\left[\frac{gr}{cm^3}\right]$

Debido a que el cálculo de la densidad en superficie de una salmuera está en función de la presión y la temperatura, se tiene que hacer una corrección tomando en cuenta la expansión térmica y compresibilidad; algunos factores de expansión y de compresibilidad se aprecian en la

TABLA II.3.

$$\rho_{cs} = \rho_{prom} + \left[\frac{(T_p - 70) \times C_e - (0.5 \times P_h \times C_c)}{8.345} \right]$$

ρ_{cs} = Densidad a condiciones estándar $[gr/cm^3]$

C_c = Factor de compresibilidad $[lb/gal/psi]$

C_e = Factor de expansión $[lb/gal/°F]$

T_{sup} = Temperatura superficial $[21 °C]$

$$T_p = \frac{T_{sup}(°F) + T_{fondo}(°F)}{2}$$

TABLA II. 3.- Factores de expansión y compresibilidad para salmueras con distintas densidades

Densidad Salmuera $\left[\frac{gr}{cm^3}\right]$	Factor de Expansión $[lb/gal/°F] \times 10^2$	Factor de Compresibilidad $[lb/gal/psi] \times 10^{-4}$
1.08 – 1.32	.24	.19
1.33 – 1.74	.33	.17
1.75 – 2.04	.36	.22
2.05 – 2.30	.48	.31

Nota: la corrección por temperatura y presión solo se hace en pozos profundos, en pozos someros la corrección por presión y temperatura es despreciable.

II.III.1 Salmuera simple

El procedimiento matemático para cambiar la densidad en una *salmuera simple* es:

$$V_f = V_o \times \frac{W_o}{W_f}$$

V_f = Volumen final de la salmuera [bls]

V_o = Volumen original de la salmuera [bls]

W_f = Contenido final de agua [bls/bl de salmuera]

W_o = Contenido original de agua a la $\rho_{\text{salmuera original}}$ [bls/bl de salmuera]

Como aumenta la densidad de la salmuera se calcula su volumen final, posteriormente se calcula el peso requerido de la sal.

$$S_a = S_f V_f - V_o S_o$$

S_a = Contenido adicional de sal [lbs/bl de salmuera]

S_o = Contenido original de sal [lbs/bl de salmuera]

S_f = Contenido final de sal [lbs/bl de salmuera]

Nota: para disminuir la densidad de una salmuera se agrega agua.

El volumen final será:

$$V_f = \frac{V_o S_o}{S_f} \text{ Implícitamente se puede obtener la } \rho_{\text{salmuera}} = \frac{m}{V}$$

La **TABLA II.4** muestra una breve comparación entre fluidos base-agua y base-aceite.

TABLA II. 4.- Comparación de parámetros técnicos y económicos entre fluidos base aceite y base agua²⁶

Parámetro	BASE ACEITE				BASE AGUA		
	Aceite diesel	Emulsión diesel salmuera	Diesel (gelificado)	Agua dulce o de mar	Fluido de perforación	Salmuera de baja densidad	Salmuera con polímeros
<i>Daño a la formación</i>	BAJO	BAJO	BAJO	VARIA	ALTA	BAJO	BAJO
<i>Densidad</i>	BAJA	AMPLIA	MEDIA	BAJA	AMPLIO RANGO	MEDIA	ALTA
<i>Corrosión</i>	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	ALTA	AMPLIO RANGO	BAJO
<i>Aislamiento térmico</i>	BUENO	REGULAR	EXCELENTE	MALO	MALO	REGULAR	REGULAR
<i>Ecología</i>	REGULAR	MALO	REGULAR	BUENO	MALO	MALO	MALO
<i>Costo</i>	ALTO	ALTO	ALTO	BAJO	MEDIO	MEDIO	ALTO
<i>Estabilidad Temperatura</i>	EXCELENTE	BUENA	BUENA	BUENA	MEDIA	BUENA	BUENA

²⁶ Guía de diseño para fluidos empacadores de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).

II.IV Disparos

El diseño para el sistema de disparos es una de las partes más importantes de la terminación de un pozo, ya que la producción de hidrocarburos depende en gran parte del éxito que se tengan en éstos.

El diseño del sistema de disparo como son la penetración, densidad, diámetro del agujero, daño del lodo, etc., pueden ser evaluados usando la relación de productividad:

$$RP = \frac{\text{Producción de una zona entubada y disparada}}{\text{Producción de la misma zona en agujero abierto}}$$

Nota: La fase angular entre perforaciones sucesivas es un factor importante y de acuerdo a datos de campo la fase más utilizada en los disparos es de 60°.

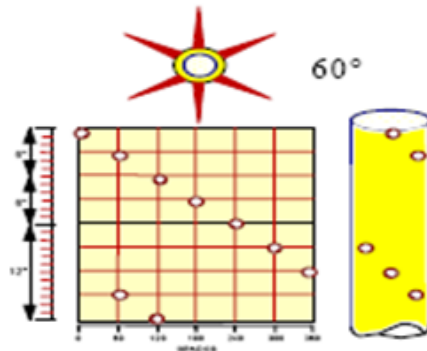


IMAGEN II. 4.- Disparos, fase 60°

Como se mencionó anteriormente existen dos técnicas aplicables en la ejecución de los disparos:

- ⊕ Sobre-Balance
- ⊕ Bajo-Balance

Debido a que es de mayor beneficio disparar el pozo con una presión diferencial a favor de la formación (bajo-balance), en este programa se utilizará esta técnica. En la **TABLA II.5** se mencionan las principales consideraciones para el cálculo de la presión diferencial.

TABLA II. 5.- Factores a considerar para el cálculo de la presión diferencial

Factores que se consideran para el cálculo de la presión diferencial	Grado de consolidación de la formación
	Permeabilidad de la formación
	Fluido en los poros
	Presión de colapso de las tuberías y equipo
	Grado de invasión del fluido de perforación
	Tipo de cemento

II.IV.1 Determinación del tipo de formación

El primer paso, es saber si la formación consolidada o no-consolidada utilizando los siguientes criterios:

Lecturas de registros en Lutita²⁷

Arena Consolidada	Arena No-Consolidada
Tiempo de tránsito:	Tiempo de tránsito:
$\Delta T < 100 \left[\frac{\mu\text{segundos}}{\text{pie}} \right]$	$\Delta T > 100 \left[\frac{\mu\text{segundos}}{\text{pie}} \right]$
Densidad volumétrica:	Densidad volumétrica:
$\rho_b > 2.4 \left[\frac{\text{gramos}}{\text{cm}^3} \right]$	$\rho_b < 2.4 \left[\frac{\text{gramos}}{\text{cm}^3} \right]$

Formación consolidada: los granos de arena se encuentran suficientemente cementados o compactados para permanecer intactos. Estos granos no fluirán, aún si se tiene un flujo turbulento en los espacios de los poros.

Formación No-consolidada: es una arena pobremente cementada o compactada de tal manera que los granos pueden fluir al haber movimiento de fluidos a través de la formación.

II.IV.2 Formaciones consolidadas

Se debe encontrar un punto medio entre una presión bajo balanceada mínima y una máxima, por lo que se utilizan la siguiente metodología.

Primero se tiene que calcular una presión diferencial máxima, esto se logra mediante las ecuaciones:

$$\sigma_z = \sigma_{sob} - P_p \quad \text{una consideracion que se debe tener es:} \quad \sigma_z < 1.7 * R_c$$

1.7 es el valor del esfuerzo máximo antes de existir movimiento en la matriz de formación.

Donde:

P_p = Presión de poro [psi]

R_c = Resistencia compresiva

σ_z = Esfuerzo efectivo [psi]

σ_{sob} = Presión de sobrecarga [psi]

²⁷ Guía de diseño para disparos de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).

Una vez que se cumple la condición anterior se realiza el cálculo siguiente:

$$P_{p\ min} = \sigma_{sob} - 1.7 * Rc$$

$P_{p\ min}$ = Presión de poro mínima para el movimiento de arena

$$\Delta P_{max} = Pf - P_{p\ min}$$

ΔP_{max} = Diferencial máxima de presión [psi]

Pf = Presión de formación al momento del disparo

Para el cálculo de la Pf :

$$ph = \frac{\rho h}{10} \quad \text{tomando en cuenta lo siguiente}$$

$Pf \leq ph$ esto es para evitar el derrumbe de la formación

ph = Presión Hidrostática [Kg/cm²]

h = Altura a la profundidad de los disparos [m]

ρ = densidad del fluido con el que se trabaja [gr/cm³]

Posteriormente se determina la presión bajo-balanceada mínima, aquí se tienen dos tipos de ecuaciones para el cálculo de la ΔP_{min} :

$$\Delta P_{min} = \frac{3500}{K^{0.37}} \rightarrow \text{Arena con Aceite}$$

$$\Delta P_{min} = \frac{2500}{K^{0.17}} \rightarrow \text{Arena con Gas}$$

Ya obtenidos los valores de ΔP_{min} , ΔP_{max} se calcula el punto medio de presión ΔP_{med}

$$\Delta P_{med} = \frac{\Delta P_{max} + \Delta P_{min}}{2}$$

La **TABLA II.6** y la **IMAGEN II.5** muestran los criterios que tenemos que seguir para determinar el valor que se le dará a la diferencial de presión.

TABLA II. 6.- Presión diferencial en función de la permeabilidad y el del tipo de fluidos producidos

FLUIDO PERMEABILIDAD	ACEITE	GAS
	Presión diferencial a favor del disparo [psi]	
ALTA----- $k > 100\ md$	200 – 500	1000 - 2000
BAJA----- $k < 100\ md$	1000 – 2000	2000 - 5000

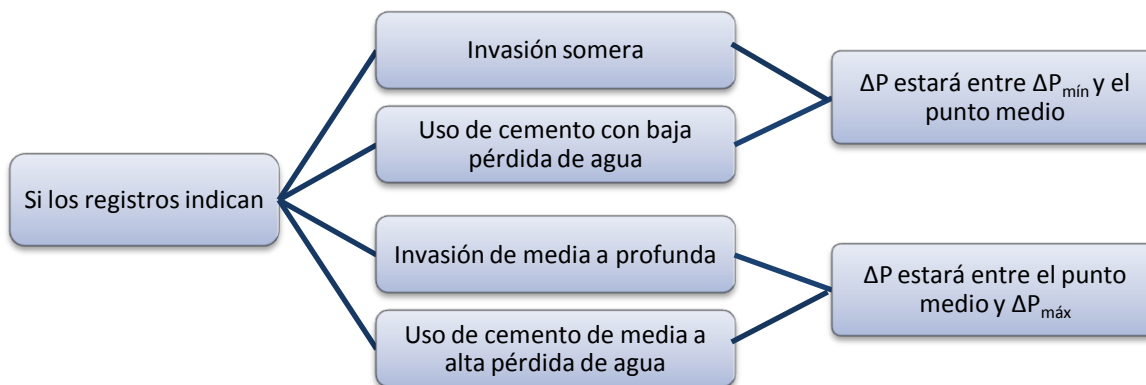


IMAGEN II. 5.- Criterios para determinación de la presión diferencial en relación con el tipo de invasión y cemento utilizado

II.IV.3 Formaciones no consolidadas

Al no tener una buena resistencia compresiva a la formación, se utiliza el siguiente procedimiento.

Presión diferencial máxima en arenas no-consolidadas con aceite.

$$\Delta P_{max} = 3600 - 20\Delta t \quad \text{ó} \quad \Delta P_{max} = 2340\rho b - 4000$$

$\rho b = \text{Densidad [grs/cm}^3\text{]}$

$\Delta t = \text{Tiempo de tránsito}[\mu \text{ seg/pie}]$

$\Delta P_{max} = \text{Diferencial máxima de presión [psi]}$

Presión diferencial máxima en arenas no-consolidadas con gas:

$$\Delta P_{max} = 4750 - 25\Delta t \text{ [psi]} \quad \text{ó} \quad \Delta P_{max} = 2900\rho b - 4700 \text{ [psi]}$$

Para obtener la ρb y Δt se utilizan las gráficas que se dan a continuación:

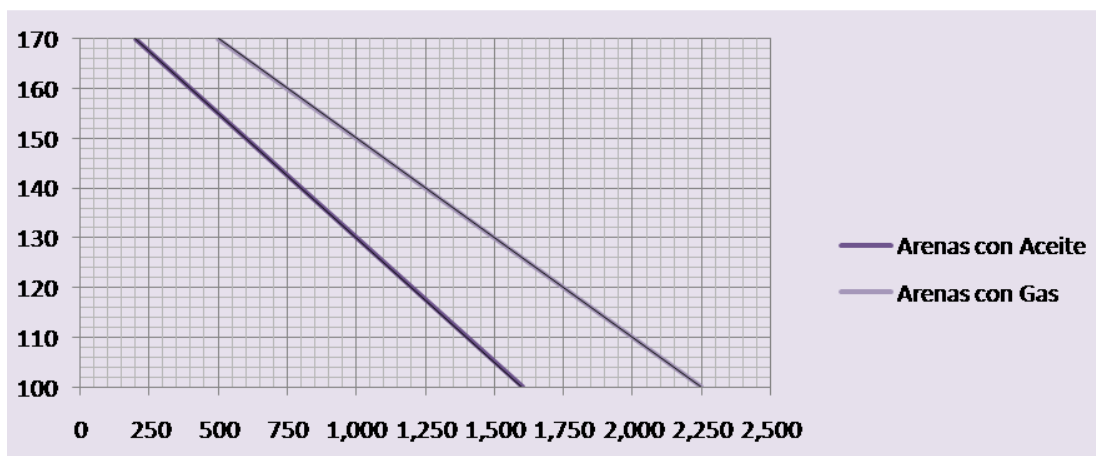


IMAGEN II. 6.- Grafica para obtener la presión bajo balanceada máxima para arenas no consolidadas con el registro sísmico. Tiempo de tránsito en lutitas adyacentes [micro segundos/ pie] (eje y) vs presión [psi] (eje x)

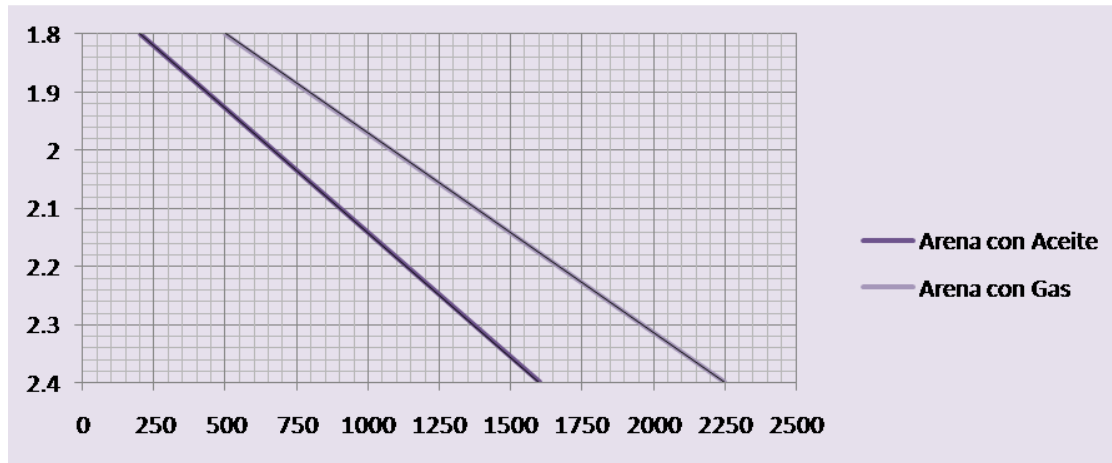


IMAGEN II. 7.- Grafica para obtener la presión bajo balanceada máxima para arenas no consolidadas con el registro de densidad.- Densidad volumétrica de lutita adyacente [gr/centímetro³] (eje y) vs presión [psi] (eje x)

Utilizando la permeabilidad de la formación se calcula la presión diferencial.

$$\Delta P_{min} = \frac{3500}{K^{0.37}} \rightarrow \text{Arena con Aceite}$$

$$\Delta P_{min} = \frac{2500}{K^{0.17}} \rightarrow \text{Arena con Gas}$$

Finalmente se determina la presión del punto medio.

$$\Delta P_{med} = \frac{(\Delta P_{m\acute{a}x} - \Delta P_{min})}{2}$$

Nota: Si se tiene una buena medida de la resistencia compresiva de la formación se utiliza el mismo procedimiento para determinar la $\Delta P_{m\acute{a}x}$ que en las arenas consolidadas.

II.IV.4 Aplicación del registro sísmico

El registro sísmico registra el tiempo de viaje de ondas que son emitidas, por ejemplo en cuerpos porosos el sonido viaja más lento y en cuerpos sólidos el sonido viaja más rápido, por lo que nos permite determinar junto con el registro de densidad y rayos gamma los esfuerzos reales y la resistencia o dureza de las formaciones perforadas.

Con estos registros podemos obtener la presión mínima para evitar el derrumbe de la formación, utilizando las siguientes formulas:

$$\Delta P_{max} = Pf - Ph_{(min)}$$

$$Ph_{(min)} = 1.422 * D_{disp} * \rho_{registro}$$

D_{disp} = Profundidad de los disparos [mts]

P_f = Presión de formación al momento del disparo [psi]

$P_{h_{min}}$ = Presión hidrostática mínima para evitar inestabilidad en el agujero [psi]

Posteriormente se utiliza un factor de seguridad.

⊕ Si ΔP_{max} , es mayor de 1,000[psi] se toma:

$$\text{Para gas: } Ph = Pf - (\Delta P_{m\acute{a}x} * 0.8)$$

$$\text{Para aceite: } Ph = Pf - (\Delta P_{m\acute{a}x} * 0.6)$$

⊕ Si ΔP_{max} , es menor de 1,000[psi] se toma:

$$\text{Para gas: } Ph = Pf - (\Delta P_{m\acute{a}x} * 0.6)$$

$$\text{Para aceite: } Ph = Pf - (\Delta P_{m\acute{a}x} * 0.4)$$

Para conocer la presión diferencial antes del disparo, se utiliza la presión hidrostática previamente calculada.

$$\Delta P = Pf - Ph$$

ΔP = Presión diferencial previa al disparo [psi]

Ph = Presión hidrostática [psi]

Finalmente para obtener la altura de la columna requerida se calcula:

$$Ph = Pf - \Delta P \quad \text{Se despeja } Dv \text{ de la siguiente fórmula}$$

$$\rho c = \frac{Ph}{1.4228 * Dv} \quad \text{quedando la siguiente expresión}$$

$$Dv = \frac{Ph}{1.4228 * \rho c}$$

Dv = Profundidad o altura de la columna [mts]

ρc = Densidad del fluido de control que se pretenda utilizar [grs/cm³]

II.V Lavado de pozo

Con base a una terminación, primero se tiene que realizar un proceso de lavado para limpiar el pozo, este proceso considera los siguientes parámetros (explicados en el capítulo 1.)

II.V.1 Sarta de lavado

Puede componerse principalmente de los siguientes elementos:

- Tubería de perforación.
- Tubo o niple aguja en la parte inferior.
- Escareadores.

En la **IMAGEN II.8** se puede observar la sarta de lavado que se recomienda para la limpieza del pozo²⁸

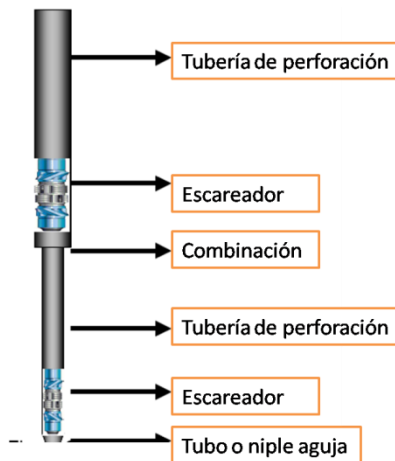


IMAGEN II. 8.- Sarta de lavado recomendada

II.V.2 Tipo, posición y cantidad de baches

Aquí es necesario recordar dos aspectos fundamentales, el primero que se necesitan varios fluidos para la limpieza del pozo (espaciador, lavador, viscoso y de terminación), el segundo que cada uno de esos fluidos debe ser ingresado en el orden que se muestra en la **IMAGEN II.9**.

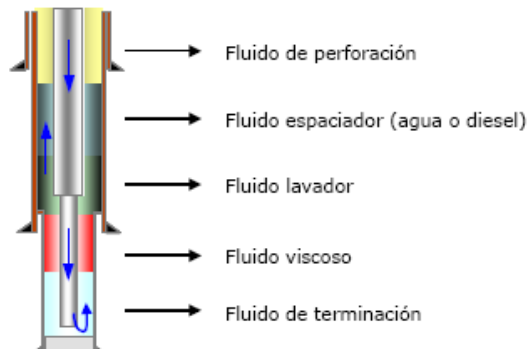


IMAGEN II. 9.-tipos de fluidos y cronología de inyección

²⁸ Guía de lavado de pozo. Gerencia de ingeniería, PEMEX.

En la **TABLA II.7** se presentan los datos requeridos para poder obtener los parámetros fundamentales en los apartados que siguen (II.V.3, II.V.4 y II.V.5)

TABLA II. 7.- Datos requeridos para el cálculo de parámetros según el tipo de fluido

Tipo de Bache	Datos requeridos para cálculo de parámetros
Fluido Espaciador (agua o diesel)	ρ_{fs}, μ
Fluido Lavador	ρ_{fl}, μ
Fluido Viscoso	$L_{600}, L_{300}, \text{Velocidad de Marsh}$
Fluido de Terminación	ρ_{ft}

$$\rho_{fs} = \text{Densidad del fluido espaciador} \left[\frac{gr}{cm^3} \right]$$

$$\mu = \text{Viscosidad [cp]}$$

$$\rho_{fl} = \text{Densidad del fluido lavador} \left[\frac{gr}{cm^3} \right]$$

$$L_{600} = \text{Lectura del viscosímetro de Fann a 600}$$

$$L_{300} = \text{Lectura del viscosímetro de Fann a 300}$$

$$\rho_{ft} = \text{Densidad del fluido de terminación} \left[\frac{gr}{cm^3} \right]$$

II.V.3 Volumen o longitud lineal de los baches

Para calcular el volumen de los baches lavadores y viscosos para la operación de lavado, se utilizan los siguientes criterios:

- i. 150 m lineales en el espacio anular más amplio.

$$1.1 \text{ Vol[l]} = 0.5067 (d_2^2 - d_1^2) * 150 \text{ Para el Bache Lavador}$$

$$1.2 \text{ Vol[l]} = 0.5067 (d_2^2 - d_1^2) * 500 \text{ Para el Bache Separador}$$

$$d_1 = \text{Diámetro externo de la T. P. perforación. [pg]}$$

$$d_2 = \text{Diámetro interno de la T. R. [pg]}$$

- ii. 10 minutos de tiempo de contacto en el espacio anular.

$$\text{Vol[l]} = q * 37.85 \text{ Para el Bache Viscoso.}$$

$$q = \text{Gasto de Bombeo} \left[\frac{gal}{min} \right]$$

El tiempo de contacto se refiere al tiempo que estarán los baches en contacto con un punto específico en el espacio anular. Se calcula el volumen de los baches empleando los dos criterios, para posteriormente elegir el de menor volumen reduciendo la cantidad de fluido requerido, y por lo tanto los costos.

II.V.4 Presión diferencial máxima durante el desplazamiento

Esta presión sirve para determinar el equipo de bombeo que deberá utilizarse (TABLA II.8).

$$\Delta p = \frac{\text{prof}_{vert} * (\rho_{fp} - \rho_{fs})}{10}$$

TABLA II. 8.- Determinación del tipo de bomba a utilizar para el desplazamiento de fluidos en el lavado de pozo

Consideraciones	
Si:	Se utiliza:
$\Delta p \geq p_{tbl}$	Unidad de alta presión (UAP)
$\Delta p \leq p_{tbl}$	Bomba de lodos (BL)

$$\rho_{fp} = \text{Densidad del fluido de perforación} \left[\frac{gr}{cm^3} \right]$$

$$\rho_{fs} = \text{Densidad del fluido de separación} \left[\frac{gr}{cm^3} \right]$$

$$p_{tbl} = \text{Presión de trabajo de la bomba} \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

$$\Delta p = \text{Diferencial de presión} \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$\text{prof}_{vert} = \text{Profundidad vertical de la sarta} [m]$$

II.V.5 Ingeniería de fluidos

II.V.5.1 Propiedades y régimen de flujo de los baches

Es necesario saber que los baches lavadores y viscosos se comportan de manera diferente; los baches lavadores se comportan como fluidos Newtonianos, mientras que los baches viscosos se comportan como fluidos no Newtonianos.

A pesar de que los baches se comportan de acuerdo a modelos reológicos diferentes, el mejor desempeño de estos se da cuando se alcanza el flujo turbulento.

II.V.5.2 Velocidades anulares

La velocidad anular es el parámetro sobre el cual se tiene más control, pudiendo variar esta velocidad se podrá determinar una en particular en la que el régimen de flujo sea turbulento.

A continuación se presenta la metodología de cálculo de las velocidades anulares según el comportamiento reológico que presente el fluido a tratar.

Para el bache lavador (Newtoniano).- Determinando v (la única incógnita), reacomodando términos y factores de conversión:

$$\text{Si: } N_{re} = \frac{\rho v d}{\mu}$$

$$v = \frac{N_{re} * \mu}{6318.7 * \rho * (d_2 - d_1)}$$

N_{re} = número de Reynolds

ρ = densidad del fluido $\left[\frac{gr}{cm^3}\right]$

v = velocidad del fluido $\left[\frac{pie}{seg}\right]$

d_1 = diámetro externo de la T. Perforación [pg]

d_2 = diámetro interno de la T.R [pg]

μ = viscosidad del fluido [cp]

Para el bache viscoso (No Newtoniano).

Consideraciones:

$N_{re} \leq N_{re c}$ el flujo es laminar

$N_{re} \geq N_{re c}$ el flujo es turbulento

$$N_{re c} = \frac{6,318.7 \rho v_c (d_2 - d_1)}{\mu_a}$$

$$\text{donde } \mu_a = \frac{K (d_2 - d_1)^{(1-n)}}{144 v_c^{(1-n)}} \left(2 + \frac{1}{n}\right)^n$$

$$\text{cuando } n = 3.322 \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \quad K = \frac{510 \theta_{300}}{511^n}$$

$$\text{se establece } v_c = \left\{ \frac{N_{Rec} K}{909,893 \rho} \left(\frac{2 + \frac{1}{n}}{0.0208 (d_2 - d_1)} \right)^n \right\}^{\frac{1}{2-n}}$$

$N_{re c}$ = número de Reynolds critico

μ_a = viscosidad aparente [cp]

v_c = velocidad crítica de flujo $\left[\frac{pie}{seg}\right]$

K = indice de consistencia [equivale a cp]

n = indice de comportamiento

θ_x = Lectura del viscosímetro FANN – 35 a velocidad x

Nota: Como puede observarse, los índices de consistencia y de comportamiento, deberán ser calculados con ayuda del viscosímetro FAN-35.

II.V.5.3 Gasto mínimo de desplazamiento

De acuerdo con la velocidad que debe llevar cada fluido para alcanzar el régimen turbulento, se procede a calcular el gasto mínimo de bombeo para que se cumpla con dicha velocidad.

Para cualquiera de los dos fluidos (lavador o viscoso) :

$$q_{min} = 2.448v_c(d_2^2 - d_1^2)$$

$$q_{min} = \text{gasto de bombeo} \left[\frac{\text{gal}}{\text{min}} \right]$$

II.V.5.4 Eficiencia de transporte

Realizar este cálculo es necesario para saber si se está llevando a cabo un buen desplazamiento. El parámetro se calcula de formas distintas según el tipo de fluido.

Para el fluido lavador:

El factor de transporte (o de eficiencia) se representa mediante:

$$F_T = 1 - \frac{v_{sl}}{v_{fl}}$$

$$\text{donde } v_{sl} = \frac{1152(\rho_s - \rho)d_p^2}{\mu}$$

F_T = Factor de transporte [%]

d_p = Diámetro de la partícula [pg]

v_{sl} = Velocidad de desplazamiento de la partícula $\left[\frac{\text{pie}}{\text{seg}} \right]$

v_{fl} = Velocidad del fluido (baches) $\left[\frac{\text{pie}}{\text{seg}} \right]$

ρ_s = densidad de la partícula (baches) $\left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$

ρ = densidad del bache $\left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$

Nota: La velocidad de desplazamiento de la partícula se refiere a la velocidad con que son desplazados los sólidos. Como existen diferentes materiales dentro del pozo, se puede tomar como "material testigo" a la barita, que es de los más pesados.

Para el fluido viscoso:

De forma similar al cálculo para el bache lavador, se determina el factor de transporte para el bache viscoso, con diferente consideración para v_{sl} :

$$F_T = 1 - \frac{v_{sl}}{v_{fl}}$$

$$\text{donde } v_{sl} = 692 \frac{d_p^2}{\mu_a} (\rho_s - \rho)$$

d_p = Diámetro de la partícula [pg]

II.V.6 Nivel de turbidez (NTU)

La turbidez de un fluido es una medida de la luz dispersada por las partículas suspendidas en el fluido. Un fluido limpio ha sido definido como el que no contiene partículas de diámetro mayor a dos micras.

La observación y medición de este parámetro resulta importante, pues si se trabaja con un fluido sucio, el factor de eficiencia se verá disminuido, y por lo tanto la ejecución de la operación de lavado de pozo no estará cumpliendo su objetivo.

II.VI Estimulación matricial de pozos

En este apartado se detallan los principales procesos que se realizan en el desarrollo de una estimulación matricial, al final, se presentan consideraciones técnicas que sirven como base para una buena planeación, ejecución y terminación de la estimulación.

II.VI.1 Validación del pozo y del yacimiento propuesto

Antes de realizar una estimulación, deben evaluarse cuidadosamente ciertos parámetros que determinarán si un pozo es o no candidato para una estimulación matricial. Los procesos de evaluación se pueden dividir en dos grandes grupos: la validación de las condiciones del pozo y del yacimiento y la identificación de la presencia de pseudo-daño (TABLA II.9).

TABLA II. 9.- Parámetros a observar para determinar si un pozo es candidato a estimulación

Validación de las condiciones del pozo y del yacimiento mediante la revisión de:	Historia de presiones	Identificación de la presencia de pseudo-daños, tales como:	Baja densidad de disparos
	Cambios de estranguladores		Baja penetración de disparos
	Comportamiento de producción de agua		Fase inadecuada de disparos
	Comportamiento de la relación aceite-agua y gas-aceite		Formación de incrustaciones en el pozo
	Historia de intervenciones		Producción por debajo del punto burbuja (bloqueo por gas)
	Comportamiento del SAP (si lo tiene)		Producción de arena
	Revisión de conexiones y sistema superficial de producción		Tuberías colapsadas
	Verificación de la influencia de pozos inyectoros		Problemas por obstrucciones mecánicas
	Registros geofísicos (situación estructural)		Mala cementación
	Comparación de la producción con pozos cercanos		Diseños inadecuados de terminación (aparejo, SAP, estrangulador)
Comparación de la reserva del yacimiento con la producción acumulada del pozo.			

Nota: Los pseudo daños, son las condiciones que limitan el potencial de producción de un pozo y que no pueden ser corregidas mediante un tratamiento de estimulación.

II.VI.2 Determinación y caracterización del daño

El daño es el parámetro que definirá la factibilidad de realizar un tratamiento de estimulación. El daño deberá caracterizarse mediante:

- Pruebas de variación de presión.
- Análisis nodal.
- Análisis de laboratorio.

II.VI.3 Selección del sistema de fluidos para el tratamiento

Las características del daño determinan cuál será el sistema adecuado para el tratamiento. A continuación se presenta la **TABLA II.10** en la que se presenta el tipo de daño que puede remover un fluido.

TABLA II. 10.- Guía para la selección de tratamiento ácido

Tipo de Fluido	Fluido específico	Daño que el fluido puede remover	Observaciones
Ácidos	HCL	Incrustaciones, taponamiento por sólidos, bloqueo por agua	Usando carbonatos y arenas con 20% o más de calcita, o como precolchón para un tratamiento ácido con HF
	Ácido acético	Incrustaciones, taponamiento por sólidos, bloqueo por agua	Usando carbonatos y arenas con 20% o más de calcita, o como precolchón para un tratamiento ácido con HF y en altas temperaturas
	Ácido fórmico	Incrustaciones, taponamiento por sólidos, bloqueo por agua	Usando carbonatos y arenas con 20% o más de calcita, o como precolchón para un tratamiento ácido con HF y en altas temperaturas
	HF	Arcillas, incrustaciones, taponamiento por sólidos, bloqueo por agua	Arenas (con HCL ó ácido orgánico). Usado para limpieza de daño por lodo de perforación.
	HF generado in-situ	Arcillas, incrustaciones, taponamiento, por sólidos, bloqueo por agua	Posible penetración profunda, sólo en areniscas
Solventes	Solvente mutuo	Bloque por agua, emulsión, cambio de mojabilidad	Usado con otros aditivos como surfactantes para mejorar la permeabilidad relativa hidrocarburo
	Solvente aromático	Asfaltenos, parafinas, sludge, taponamiento por lubricantes	Usado con un agente de suspensión o con un antiasfaltenos, con dispersantes de sludge
	EDTA	Incrustación de sulfatos	
Agua	Agua caliente	Parafinas	Usado con agentes de suspensión

II.VI.4 Cálculo de parámetros para la ejecución

II.VI.4.1 Diseño de tratamiento ácido en areniscas

Para el diseño de tratamiento ácido en areniscas se procede mediante la siguiente metodología:

II.VI.4.1.1 Selección de los fluidos de estimulación

- Mediante pruebas de laboratorio.
- Determinación de la presión y gastos máximos de inyección:
- Mediante resultados de prueba de inyectividad ó con el procedimiento siguiente:

II.VI.4.1.2 Determinación de la presión y gasto máximo de inyección

- Cálculo de presión de fractura:

$$Pf(\text{psi}) = Gf * D$$

Pf = Presión de fractura [psi]

Gf = Gradiente de fractura $\left[\frac{\text{psi}}{\text{pie}}\right]$

D = Profundidad del intervalo de interés [pie]

- Cálculo de la presión máxima de inyección en superficie:

$$P_{S_{\max}} = Pf - 0.052 * \rho * D$$

$P_{S_{\max}}$ = Presión máxima de inyección en superficie [psi]

ρ = Densidad $\left[\frac{\text{lb}}{\text{gal}}\right]$

- Gasto máximo de inyección, menor de

$$qi_{\max} < \frac{(4.917 \times 10^6) * k * h * (Pf - Pws)}{(\mu_f) * (Ln(r_e/r_w))}$$

qi_{\max} = gasto máximo de inyección $\left[\frac{\text{bls}}{\text{min}}\right]$

k = permeabilidad de la formación [mD]

h = espesor [pie]

Pws = Presión estática [psi]

μ_f = Viscosidad de fluido [cp]

r_e = radio de drene [m]

r_w = radio de pozo [m]

II.VI.4.1.3 Fluido de prelavado (precolchón). Cálculo de volumen y tiempo de inyección

- *Volumen.*

Para tratamientos reactivos como no reactivos en arenas limpias:

$$V_p = 23.5 * \phi * h(r_x^2 - r_w^2)$$

Para estimulación ácida en areniscas:

$$V_{HCL} = \frac{23.5(1 - \phi) * h * (X_{HCL}) * (r_x^2 - r_w^2)}{\beta}$$

Si $V_p < V_{HCL}$ entonces $V_1 = V_{HCL}$

Si $V_p > V_{HCL}$ entonces $V_1 = V_p$

$V_p = V_1 =$ Volumen requerido del fluido de prelavado [gal]

$V_{HCL} =$ Volumen requerido del fluido (ácido clorhídrico) [gal]

$X_{HCL} =$ Fracción en peso del material soluble en HCL(ácido clorhídrico)

$\phi =$ Porosidad

$r_x =$ radio de daño (radio de zona alterada) [m]

$\mu_f =$ Viscosidad de fluido [cp]

$\beta =$ Poder de disolución

Nota: Mientras que para el volumen V_p se recomienda una penetración de 2 a 5 [pie] y en el caso de intervalos con longitudes mayores a 50 [pie] se recomienda utilizar desviadores de flujo para que el tratamiento se realice de manera selectiva), para V_{HCL} los tratamientos se limitan a penetraciones de 1 a 3 [pie] de la pared del pozo.

- *Tiempo de inyección del fluido de prelavado.*

$$t_1 = \frac{0.23805V_1}{q_i máx}$$

$t_1 =$ tiempo de inyección del prelavado [min]

II.VI.4.1.4 Fluido de estimulación (sistema ácido). Cálculo de volumen y tiempo de inyección

- Volumen del sistema ácido HF-HCL (o HF- Orgánico), V_2 .

A continuación se presenta el método más sencillo para determinar el volumen óptimo de acuerdo con los minerales de la formación.

- a) Penetración en arena limpia P_a [pg]. Con temperatura de formación y la **IMAGEN II.10** se obtiene P_a .

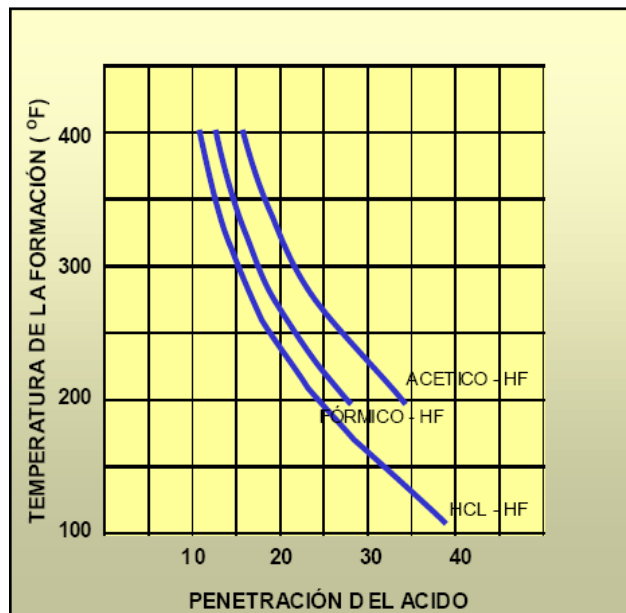


IMAGEN II. 10.- Penetración de ácido en arena limpia vs temperatura de la formación

- b) El valor obtenido de la penetración P_a debe ser corregido por el gasto de inyección P_{aq} [pg]. Con el gasto de inyección unitario $(\frac{q_i^{máx}}{h_f})$ y la **IMAGEN II.11** se obtiene C_q .

$$P_{aq} = C_q * P_a$$

P_{aq} = Corrección de P_a por gasto

C_q = Factor de corrección por gasto de inyección

h_f = Espesor del intervalo productor [pie]

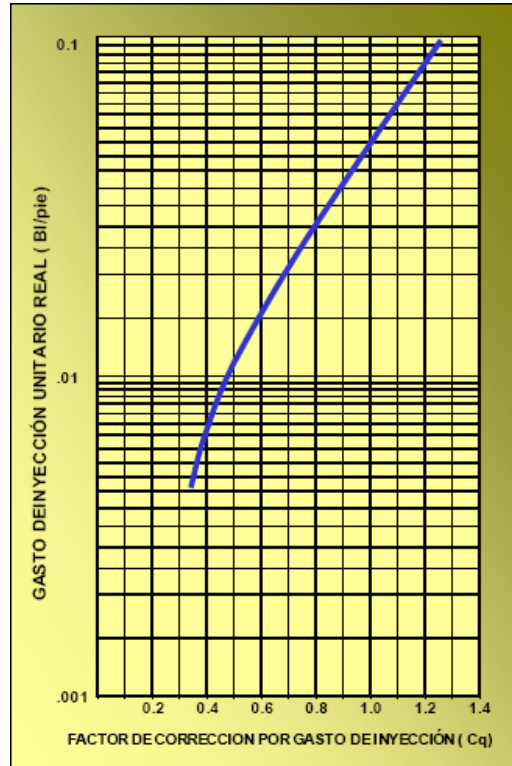


IMAGEN II. 11.- Efecto del gasto de inyección en la penetración del ácido

- c) Además de realizar la corrección de P_a por gasto de inyección se debe corregir P_{aq} por contenido de silicatos (P_{aqs} [pg]). Con la concentración de silicatos y la **IMAGEN II. 12** se obtiene el factor C_s .

$$P_{aqs} = P_{aq} * C_s$$

P_{aqs} = Corrección de P_a por gasto y contenido de silicatos

C_q = Factor de corrección por contenido de silicatos

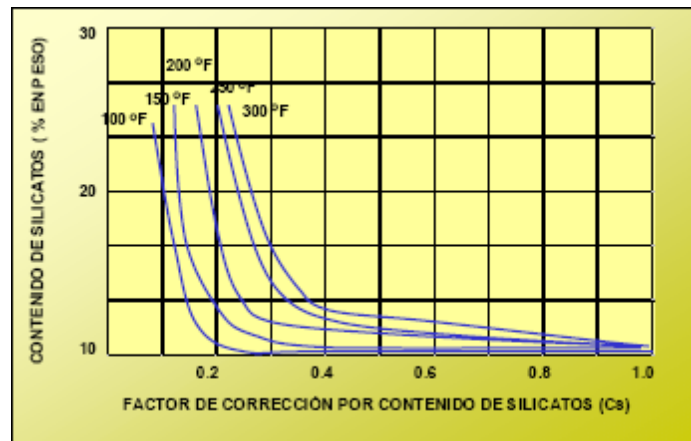


IMAGEN II. 12.- Efecto del contenido de silicatos en la penetración del ácido

d) Radios de penetración:

Radio de penetración r_{xp} (pg)

$$r_{xp} = r_w + P_{aqs}$$

Radio efectivo del factor de penetración, r_a (pg)

$$r_a = r_{xp}^2 - r_w^2$$

Con r_a y la **IMAGEN II.13** se obtiene el volumen unitario de ácido (V_a)

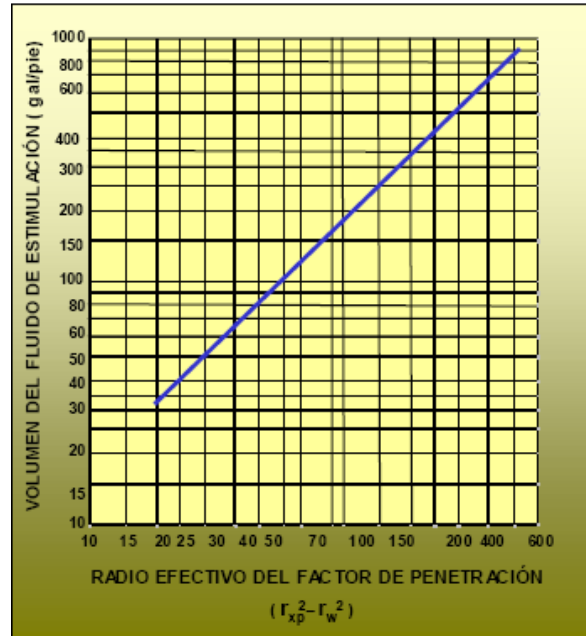


IMAGEN II. 13.- Volumen unitario del fluido de estimulación

Finalmente se puede obtener el volumen del fluido de estimulación (V_2) mediante la siguiente expresión

$$V_2 = V_a * h_f$$

- Tiempo de inyección del sistema ácido.

$$t_2 = \frac{0.023805 * V_2}{q_i \text{ máx}}$$

$t_2 =$ tiempo de inyección del sistema ácido [min]

$V_2 =$ Volumen sistema ácido [gal – pie]

II.VI.4.1.5 Fluido de desplazamiento. Cálculo de volumen V_3 y tiempo de inyección

- Volumen

Para un radio de penetración mínima de 4 pies.

$$r_{3xp} = 4 + r_w$$

$$V_3(\text{gal}) = 23.5\phi h_f * (r_x^2 - r_w^2)$$

V_3 = Volumen de fluido de desplazamiento [gal]

r_{3xp} = radio de penetración

V_3 debe estar entre $50 \left[\frac{\text{gal}}{\text{pie}} \right]$ y 1.5 veces el volumen V_2 , en caso contrario deberá tomarse el límite más cercano como V_3 .

- Tiempo de inyección del volumen del fluido de desplazamiento, t_3 (min).

$$t_3 = \frac{0.023895 * V_3(\text{gal})}{q_i \text{ máx (BPM)}}$$

t_3 = tiempo de inyección del volumen de desplazamiento [min]

V_3 = Volumen de desplazamiento [gal]

II.VI.4.1.6 Incremento de productividad esperado

$$\frac{Jd}{Jo} = \frac{\left(\frac{k_s}{k} \right) \ln(r_e/r_w)}{\ln(r_x/r_w) + \left(\frac{k_s}{k} \right) \ln(r_e/r_x)}$$

Jd = índice de productividad de un pozo dañado

Jo = índice de productividad de un pozo no dañado

k_s = Permeabilidad reducida por el daño

r_x = radio de daño

II.VI.4.2 Diseño de tratamiento ácido matricial en rocas calcáreas

Análogo al procedimiento para el tratamiento en areniscas, se realizan las siguientes actividades, con la consideración pertinente en el caso del cálculo del volumen del fluido de estimulación

Selección de los fluidos de estimulación:

Determinación de la presión y gasto máximo de inyección.

Cálculo del volumen del fluido de estimulación.

Se considera un intervalo menor o igual a 50 [pie]. Excederse, dividirá el volumen total de acuerdo con el procedimiento indicado para el caso de areniscas.

Para daño somero $r_x=5$ [pie]+ r_w

Para daño profundo $r_x=10$ [pie]+ r_w

$$V_f = 23.5 * \phi * h_f (r_x^2 - r_w^2)$$

Por experiencia de campo, este volumen debe estar entre 50 y 200 gal/pie, en caso contrario deberá tomarse el límite correspondiente.

Incremento de productividad esperado.

II.VI.5 Consideraciones técnicas

Cuando se trate de estimulación no reactiva, se deberá cerrar el pozo mínimo 24 horas para permitir que el surfactante actúe según la respuesta esperada. Si el fluido de estimulación fue ácido, se debe inducir el pozo inmediatamente después de terminada la inyección.

A continuación se presentan algunas de las actividades más importantes realizadas antes, durante ó después del proceso de estimulación:

- Supervisión de la instalación y prueba hidráulica de las unidades de bombeo y líneas de control.
- Represionamiento del espacio anular con la mitad de la presión máxima de inyección esperada para detectar anomalías.
- Recirculación de los productos de tratamiento antes de bombearlos al pozo para su homogeneización (aproximadamente durante 30 minutos). Recuperar una muestra de los fluidos después del tiempo de recirculación para comprobar su homogeneidad.
- Inyección de los fluidos de tratamiento según el programa. Monitoreo continuo de la presión en la TP y el espacio anular.
- Al finalizar el programa de bombeo, verificación de presión de cierre, presión final y presión estabilizada después de 10 minutos de cerrado el pozo

- Descargar las presiones del espacio anular si la presión final es menor o igual a 3000 [psi].
Desmantelamiento de las unidades de bombeo.
- Selección del estrangulador dependiendo de la presión final obtenida y apertura del pozo a la batería registrando el comportamiento de la presión.
- Recuperación y análisis continuo de muestras para monitorear la limpieza del pozo.
- Elaboración de reporte final incluyendo en él: presiones, volúmenes y gastos de inyección durante la estimulación.

II.VII Aislamiento de intervalos probados

A continuación se detallará el procedimiento de cálculo para determinar el volumen de la lechada de los tapones de cemento, altura de fluidos, volumen de desplazamiento

II.VII.1 Procedimiento de cálculo para el sistema del tapón

Determinación del volumen de lechada requerida en el agujero descubierto y en tubería de revestimiento.

$$V_{lch} = h_{cto} * C_{ad} \quad (\text{en agujero descubierto})$$

$$V_{lch} = h_{cto} * C_{TR} \quad (\text{en tubería de revestimiento})$$

V_{lch} = volumen de la lechada de desplazamiento requerido [lt]

h_{cto} = altura del cemento con la tubería de trabajo adentro del tapón [m]

C_{ad} = Capacidad del agujero descubierto $\left[\frac{lt}{m}\right]$

C_{TR} = Capacidad de la tubería de revestimiento $\left[\frac{lt}{m}\right]$

Determinación del número de sacos de cemento para una lechada con un rendimiento determinado.

$$N_{sc} = \frac{V_{lch}}{\text{Rento}}$$

N_{sc} = Número de sacos de cemento [sacos]

Rento = Rendimiento del cemento $\left[\frac{lt}{\text{saco}}\right]$

Determinación de la altura de la columna de cemento con la tubería de perforación o tubería flexible adentro del tapón y determinación de las alturas de los baches lavadores y separadores para balancear el tapón.

$$h_{cto} = \frac{V_{lch}}{C_{TR-TP} + C_{TP}}$$

h_{cto} = Altura del cemento con la tubería de trabajo adentro del tapón [m]

C_{TR-TP} = Volumen del espacio anular $\left[\frac{lt}{m}\right]$

C_{TP} = Capacidad de la sarta de trabajo $\left[\frac{lt}{m}\right]$

Determinación del volumen del cemento dentro de la tubería de trabajo para balancear el tapón.

$$V_{lch-TP} = h_{cto} * C_{TP}$$

V_{lch-TP} = Volumen de la lechada dentro de la sarta de trabajo [lt]

Determinación del volumen de cemento en el espacio anular de la tubería de revestimiento o del agujero descubierto.

$$V_{lch- ea} = h_{cto} * C_{TR-TP}$$

$$V_{lch- ea} = \text{Volumen de la lechada de cemento en el espacio anular [lt]}$$

Determinación del volumen de desplazamiento en la tubería de trabajo para balancear el tapón.

$$V_d = C_{fl} * C_{TP}$$

$$V_d = \text{Volumen de desplazamiento [lt]}$$

$$C_{fl} = \text{Cima de los fluidos [m]}$$

$$C_{fl} = bt - (h_{cto} + h_{bl} + h_{bs})$$

$$b_t = \text{base del tapón [m]}$$

$$h_{bl} = \text{Altura del bache lavador [m]}$$

$$h_{bs} = \text{Altura del bache separador [m]}$$

Determinación de la longitud mínima de cemento para poder soportar la presión diferencial sin ser removido y mantener sello hidráulico permanente.

$$L = \frac{\Delta P * di_{TR} * DEV}{5 * T_S}$$

$$\Delta P = \text{Presión diferencial aplicada sobre el tapón [psi]}$$

$$\Delta P = P_{ST} - P_{BT}$$

$$P_{ST} = \text{Presión sobre el tapón [psi]}$$

$$P_{ST} = 1.442 * \rho_f * D_{VE} + P_{bba-max}$$

$$P_{BT} = \text{Presión bajo el tapón [psi]}$$

$$P_{BT} = P_{FS} - (1.442 * \rho_f * D_{VEBT})$$

$$L = \text{Longitud mínima del tapón [m]}$$

$$di_{TR} = \text{Diámetro interior de la tubería de revestimiento [in]}$$

$$DEV = \text{Factor de desviación} = 1@0^\circ, 1.2@30^\circ, 1.6@60^\circ, 2@70^\circ \text{ [in]}$$

$$T_S = \text{Esfuerzo de corte a la adherencia entre el tapón y la T.R [psi].}$$

$$\rho_f = \text{Densidad del fluido fracturante o de formación} \left[\frac{gr}{cm^3} \right]$$

$$D_{VE} = \text{Profundidad vertical del tapón [m]}$$

$$P_{FS} = \text{Presión de fondo estática [psi]}$$

$$D_{VEBT} = \text{Profundidad vertical de la base del tapón a la cima del intervalo [m]}$$

Nota: Para obtener T_S debe utilizarse la gráfica que se observa en la **IMAGEN II.14** presentada al final de éste subcapítulo.

II.VII.2 Consideraciones técnicas

- ⊕ Deberán utilizarse baches lavadores por delante y por atrás, para evitar problemas de contaminación de la lechada. Éstos deberán ser de 0.12 a 0.24 [gr/cm³] a 0.24 [gr/cm³] mayor que el lodo, para ganar efecto de flotación y mejorar el desplazamiento y balanceo de la lechada.
- ⊕ Para aislar intervalos, se recomienda una altura anular mínima de 50 [m].
- ⊕ Se recomienda dejar de bombear 1 o 2 barriles antes de completar el volumen de desplazamiento, para dejar el nivel de cemento (dentro de la sarta de trabajo) arriba del nivel de cemento en el espacio anular, Esto asegura que el cemento que quedó adentro de la sarta caiga por gravedad, permitiendo que el tapón quede balaceado por sí mismo.
- ⊕ Se recomienda que la tubería de perforación se levante a una velocidad de 3 a 5 [min/lingada] para evitar movimiento de fluidos, hasta una altura de 200 [m] arriba de la cima de cemento y, de acuerdo con el programa, se circula en inverso para desalojar el cemento sobrante y limpiar la sarta o sólo se cierra el pozo para esperar su fraguado.
- ⊕ Cuando el tapón se coloca con tubería flexible se deberá levantar a una velocidad de 20 [m/min] hasta una altura de 400 [m] arriba de la cima de cemento y se procede de acuerdo al programa establecido.
- ⊕ El cemento deberá ser de mayor densidad que el lodo, para que salga de la tubería de perforación o de la tubería flexible al levantarla.
- ⊕ Un buen control de filtrado mantendrá la calidad de la lechada cuando se realicen movimientos con la tubería.
- ⊕ Se debe evitar la paralización del sistema para no provocar esfuerzos de gelatinización que puedan atrapar la tubería.
- ⊕ Para pozos con temperaturas menores a 140°C se deben agregar dos horas adicionales al obtenido en el laboratorio con temperatura circulante.
- ⊕ Para pozos con temperaturas arriba de 170°C se agregan dos horas pero considerando una temperatura promedio entre la circulante y la estática.
- ⊕ Se deben utilizar cementos que desarrollen un alto esfuerzo compresivo en periodos cortos de tiempo debiendo utilizar lechadas de agua reducida y alta densidad.
- ⊕ Para aislar intervalos con tapones de cemento en pozos con temperaturas mayores de 100°C será necesario agregar harina sílica para evitar la regresión de la resistencia compresiva.

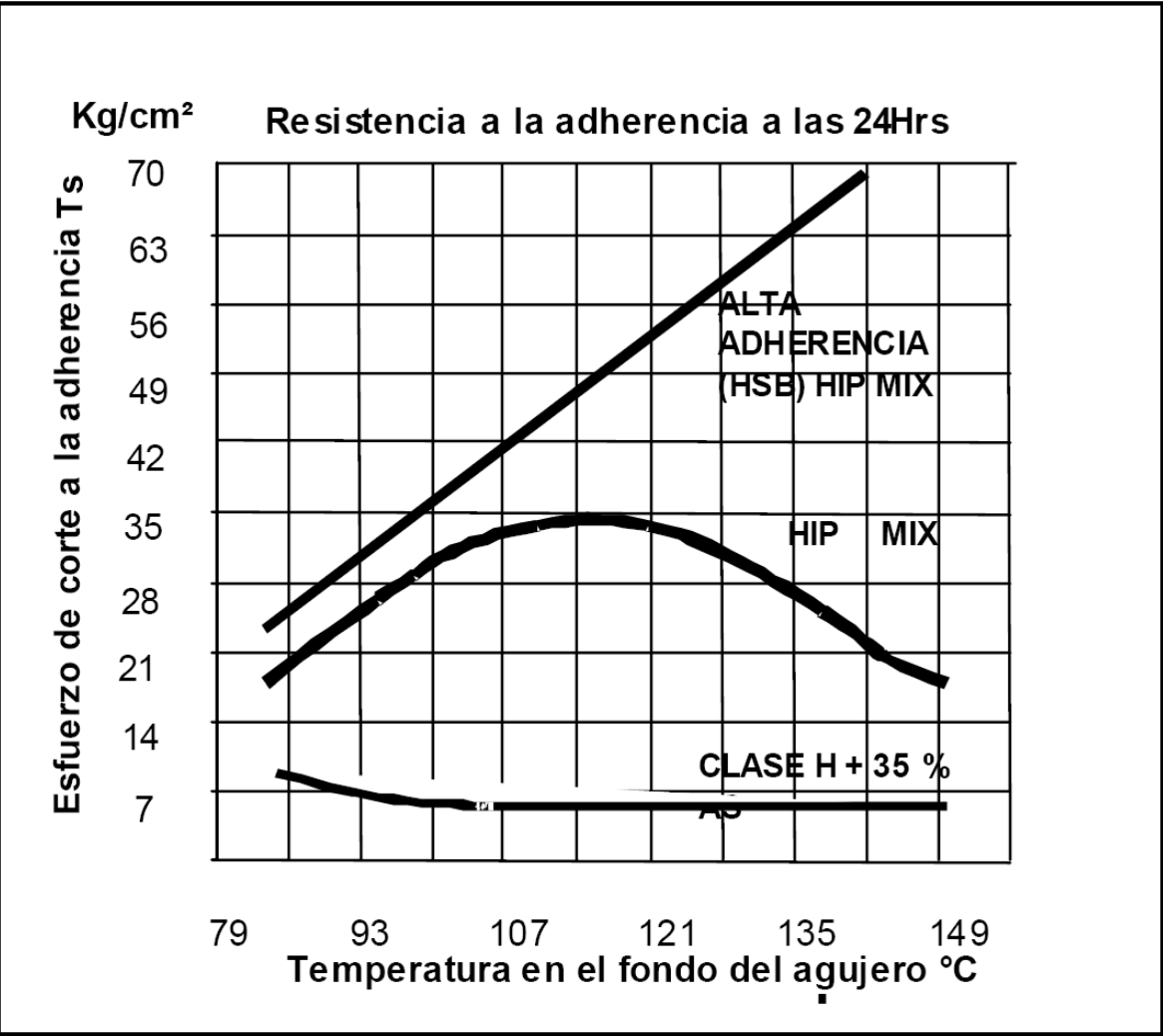


IMAGEN II. 14.- Grafica de temperatura vs esfuerzo de corte a la adherencia

II.VII Molienda de empacadores

En este apartado se detallará la metodología para determinar la hidráulica durante la molienda del empacador.

II.VII.1 Caracterización y determinación de propiedades del fluido

En primer lugar se debe realizar la caracterización del fluido a utilizar (fluido de reparación) con el fin de determinar a el modelo reológico al cual se ajusta su comportamiento.

Después, de acuerdo a la caracterización se obtendrá como parámetro principal la viscosidad del fluido. En el apéndice A de este documento se detalla el proceso para realizar la caracterización y como determinar factores necesarios según el comportamiento reológico que presente el fluido para calcular la viscosidad.

II.VII.2 Velocidad de transporte (v_T)

Se refiere a la velocidad con la que los recortes son transportados por el fluido desde el espacio anular a la superficie:

$$v_T = v_a - v_{sl}$$

v_a = Velocidad media del fluido

v_{sl} = Velocidad de deslizamiento

La velocidad media del fluido v_a se calcula como sigue:

$$v_a = \frac{q}{2.448 * (d_2^2 - d_1^2)}$$

q = Gasto supuesto del fluido $\left[\frac{gal}{min} \right]$

d_1 = Diámetro exterior de la TP [pg]

d_2 = Diámetro interior de la TR [pg]

El término v_{sl} se refiere a la velocidad con la que una partícula desciende a través del seno de un fluido y el modo de calcularla depende del tipo de modelo reológico que se tenga.

A continuación se detalla la manera de calcular v_{sl} para cada modelo (newtonianos, Bingham y Ley de potencias).

v_{sl} Para fluidos newtonianos.

$$v_{sl} = \frac{1152 * (\rho_s - \rho_f) * d_s^2}{\mu} \quad \text{Ec 8.1}$$

$$\rho_s = \text{Densidad del sólido} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$\rho_f = \text{Densidad del fluido} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$d_s = d_p = \text{Diámetro equivalente del recorte} [pg]$$

$$\mu = \text{Viscosidad} [cp]$$

Consideraciones:

La ecuación 8.1 se utiliza cuando el flujo alrededor de la partícula presenta un comportamiento laminar, es decir, que el número de Reynolds (N_{Re}) sea menor a 0.1, cuando:

$$N_{Re} = \frac{7744 * \rho_f * v_{sl} * d_s}{\mu} \quad \text{Ec 8.2}$$

Si se calcula la velocidad de deslizamiento con la ecuación 8.1, se sustituye su valor en la ecuación 8.2 y el N_{Re} resulta menor a 0.1, la velocidad de deslizamiento es la correcta, de lo contrario el flujo alrededor de la partícula tendría un comportamiento de turbulencia y la velocidad de deslizamiento deberá calcularse como sigue:

$$v_{sl} = 1.89 * \sqrt{\frac{d_s}{f} * \frac{(d_s - \rho_f)}{\rho_f}} \quad \text{Ec 8.3}$$

$f = \text{Factor de fricción}$

Nota: Para recortes irregulares:

$$d_s = 1.145 * h^{0.333} * d^{0.666}$$

$$h = \text{Espesor del recorte} [pg]$$

$$d = \text{Diámetro del recorte} [pg]$$

Entonces, si se presenta un patrón de flujo turbulento se requiere lo siguiente:

- 1) Calcular v_{sl} mediante la ecuación 8.1.
- 2) Determinar el número de Reynolds mediante la ecuación 8.2.
- 3) Encontrar el factor de fricción con el número de Reynolds calculado
- 4) Determinar v_{sl} con la ecuación 8.3

El factor de fricción se calcula visualmente con la ayuda de la gráfica presentada al final de esta sección. Para utilizar dicha gráfica se requiere identificar la geometría del recorte molido, posteriormente, se le asigna un valor de esfericidad con base a la **TABLA II.11.**

TABLA II. 11.- Valor de esfericidad de acuerdo a la forma del recorte

Forma	Esfericidad
Esfera	1.0
Octaedro	0.85
Cubo	0.81
Prismas:	
$l * l * 2l$	0.77
$l * 2l * 2l$	0.76
$l * 2l * 3l$	0.73
Cilindros:	
$h = r/15$	0.25
$h = r/10$	0.32
$h = r/3$	0.59
$h = r$	0.83
$h = 2r$	0.87
$h = 3r$	0.96
$h = 10r$	0.69
$h = 20r$	0.58

Con el número de Reynolds calculado se utiliza la gráfica siguiendo paralelamente las líneas inclinadas hasta intersectar el valor de esfericidad determinado; posteriormente se proyecta una línea a la izquierda, paralela al eje del número de Reynolds y se obtiene el valor del factor de fricción.

v_{sl} Para el modelo de Bingham.

$$v_{sl} = 0.000898 * \left(\frac{\mu_a}{\rho_f * d_s} \right) * \left[\frac{36800 * d_s}{\left(\frac{\mu_a}{8.345 * \rho_f * d_s} \right)^2} * \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} + 1} - 1 \right] \quad Ec 8.4$$

Consideraciones:

La ecuación 8.4 se utiliza cuando el Número de Reynolds es menor a 100 (donde el N_{Re} es calculado con la ecuación 8.2).

De lo contrario, como se sabe que este modelo utiliza la correlación de Chien, la cual considera que para números de Reynolds mayores o igual a 100 el factor de fricción propuesto es de 1.72, entonces modificando la ecuación 8.3 se tiene lo siguiente:

Si $N_{Re} \geq 100$ Se utiliza: $v_{sl} = 1.44 * \sqrt{d_s * \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}}$ Ec 8.5

Si se calcula la velocidad de deslizamiento con la ecuación 8.4, se sustituye su valor en la ecuación 8.2 y el N_{Re} resulta mayor a 100, la velocidad de deslizamiento es la correcta, de lo contrario v_{sl} se calcula con la ecuación 8.5.

v_{sl} Para modelo de Ley de potencias.

Este modelo es el que presenta mayores consideraciones para obtener la v_{sl} debido a que toma en cuenta los tres patrones de flujo: laminar, transición y turbulento. El Número de Reynolds, con el cual se comprueba que régimen sigue el fluido se calcula mediante la ecuación 8.2 donde el término de la viscosidad newtoniana debe ser sustituido por el de la viscosidad aparente (que se encuentra en función del índice de consistencia y el índice de comportamiento, los cuales se detallan en el apéndice A de este documento)

En este modelo:

El régimen laminar se presenta cuando $N_{Re} < 3$

El régimen transición se presenta cuando $3 \leq N_{Re} \leq 300$

El régimen turbulento se presenta cuando $N_{Re} > 300$

Si el régimen es laminar:

$$v_{sl} = 692 * \left(\frac{d_s^2}{\mu_a} \right) * (\rho_s - \rho_f) \quad \text{Ec 8.6}$$

Si el régimen es de transición:

$$v_{sl} = 2.9 * \frac{d_s * (8.345 * (\rho_s - \rho_f))^{0.667}}{(8.345 * \rho_f)^{0.333} * \mu_a^{0.333}} \quad \text{Ec 8.7}$$

Si el régimen de turbulencia:

$$v_{sl} = 1.54 * \sqrt{\frac{d_s * (\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}} \quad \text{Ec 8.8}$$

Para determinar la velocidad de deslizamiento se asume que se tiene flujo en transición y se calcula v_{sl} con la ecuación 8.7, después se calcula el número de Reynolds con la ecuación 8.2 (sustituyendo la viscosidad newtoniana por la aparente), si el número de Reynolds se encuentra entre 3 y 300 entonces v_{sl} es la correcta, en caso contrario se selecciona la ecuación correspondiente ecuación 8.6 para régimen laminar o ecuación 8.8 para régimen turbulento según el número de Reynolds obtenido).

II.VII.3 Factor de transporte

El factor de transporte es un valor con el cual se puede observar la eficiencia que se tiene en el proceso de acarreo de recortes, se define mediante la siguiente ecuación:

$$F_T = \frac{v_T}{v_a} = 1 - \frac{v_{sl}}{v_a}$$

$$v_T = \text{velocidad de transporte} \left[\frac{\text{pie}}{\text{seg}} \right]$$

La velocidad de transporte se define como sigue:

$$v_T = v_a - v_{sl}$$

Al analizar la fórmula del factor de transporte, se puede decir que si $0.6 \leq F_T \leq 1$ entonces el factor de transporte se puede considerar como bueno.

II.VII.4 Tiempo de atraso

Representa el tiempo que tarda el fluido en transportar los recortes molidos del fondo hasta la superficie.

$$T_a = 3.28 * \frac{D}{v_T}$$

$$D = \text{Profundidad [m]}$$

II.VII.5 Gasto crítico del fluido de reparación

El transporte de recortes es más efectivo si el flujo del fluido de reparación se encuentra en régimen turbulento.

Las condiciones para alcanzar el flujo en régimen de turbulencia son diferentes para los fluidos que se comportan como Newtonianos y como no Newtoniano.

Condiciones para alcanzar régimen turbulento con fluidos Newtonianos.

Para un fluido Newtoniano esta condición se obtiene cuando el $N_{Re} > 2100$, entonces la velocidad crítica está representada por:

$$v_c = 0.49066 * \frac{\mu}{\rho_f * (d_2 - d_1)}$$

$$v_c = \text{velocidad crítica para alcanzar condiciones de turbulencia} \left[\frac{\text{pie}}{\text{seg}} \right]$$

De acuerdo con la velocidad crítica el gasto crítico se obtiene mediante:

$$q_{min} = 2.448 * v_c * (d_2^2 - d_1^2) \quad \text{Ec 8.10}$$

Condiciones para alcanzar régimen turbulento con modelo plástico de Bingham.

En este modelo también es necesario recurrir al concepto del Número de Reynolds. Para los fluidos con este comportamiento la viscosidad μ en la fórmula del N_{Re} se sustituye por la viscosidad aparente μ_a . quedando:

$$N_{Re} = \frac{6317 * \rho_f * v_a * (d_2 - d_1)}{\mu_a} \quad Ec 8.11$$

Cuando:

$$\mu_a = \mu_p + \frac{5 * \tau_p * (d_2 - d_1)}{v_a} \quad Ec 8.12$$

$\tau_p =$ Punto de cedencia

Las ecuaciones 8.11 y 8.12 forman un sistema de ecuaciones con dos incógnitas v_a y μ_a . Para simplificar la solución se asume un gasto q y se calcula la velocidad con la siguiente ecuación:

$$v_a = \frac{q}{2.448 * (d_2^2 - d_1^2)}$$

Una vez obtenida v_a se determina la viscosidad aparente y el Número de Reynolds, si $N_{Re} < 2100$ entonces se considera un gasto mayor, de lo contrario se considera un gasto menor. El mínimo gasto requerido para alcanzar un régimen de turbulencia es el que origine un N_{Re} cercano 2100.

Condiciones para alcanzar régimen turbulento con modelo de Ley de Potencias.

Para lograr el régimen de flujo turbulento para este modelo, se recurre a dos conceptos: Número de Reynolds N_{Re} y Número de Reynolds crítico N_{Rec} . La condición de turbulencia se presenta cuando: $N_{Re} > N_{Rec}$ donde:

$$N_{Rec} = 3470 - (1370 * n)$$

Se resuelve la ecuación 9, se obtiene la viscosidad aparente y se calcula la velocidad crítica para alcanzar las condiciones de turbulencia mediante:

$$v_c = \left[\frac{N_{Rec} * K}{909,839 * \rho_f} * \left[\frac{2 + 1/n}{0.0208 * (d_2 - d_1)} \right]^n \right]^{\frac{1}{2-n}}$$

El gasto mínimo para alcanzar la turbulencia se calcula mediante la ecuación 17.

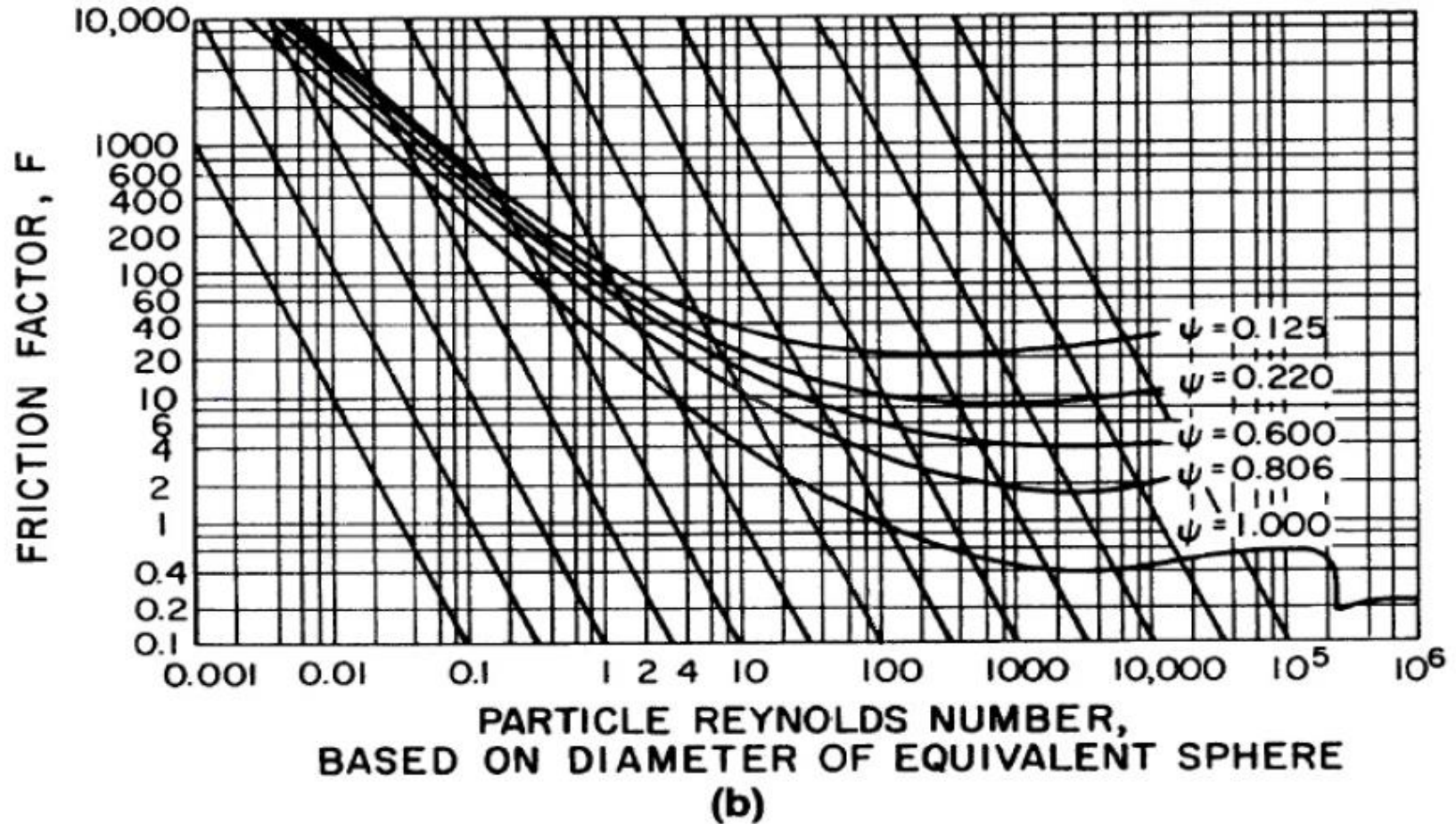


IMAGEN II. 15.-Gráfica de factores de fricción para calcular la velocidad de deslizamiento para partículas con diferentes esfericidades

Capítulo III. Desarrollo del software

En este capítulo se enuncian algunos de los procesos fundamentales llevados a cabo para obtener el software, así como la descripción del producto final: de_Terminación.PPV.

III.1 Generalidades del desarrollo

Para comenzar a desarrollar el software fue necesario, como primer paso, asimilar la información contenida en la bibliografía y así determinar las operaciones que contiene el software. Además también se eligió el paquete de programación a utilizar: Visual Basic Express Edition, por sus características de sencillez y alto rendimiento, aunado a que es un recurso ofrecido gratuitamente a los estudiantes de la UNAM.

Después de haber seleccionado cualitativamente las operaciones a programar, se verificó el número de variables a utilizar de cada operación, entonces se procedió a enlistar dichas variables evitando duplicidad, obteniendo así un listado de variables únicas (405 en total). Ese proceso sirvió para realizar la declaración de variables en un “módulo” del software, lo que permitió tener un mejor control y orden sobre la sección de variables. En la **IMAGEN III.1** se aprecia una sección del módulo que contiene la declaración de variables.

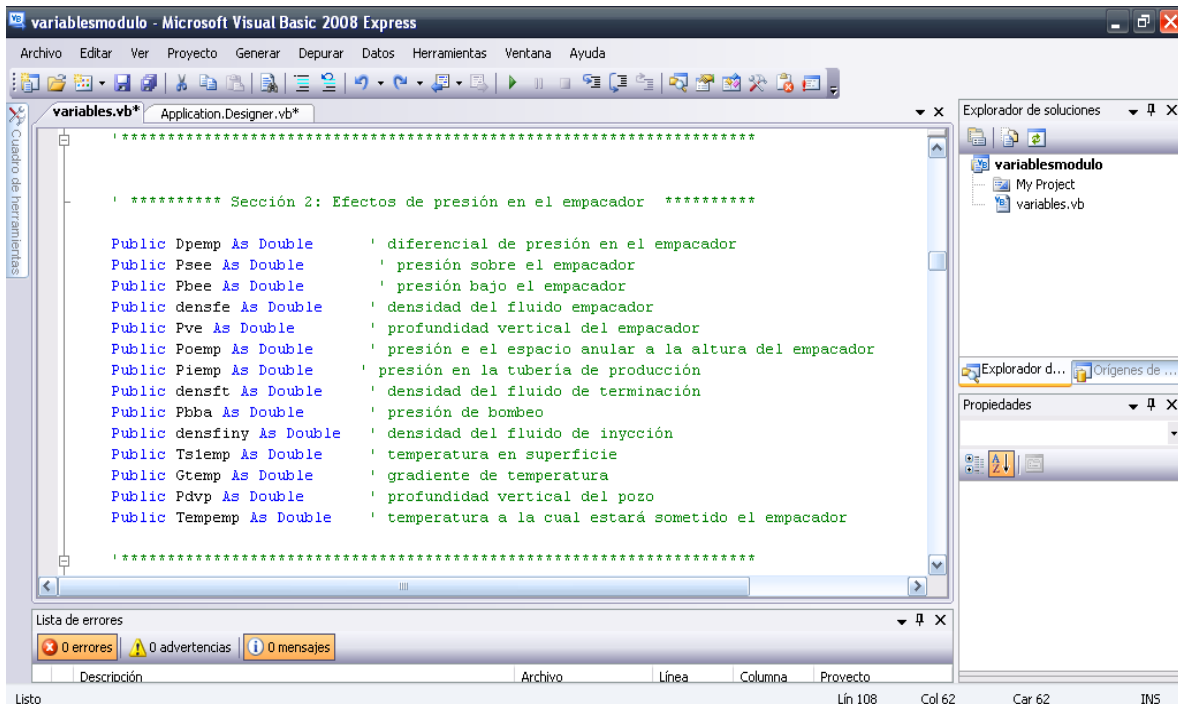


IMAGEN III.1.- Declaración de variables para la sección de efectos de presión en el empacador

Así pues, con la información analizada y las variables declaradas, se comenzó a programar cada una de las treinta y dos operaciones de este software.

Para corroborar el buen funcionamiento de cada operación programada, cada una de ellas fue probada con ejemplos obtenidos de la literatura consultada (algunas comprobaciones se muestran en el capítulo siguiente). En la **IMAGEN III.2** pueden apreciarse secciones del desarrollo individual de dos de las operaciones programadas.

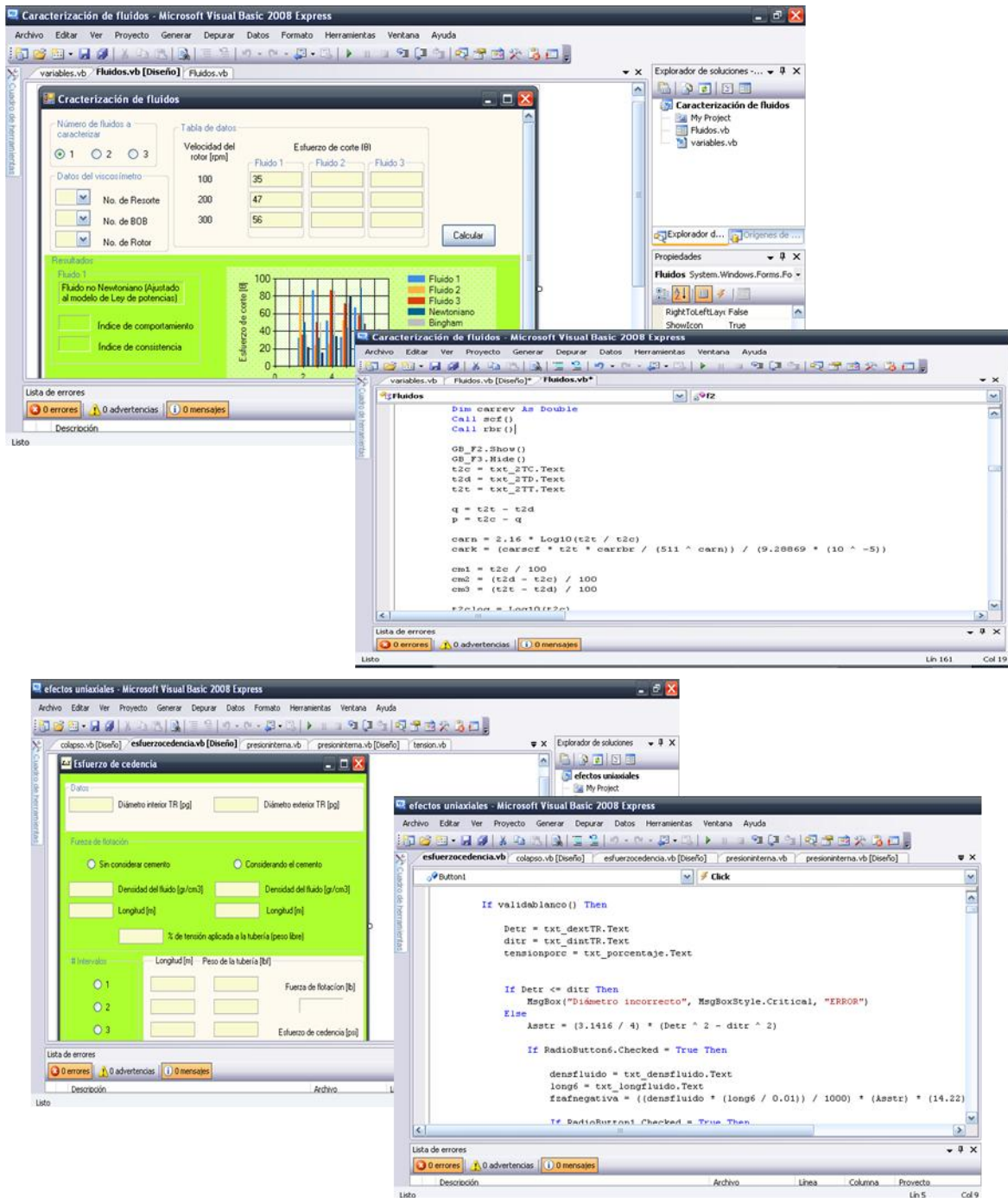


IMAGEN III.2, Secciones de diseño y de código para las operaciones de: Caracterización de fluidos (arriba) y Efectos uniaxiales (abajo).

En la parte de programación a demás de las formulas matemáticas correspondientes a cada operación, se tomaron en cuenta posibles eventos de error, como la introducción de caracteres no numéricos, la posible falta de algún dato para la ejecución del programa y la introducción de valores incorrectos en el caso de los diámetros de las tuberías y empacadores. En la **IMAGEN III.3** siguiente se pueden apreciar dos mensajes correspondientes a estos últimos dos eventos de error.

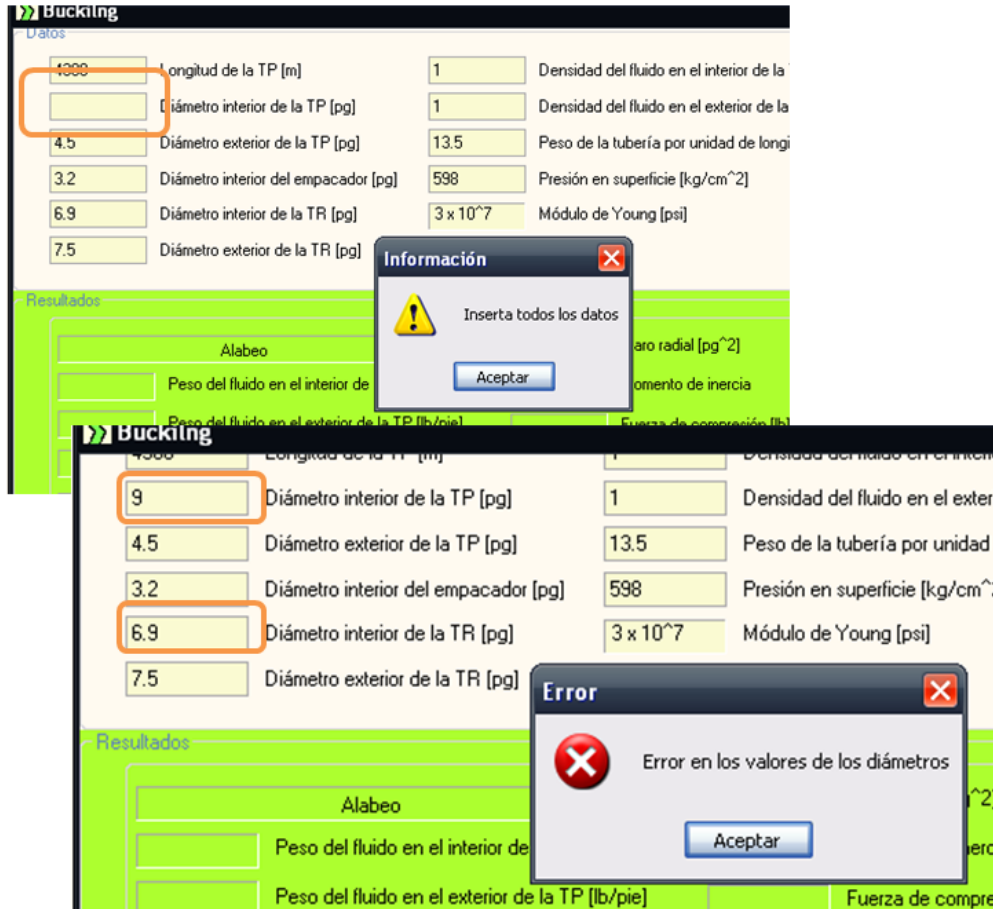


IMAGEN III.3.- Errores en tiempo de ejecución. Al fondo se aprecia la advertencia de datos incompletos, al frente el error de valores en los diámetros, en ambos eventos se señalan con un recuadro las casillas que ocasionan el error.

Una vez programadas todas las operaciones, se realizó un “proyecto general” en el que ellas convergen; este proceso comenzó a dar forma al producto final. Además para la realización del diseño de este proyecto se contemplaron siete operaciones principales:

- ⊕ Aparejos de producción
- ⊕ Efectos de presión sobre el empacador
- ⊕ Disparos
- ⊕ Lavado de pozo
- ⊕ Estimulación
- ⊕ Aislamiento de intervalos probados y
- ⊕ Molienda

Algunas de esas operaciones pueden tener variables en común (como diámetros de tuberías y longitud de la sarta) es por ello que el cálculo de parámetros para esas siete operaciones puede realizarse en una sola ejecución del programa; de acuerdo a estas siete operaciones, se procedió a desarrollar una nueva sección, misma que se describe más adelante dentro de este mismo capítulo. En la **IMAGEN II.4** puede observarse el diseño y partes importantes del proyecto.

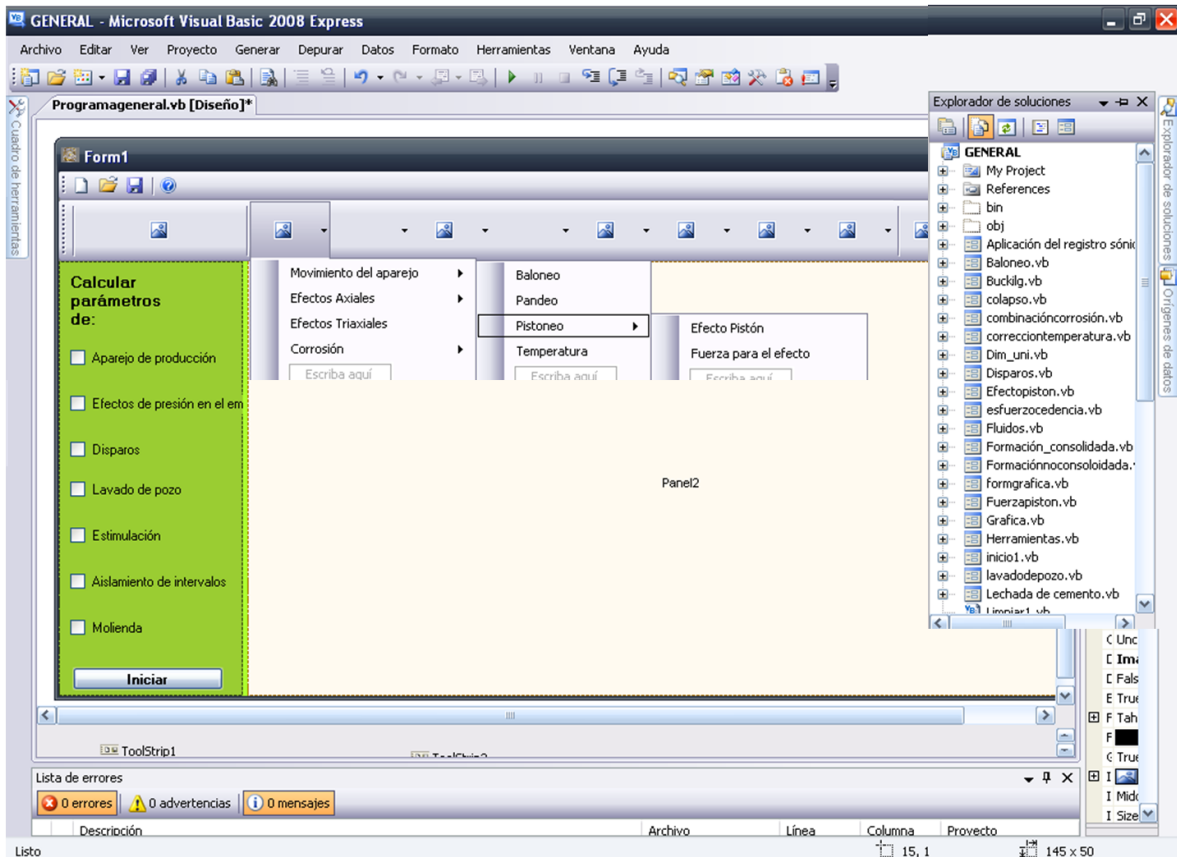


IMAGEN III.4.- Diseño del proyecto general. A la derecha se aprecia que convergen todas las operaciones programadas individualmente, así como el módulo de variables. A la izquierda se muestra la nueva sección que toma en cuenta las siete operaciones principales.

Para que los cálculos de las operaciones relacionadas con aparejo de producción, efectos de presión en el empacador, disparos, lavado de pozo estimulación, aislamiento de intervalos probados y molienda pudiesen funcionar en la nueva sección, se procedió a diseñar apartados de ingreso de datos particulares para cada una de dichas operaciones y otro para ingreso de datos generales, además de apartados para mostrar los resultados obtenidos.

Debido a que ya se encontraban programadas todas las operaciones individualmente, para que los cálculos correspondientes a la nueva sección pudiesen realizarse, únicamente se hizo referencia al código escrito para cada operación. Por ejemplo, para que funcione la operación de aparejos en la nueva sección, se hizo referencia a los códigos individuales de baloneo, pistoneo, alabeo, temperatura, corrosión por CO₂, corrosión por H₂S, corrosión por combinación de CO₂ y

H₂S, corrosión por efecto de temperatura, efectos de presión interna, colapso, tensión, de cedencia y efectos triaxiales

Por otra parte, también se generó una serie de códigos para que el usuario pueda guardar un proyecto y abrir uno nuevo o uno ya existente.

Igualmente se vincularon algunos capítulos de esta tesis a la sección de “ayuda” con la finalidad de que el usuario pueda advertir la teoría que fundamenta el software.

III.II Descripción del producto final: de_Terminación.PPV

de_Terminación.PPV es una herramienta de cómputo desarrollada en el lenguaje de programación Visual Basic 2008 Express Edition, el cual tiene una interfaz de entrada y salida de datos en ambiente Windows, promoviendo familiaridad con el usuario, debido a ello se facilita su manejo; está sustentado (como se revisó en el primer capítulo) en la teoría general de la terminación de pozos verticales para siete de las operaciones más comunes dentro de esta rama de la ingeniería petrolera.

III.II.1 Objetivo

Determinar diversos diseños y calcular parámetros de las siguientes operaciones: aparejos de producción, presión sobre los empacadores, disparos, lavado de pozo, estimulación, aislamiento de intervalos probados y molienda, apegados a las guías de diseño actuales de PEMEX para elegir el escenario adecuado antes de aplicarlo.

III.II.2 Requerimientos mínimos del software

- ⊕ Equipo Pentium o superior a 233 MHZ.
- ⊕ Monitor VGA o de mayor resolución compatible con Microsoft Windows^{MR}.
- ⊕ 35 MB de RAM para Windows XP ó posterior.
- ⊕ Adobe Reader 6.0 o superior.

El equipo deberá contar con la actualización de la paquetería System.Windows.Form.datavisualization. Esta paquetería es está contenida en la actualización de gráficos de Windows. La descarga de la aplicación es gratuita desde el sitio oficial de Microsoft: <http://www.microsoft.com/download/en/confirmation.aspx?id=23903>. Para comodidad del usuario este paquete está contenido en el CD-ROM de de_Terminación.PPV y deberá ser instalado en primer lugar.

III.II 3 Arranque del software

El programa inicia con la pantalla de presentación, en seguida aparece la ventana de arranque, donde se cargan los controles, las imágenes y las gráficas necesarias para el funcionamiento del programa, al cerrarse dicha pantalla aparece la ventana principal. Lo anterior puede observarse en la **IMAGEN III.5**.

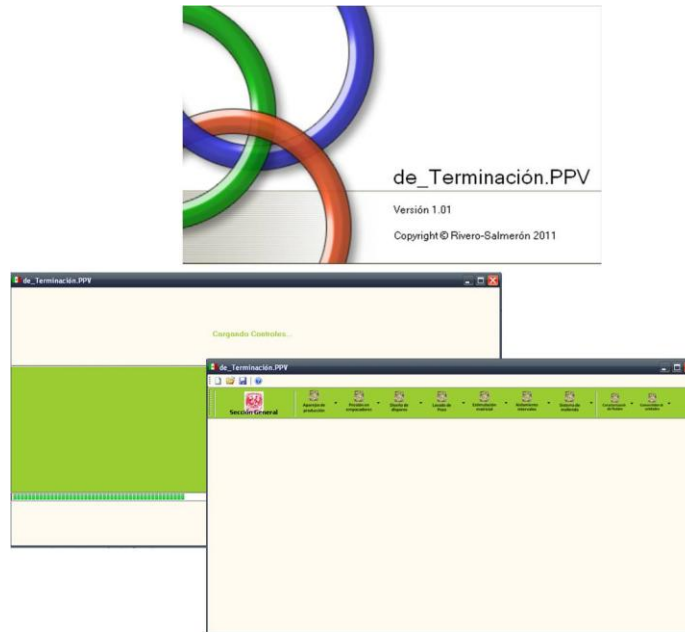


IMAGEN III.5.- Arranque del software. Se aprecian las siguientes pantallas: arriba la de presentación, en medio la de carga de controles, abajo la de diseño (ventana principal).

La ventana principal en general está constituida de la siguiente manera: en la parte superior se indica el nombre del software, debajo se encuentra una barra de herramientas llamada “barra general” con los elementos estándar: nuevo, abrir, guardar y ayuda. Debajo de ésta se encuentra la “barra principal”, la cual contiene a tres secciones principales mismas que se detallan en la sección que describe a esta barra.

Debajo de la barra principal se encuentra la pantalla general, en la que se mostrarán las pantallas de ingreso de datos y presentación de resultados de acuerdo a la operación elegida. A continuación se muestra la pantalla general del programa.

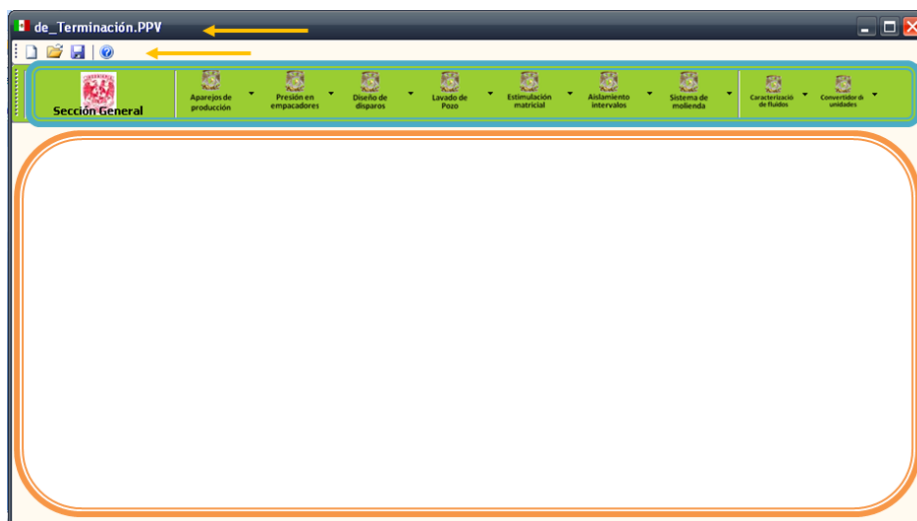


IMAGEN III.6.- Pantalla general del programa. Con las flechas, de arriba hacia abajo, se indican el nombre del software y la barra de herramientas general. Con los recuadros, de arriba abajo, se indican la barra de herramientas principal y la pantalla de diseño

III.II.4 Descripción de la barra general



Nuevo.- Al dar clic sobre esta opción se elimina toda la información existente del proyecto en el área de diseño.



Abrir.- Se utiliza para continuar con un diseño, modificarlo o consultarlo. Para realizar alguna de las opciones anteriores se selecciona el archivo que se desea abrir especificando la ruta donde se encuentra.



Guardar.- Permite almacenar la información de un proyecto nuevo o guardar un archivo con otro nombre.



Ayuda.- Esta opción permite ver los capítulos y apéndices que conforman esta tesis con el fin de proveer las bases teóricas de las operaciones matemáticas programadas.

III.II.5 Descripción de la barra de herramientas principal

Esta contiene las tres secciones principales del programa, mismas que se describen a continuación y pueden observarse en la IMAGEN 3.6:

III.II.5.1 Primera sección

Denominada “Sección General”, aquí el usuario tiene la posibilidad de realizar una ejecución del programa que le permita obtener los parámetros de una o más de las siete operaciones que se manejan, para ello, el usuario debe determinar en un primer plano las operaciones que desea realizar, en un segundo plano debe ingresar datos generales (que serán utilizados en las operaciones seleccionadas), y finalmente se deben ingresar datos particulares en pantallas que se muestran consecutivamente y de acuerdo a las operaciones seleccionadas. El usuario también tiene la posibilidad de regresar a la pantalla inmediata anterior para modificar o revisar algún dato.

Una vez que todos los datos requeridos hayan sido ingresados aparece un mensaje con el que el usuario tiene que decidir entre dos opciones: revisar los resultados obtenidos o regresar a la carga de datos. Cuando el usuario elige revisar los resultados, estos se presentan en pantallas particulares de acuerdo con las operaciones seleccionadas, al igual que en la carga de datos, el usuario puede regresar a la pantalla inmediata anterior. Si el usuario decide regresar a la carga de datos entonces se presenta la pantalla de carga de datos generales.

Cabe mencionar que los datos ingresados permanecerán almacenados en los cuadros de texto hasta que se genere un nuevo proyecto o bien si se cierra el proyecto.

III.II.5.2 Segunda sección

Denominada “Sección Particular”, el usuario tiene la posibilidad de calcular parámetros generales de la terminación de pozos verticales (relacionados con las siete operaciones mencionadas) individualmente, es decir, en esta sección no existen datos generales, sino que el usuario debe realizar el ingreso de datos de acuerdo con la operación seleccionada. En seguida se enlistan las operaciones que se pueden realizar de forma individual:

De la sección de aparejos de producción:

Acerca de movimiento del aparejo

- ⊕ Efecto de Baloneo
- ⊕ Efecto de Pandeo
- ⊕ Efecto de Pistoneo
- ⊕ Fuerza requerida para determinar el efecto de Pistoneo.
- ⊕ Efecto de Temperatura

Acerca de los efectos axiales

- ⊕ Efecto de cedencia
- ⊕ Efecto de colapso
- ⊕ Efecto de presión interna
- ⊕ Efecto de tensión

Acerca de los efectos triaxiales

- ⊕ Efectos triaxiales

Acerca de los efectos de corrosión

- ⊕ Corrosión debida a H₂S
- ⊕ Corrosión debida a CO₂
- ⊕ Corrosión debida a la combinación de H₂S Y CO₂
- ⊕ Corrosión debida al efecto de temperatura.

De la sección de efectos de presión en el empacador

- ⊕ Presión bajo el empacador en una prueba de admisión
- ⊕ Presión bajo el empacador en una prueba de estimulación
- ⊕ Presión bajo el empacador en una prueba de inducción
- ⊕ Presión sobre el empacador
- ⊕ Diferencial de presión

De la sección de disparos

- ⊕ Aplicación para una formación consolidada
- ⊕ Aplicación para una formación no consolidada
- ⊕ Determinación de la presión de formación
- ⊕ Determinación del tipo de formación
- ⊕ Aplicación del registro sísmico

- ⊕ Sistema general disparos

De la sección de lavado de pozo

- ⊕ Sistema General de lavado de pozo

De la sección de aislamiento de intervalos probados

- ⊕ Determinación de la longitud del tapón
- ⊕ Determinación del sistema de lechada de cemento

De la sección de molienda

- ⊕ Determinación del sistema general de molienda
- ⊕ Selección de herramientas para la molienda.

III.II.5.3 Tercera sección

Denominada “Sección Auxiliar” el usuario tiene acceso a dos herramientas más que le proveen ayuda para el ingreso de datos: un convertidor de unidades (el cual también posee una sección de dimensiones) y una sección para la caracterización fluidos.

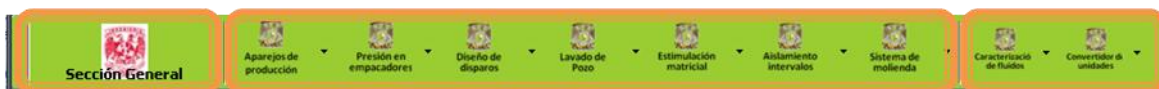


IMAGEN III.7.- Barra de herramientas principal. En los recuadros se observan de izquierda a derecha: las secciones: general, particular y auxiliar.

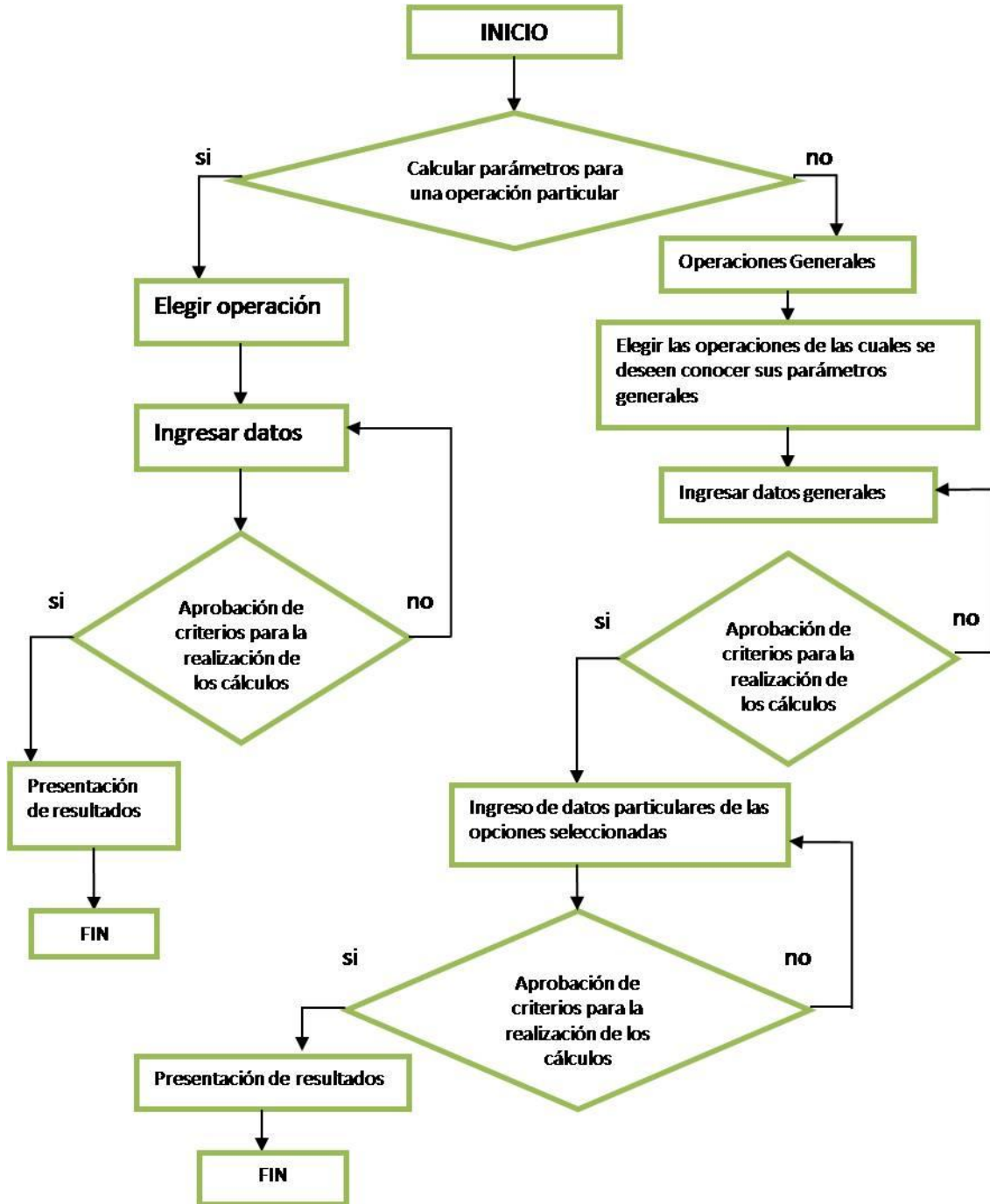
III.II.6 Descripción de la pantalla de diseño

En esta área se despliegan los cuadros de ingreso de datos y de resultados de las operaciones seleccionadas en la barra de herramientas principal, si el usuario elige trabajar con la sección general, entonces la pantalla se divide en dos secciones (**IMAGEN III.8**), en la primera el usuario debe seleccionar las operaciones de las cuales desea conocer su parámetros, mientras que en la segunda aparecerán tanto los cuadros de ingreso de datos como los de resultados (en el orden que se explicó en la descripción de la sección general.)



IMAGEN III.8.- Pantalla trabajando con la sección general. Se aprecia la división de la pantalla de diseño en dos partes; a la izquierda la de selección de operaciones, a la derecha la de ingreso de datos.

III.II.7 Diagrama de flujo general para de_Terminación.PPV



III.II.8 Datos requeridos

En esta sección, mediante un esquema denominado “esquema llave” únicamente se señalarán los datos requeridos en caso de que el usuario elija realizar la ejecución de la primera sección del programa.

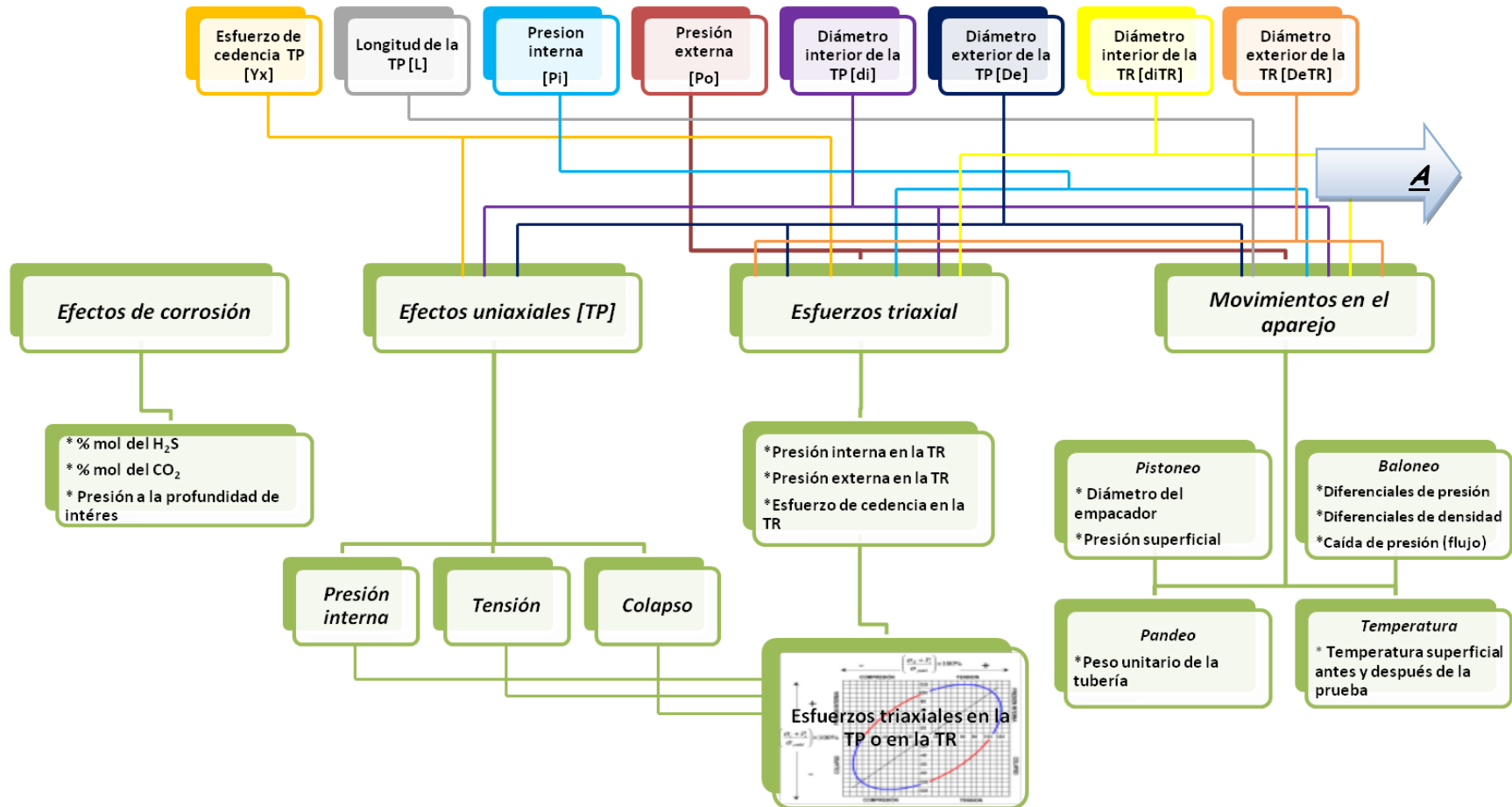


IMAGEN III.9.1.-Primera parte del esquema llave. Se aprecian las variables requeridas para el cálculo de parámetros correspondiente a la sección de aparejos de producción

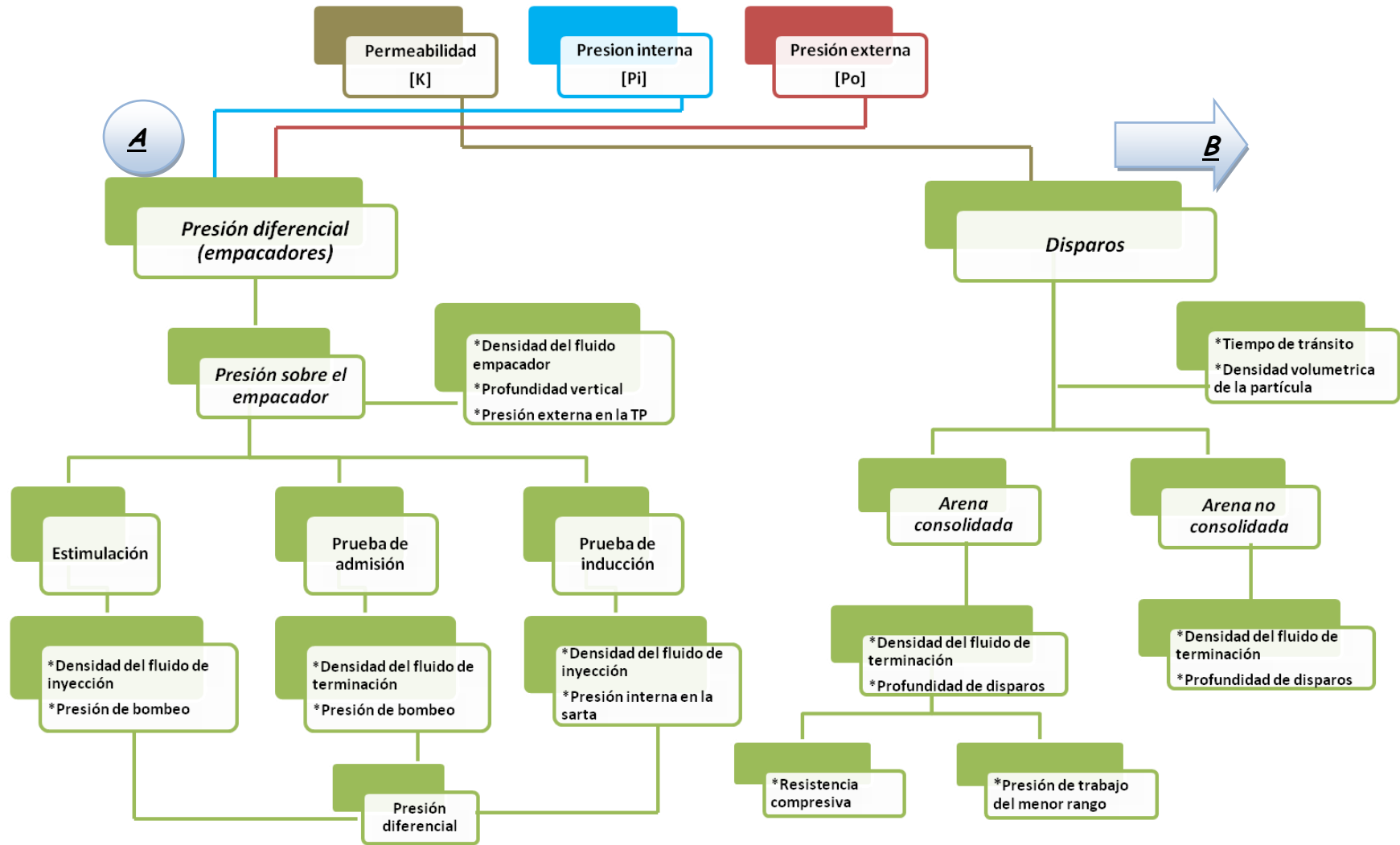


IMAGEN III.9.2.- Segunda parte del esquema llave. Se aprecian las variables requeridas para el cálculo de parámetros correspondientes a las secciones de Efecto de presión sobre el empacador y Disparos.

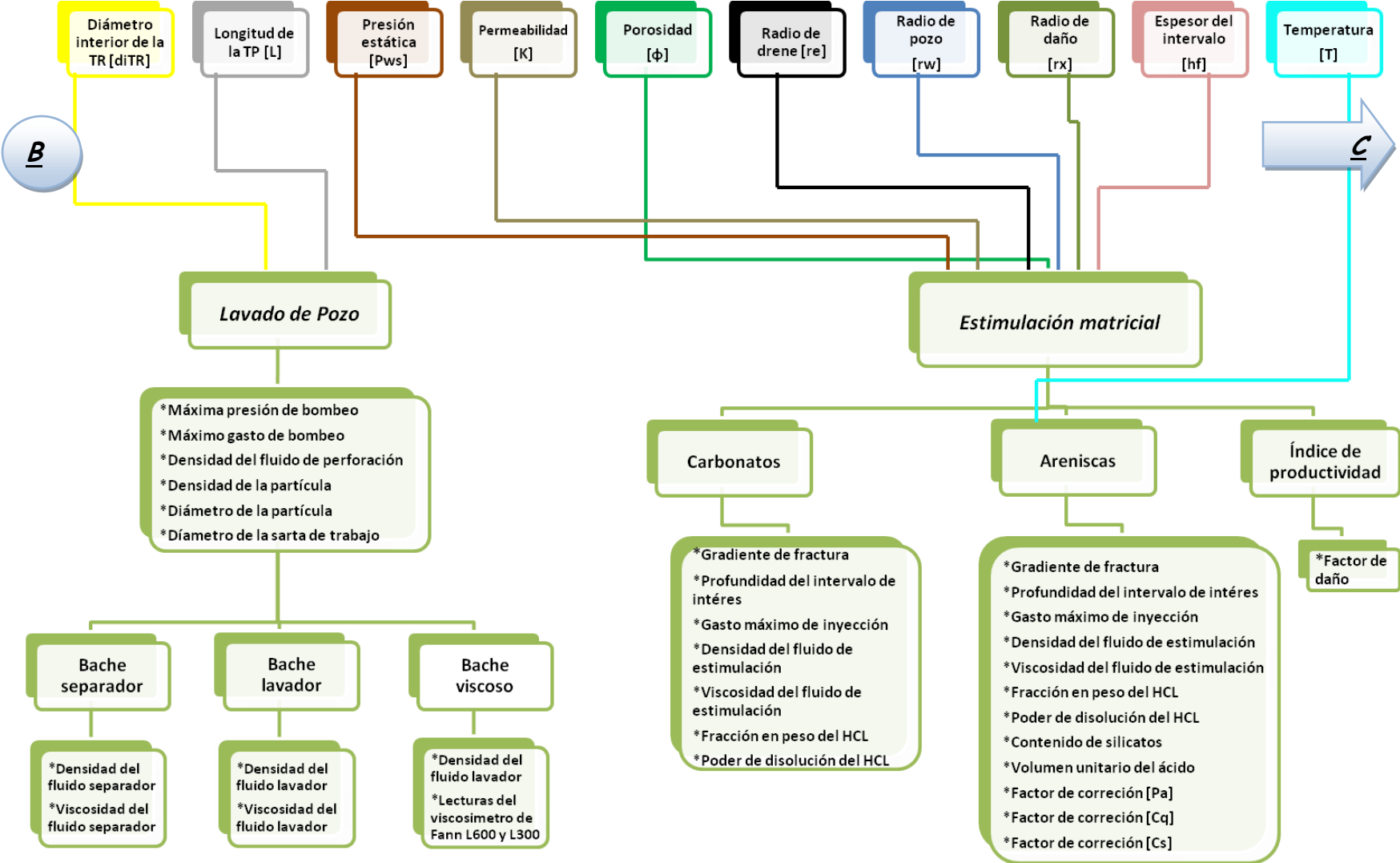


IMAGEN III.9.3.-Tercera parte del esquema llave. Se aprecian las variables requeridas para el cálculo de parámetros correspondientes a las secciones de Lavado de pozo y Estimulación matricial.

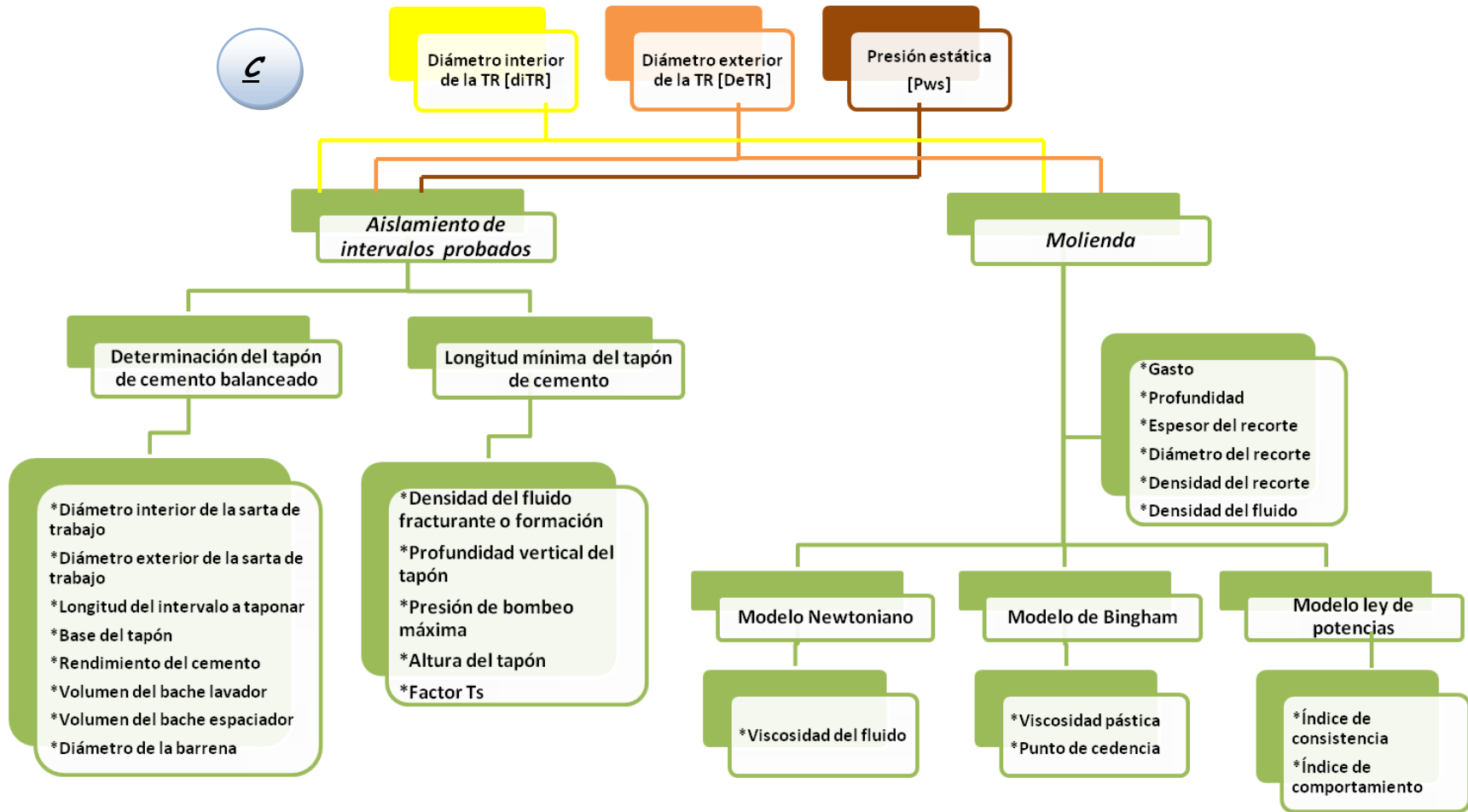


IMAGEN III.9.4.- Cuarta parte del esquema llave. Se aprecian las variables requeridas para el cálculo de parámetros correspondientes a las secciones de aislamiento de intervalos probados y molienda.

Capítulo IV. Ejemplos de aplicación y resultados

Esta sección contiene ejecuciones de operaciones particulares así como de la sección general.

En algunos de estos ejemplos, fueron tomados ejercicios de la literatura consultada y se muestran al principio de cada subcapítulo con el fin de que el lector pueda comparar los resultados del ejercicio extraído de la bibliografía con los obtenidos en de_terminación.PPV.

Además en los primeros subcapítulos se muestran ejemplos donde se puede observar el uso de las principales funciones y comandos que el usuario puede encontrar en de_Terminación.PPV, como las funciones guardar y abrir y los comandos “radio buttons”, “check box” y “combo box”, con el fin de proporcionar familiaridad con el software antes de comenzar a utilizarlo.

IV.1 Funciones y comandos

IV.1.1 Selección de una operación particular

Para realizar la selección de alguna de las operaciones de la sección particular, se procede a dar clic en el botón que contenga a dicha operación (la lista de operaciones se muestra en el apartado III.II.5.2 de este documento). En la **IMAGEN IV.1** se muestra cómo seleccionar la operación: “presión sobre el empacador para una prueba de admisión”.

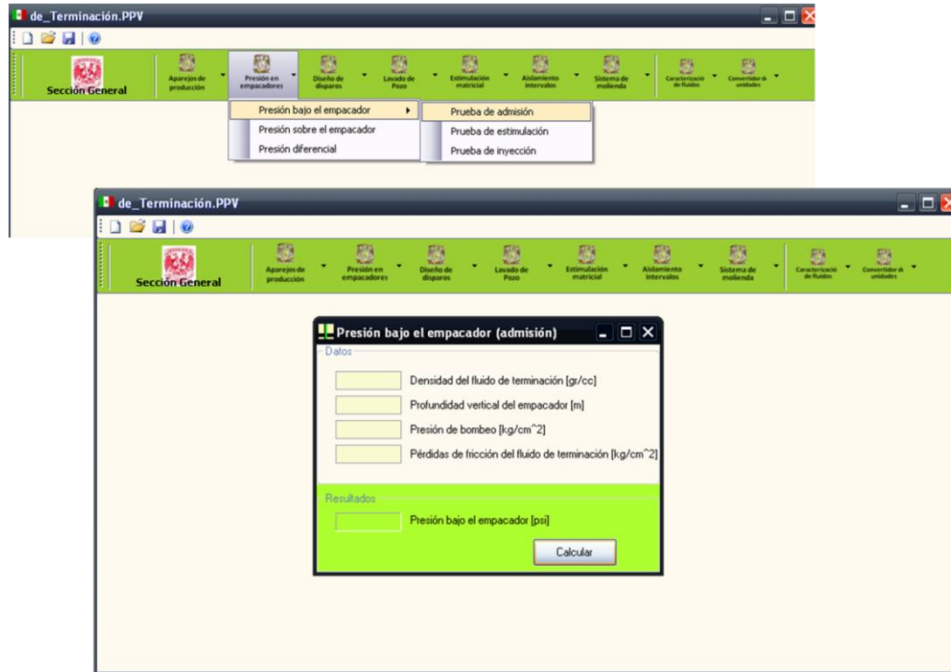


IMAGEN IV. 1.- Proceso de selección de una operación en la sección particular. Arriba se muestra el botón para seleccionar la operación presión bajo el empacador para una prueba de admisión; abajo se muestra la ventana correspondiente a dicha operación

El programa también cuenta con la posibilidad de tener varias ventanas de operación abiertas al mismo tiempo, como puede observarse en la **IMAGEN IV.2**.

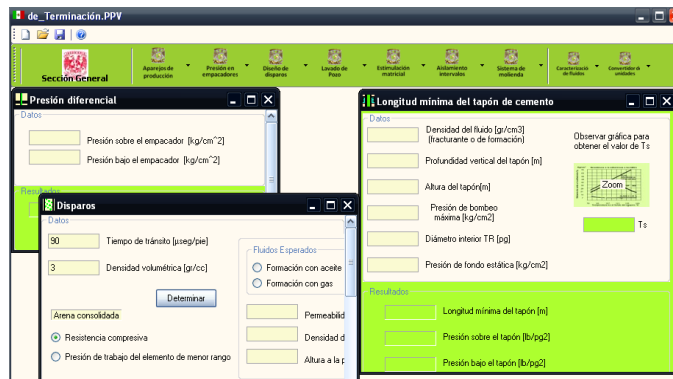


IMAGEN IV. 2.- Se observan diversas ventanas de operación abiertas al mismo tiempo dentro de la pantalla de diseño

IV.1.2 Selección de operaciones en la sección general

Para seleccionar el cálculo de una o varias operaciones de la sección general es necesario dar clic en el botón “sección general” (**IMAGEN IV.3**). A continuación se despliega una columna en la que deben seleccionarse las operaciones deseadas a través de un clic en el check box (ver sección IV.II.8).

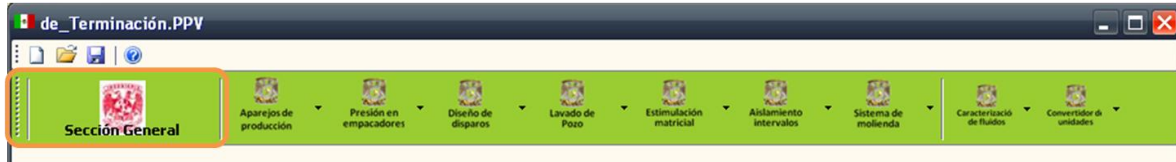


IMAGEN IV. 3.- En el recuadro a la izquierda puede apreciarse el botón “sección general”

En la **IMAGEN IV.4** se observa la selección de las operaciones “Aparejo de producción”, “Disparos” y “Lavado de pozo).

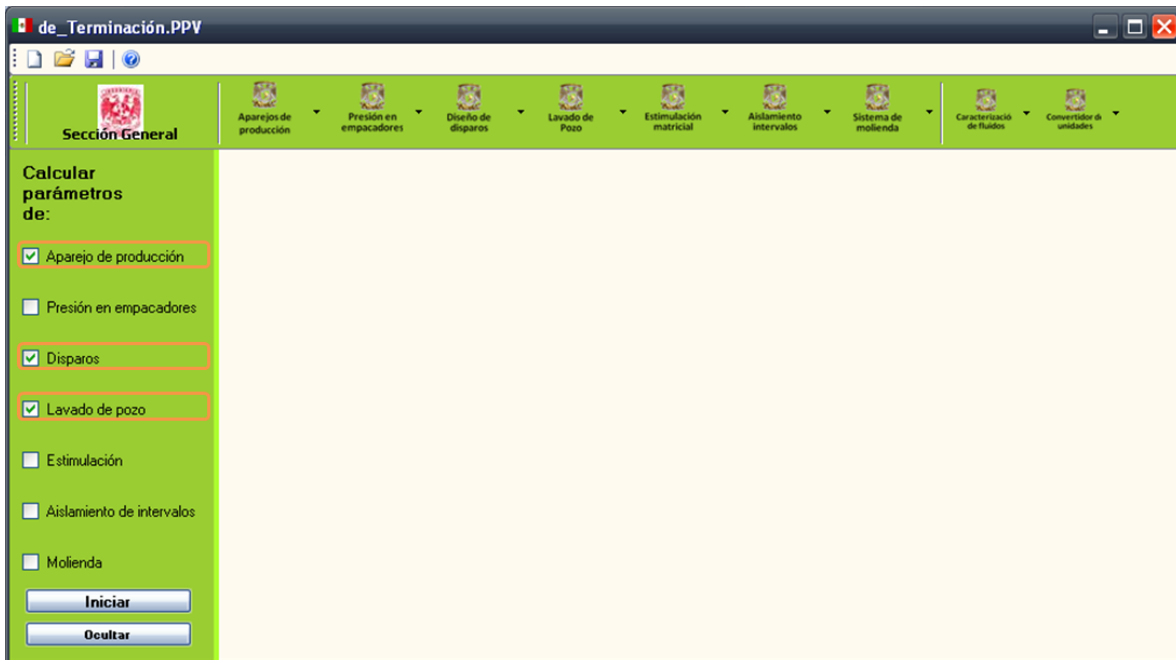


IMAGEN IV. 4.- Selección de operaciones de la sección general. Se observa la selección de tres operaciones.

Una vez seleccionadas las operaciones, se necesita dar clic en el botón “iniciar” de la columna. En seguida se desplegará la pantalla de ingreso de datos generales; al tener llenos todos los campos de esta pantalla, se podrá avanzar al ingreso de datos particulares para cada una de las operaciones seleccionadas.

IV.1.3 Nuevo

“Nuevo”, borra todos los datos ingresados en la sección general e inmediatamente después despliega un proyecto en blanco de ésta sección.

Para activar esta función es necesario dar clic en el icono de hoja blanca que se encuentra en la barra general.

Antes de proceder a borrar los datos y generar un nuevo proyecto, se pide una confirmación mediante un mensaje. **IMAGEN IV.5.**

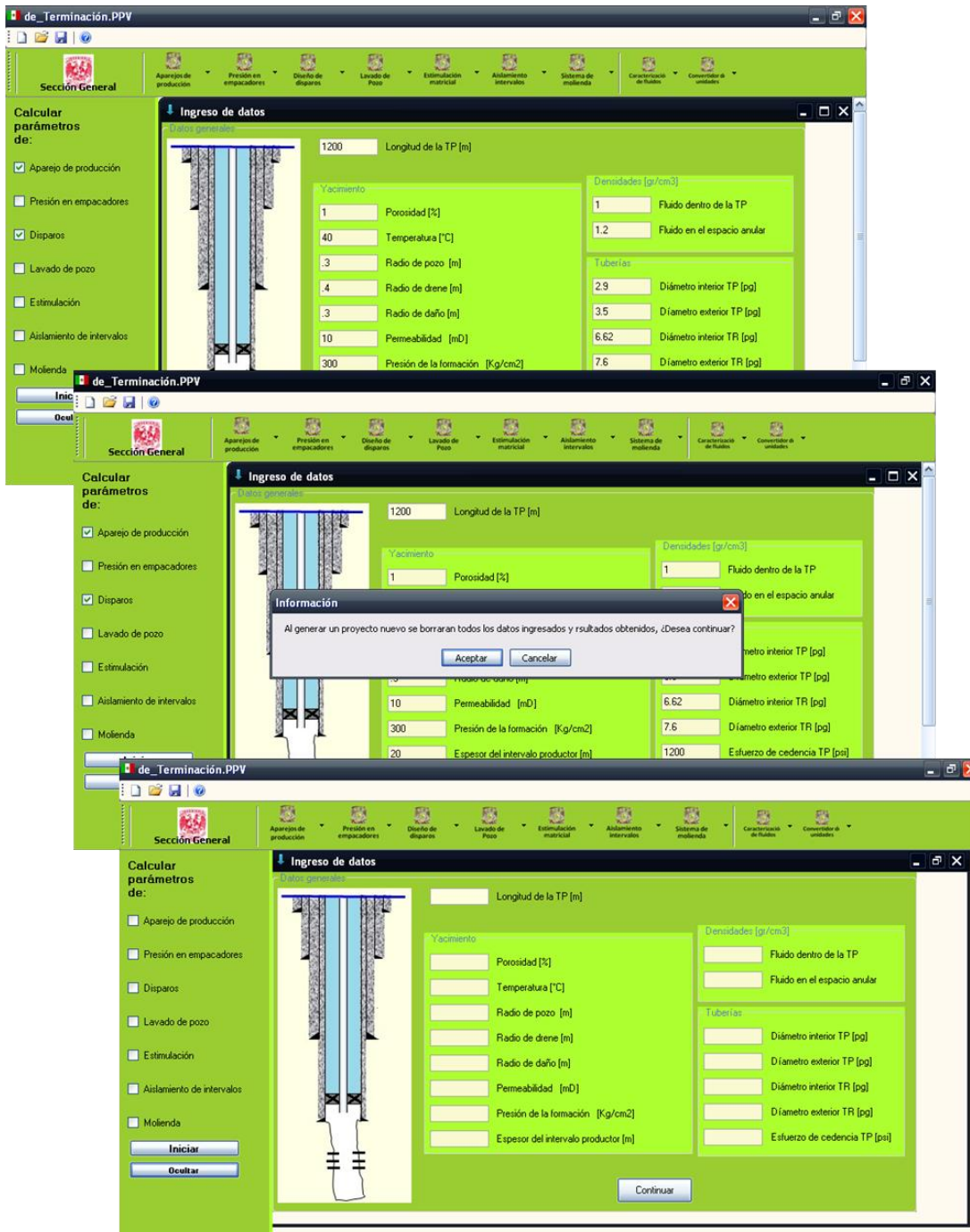


IMAGEN IV. 5. Uso de “Nuevo”. Arriba se aprecia un proyecto con datos ingresados; en medio puede observarse que se ha dado clic en “Nuevo” por lo que aparece el mensaje de confirmación con la leyenda “Al generar un proyecto nuevo se borrarán todos los datos ingresados y resultados, ¿Desea continuar?”; abajo se muestra la pantalla generada (en limpio) una vez realizada la confirmación.

IV.1.4 Guardar

Guardar puede activarse en dos de las tres secciones presentadas: sección general y sección particular. Permite almacenar datos de alguna operación para poder consultarlos posteriormente.

Para activar esta función debe darse clic sobre el icono del disco extraíble de la barra general. En seguida de dar clic en guardar, aparece el recuadro “guardar como” en donde debe especificarse el nombre del archivo. Es necesario guardar siempre como tipo de archivo de texto “.txt”.

Para observar su funcionamiento se presenta la **IMAGEN IV.6.**

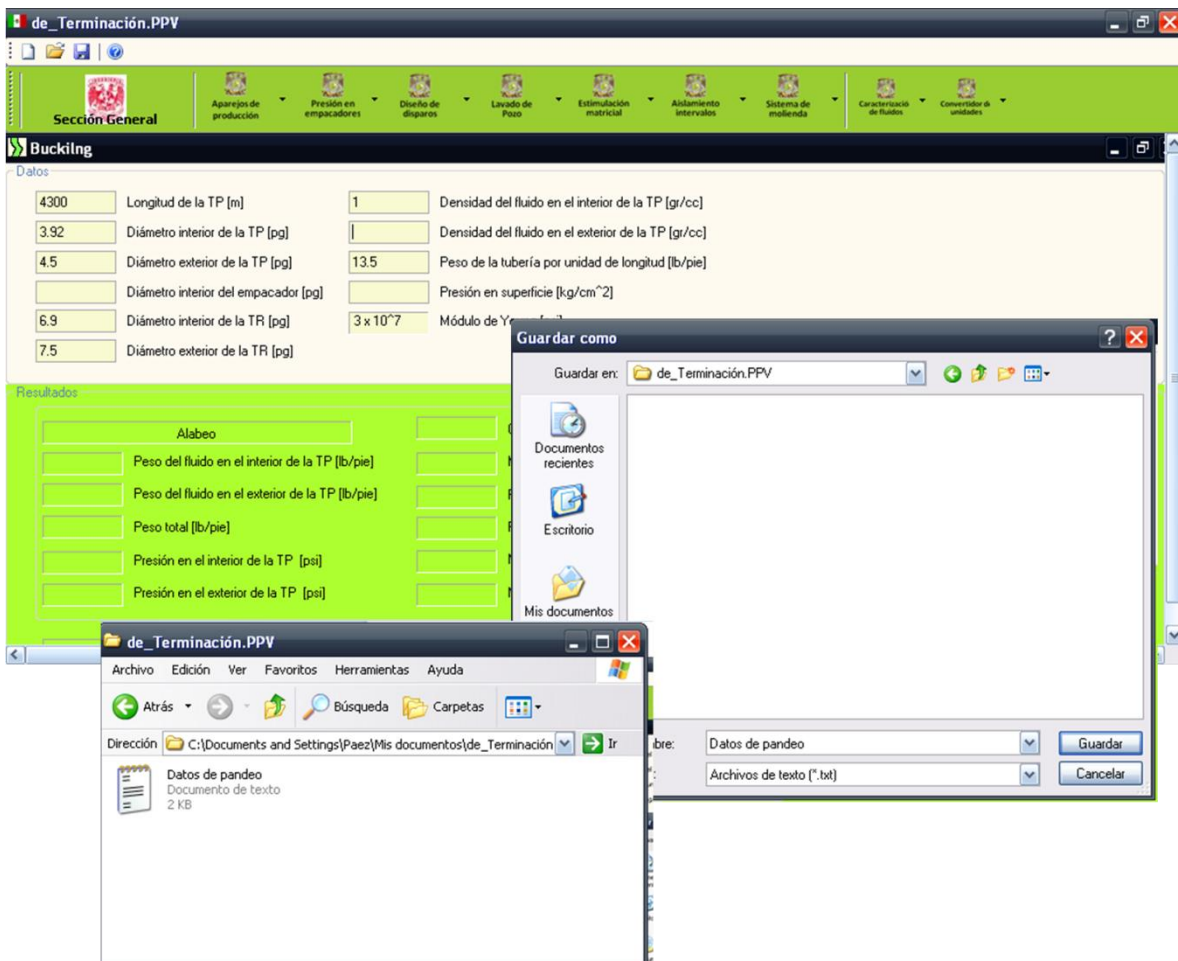


IMAGEN IV. 6.- Uso de “Guardar”.- Al fondo se aprecia una ventana de operación con datos ingresados; en medio se observa que se ha dado clic en el icono “guardar” y se ha desplegado el cuadro “guardar como”, también se aprecia que se ha proporcionado un nombre al proyecto; al frente se muestra el archivo guardado en el directorio seleccionado.

Para guardar los cambios realizados en un mismo proyecto se deberá:

1. Dar clic en el icono guardar, (entonces se despliega el cuadro de dialogo “guardar como”),
2. Se selecciona la ruta donde esta guardó el proyecto,
3. Se selecciona el archivo a reemplazar,
4. Se da clic en guardar, (aparece un cuadro de dialogo pidiendo confirmación de reemplazo),
5. Por último se da clic en aceptar del cuadro de dialogo.

El proceso se muestra en la **IMAGEN IV.7.**

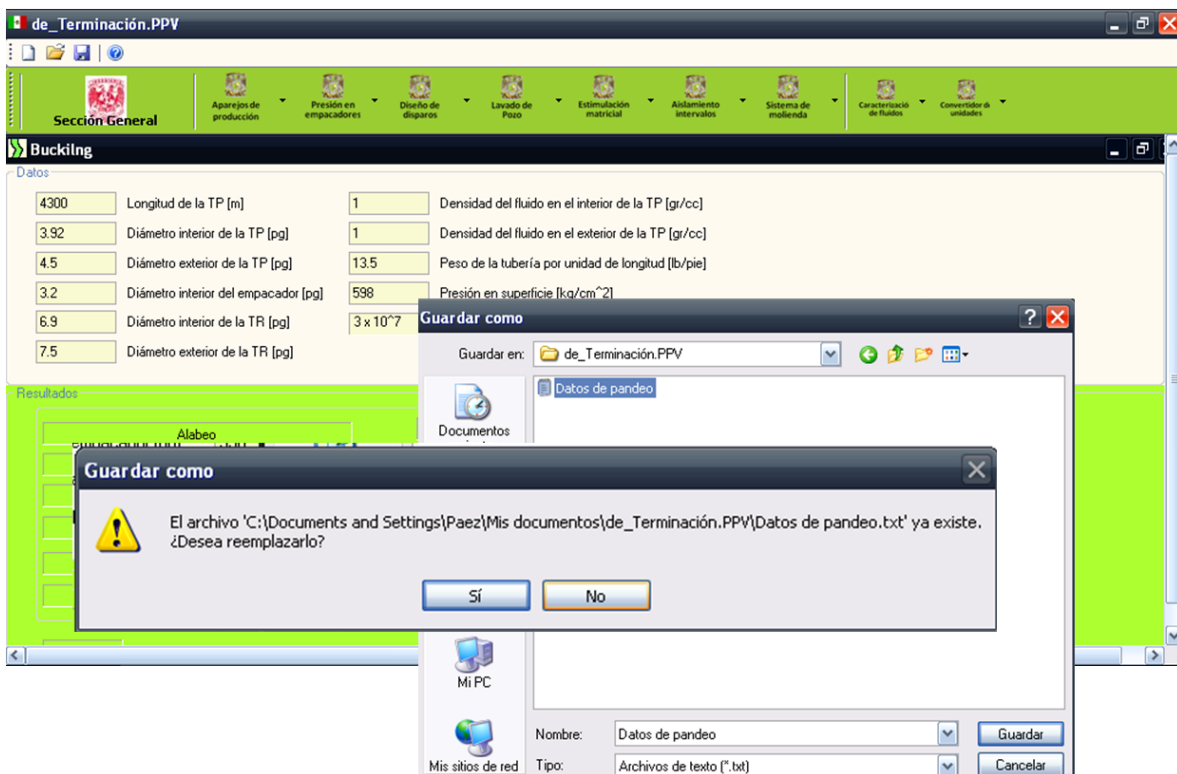


IMAGEN IV. 7.- Guardar los cambios a un proyecto. Al fondo se aprecia el proyecto presentado en la IMAGEN IV.6 con modificaciones, pues se aprecia que en esta ocasión todas las cajas de ingreso de datos están llenas. En medio los pasos 2, 3 y 4 del proceso; al frente el mensaje de confirmación.

IV.1.5 Abrir

Esta función borra toda la información contenida del proyecto en uso y carga la información guardada de un proyecto almacenado. Para abrir un proyecto es necesario dar clic en el icono con forma de carpeta y saber en qué parte del software existen datos. En el ejemplo mostrado en la **IMAGEN IV.8** se observa cómo se abre el proyecto que se guardó en la sección IV.1.4.

Pasos para abrir el proyecto guardado “Datos de pandeo”:

1. Dar clic en el icono “abrir” (se despliega inmediatamente el cuadro “abrir”)
2. Seleccionar la ruta y el archivo “.txt” que contiene los datos del proyecto.
3. Dar clic en abrir.

Importante: los datos se cargan, pero el usuario debe saber en qué operación fueron cargados. En las imágenes siguientes se aprecia esta condición. Esto se muestra en la **IMAGEN IV.9**.

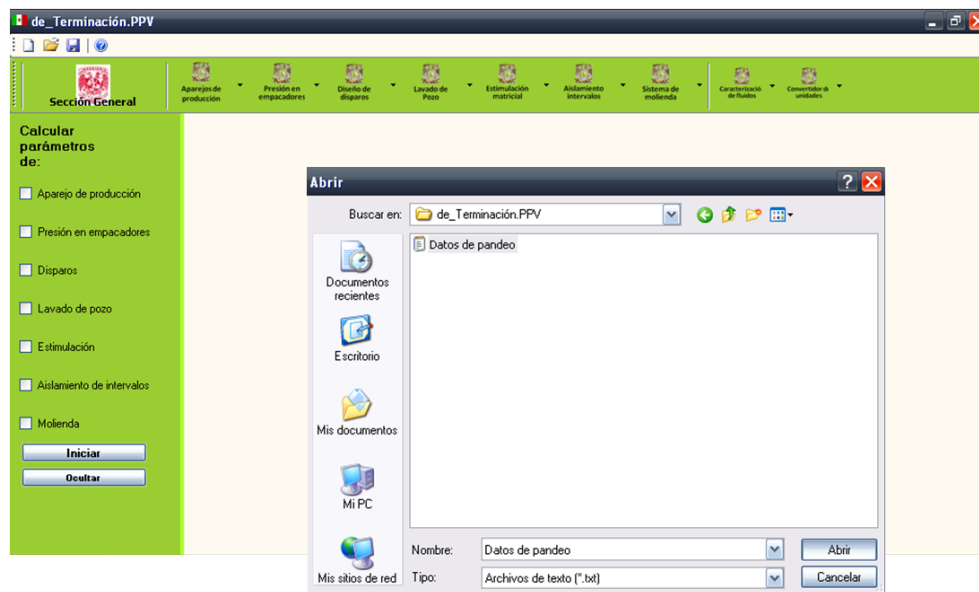


IMAGEN IV. 8.- Uso de “Abrir”.- Se observa que se ha dado clic en el icono “Abrir” con lo que fue desplegado el cuadro homónimo, se tiene seleccionada la ruta donde se encuentra el proyecto requerido.

CAPÍTULO IV Ejemplos de aplicación y resultados

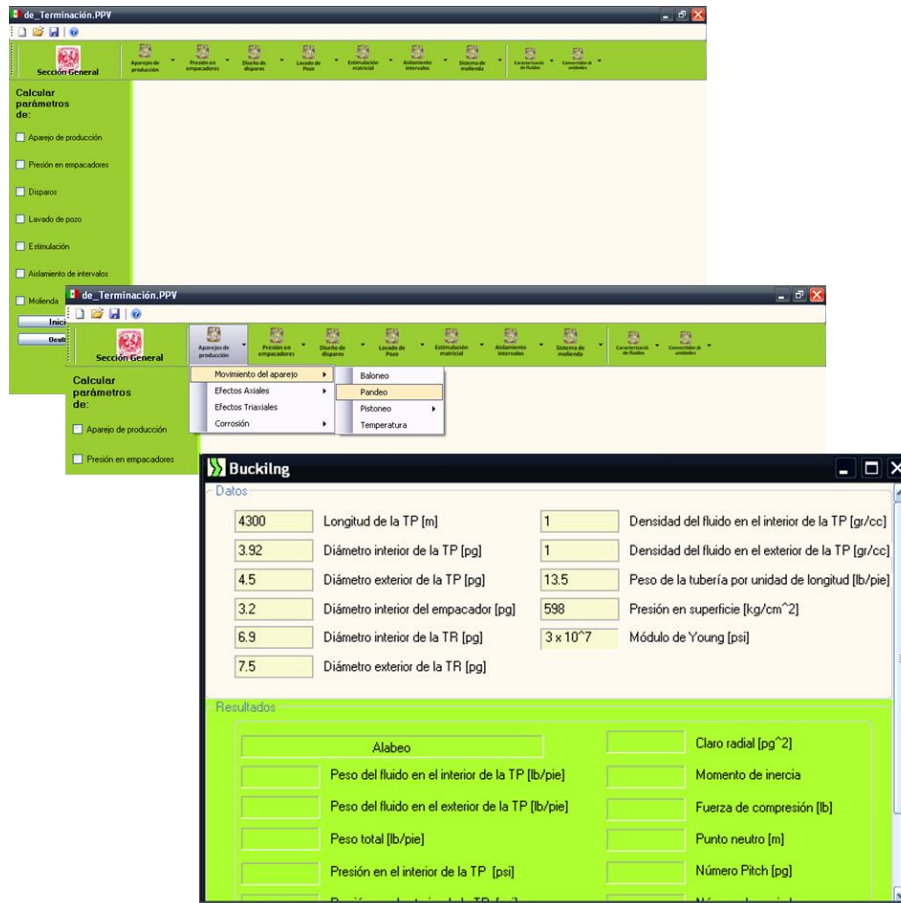


IMAGEN IV. 9.- Continuando con el proceso de apertura de archivo. Se ha dado clic en abrir. Arriba se aprecia la pantalla de diseño en blanco, en medio se observa la selección de la operación donde se encuentran almacenados los datos del proyecto. Abajo se aprecia el proyecto cargado.

IV.1.6 Ayuda

Esta función cuenta con dos opciones:

- ⊕ Revisar Documento, que permite revisar toda la información contenida en ésta tesis, en formato PDF, con lo que el usuario podrá utilizar la ayuda de manera familiar. **(IMAGEN IV.10)**

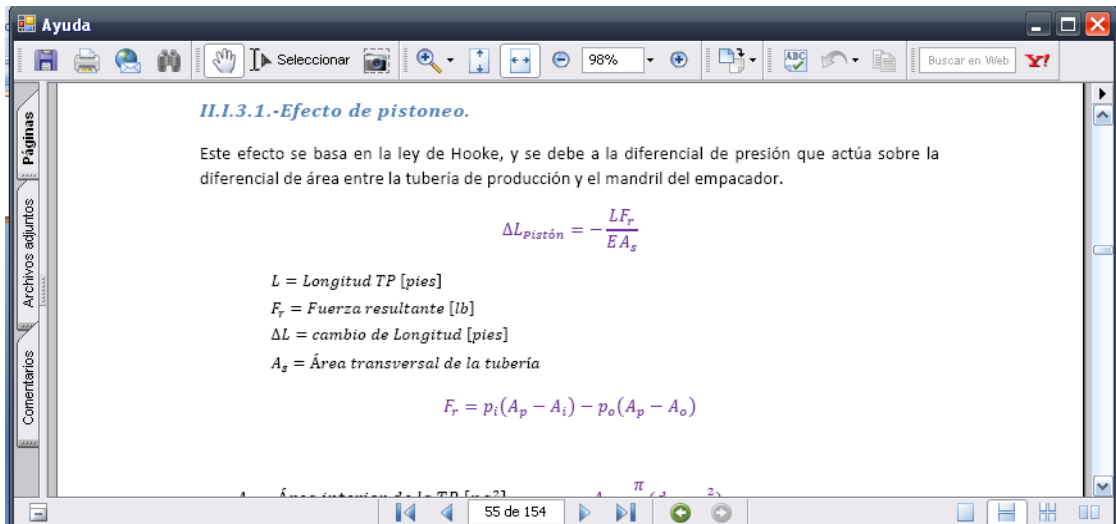


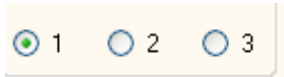
IMAGEN IV. 10.-Sección de ayuda en “de_Terminación.PPV”.- Se aprecia que puede revisarse la información de la tesis en formato PDF, para sustentar con la teoría, los cálculos internos del software.

- ⊕ Acerca de..., donde al seleccionar ésta opción únicamente se muestra una ventana con el nombre del software, los nombres de los autores y el lenguaje de programación en el que fue desarrollado **(IMAGEN IV.11)**.



IMAGEN IV. 11.- Pantalla “Acerca de...” para el software presentado.

IV.I.7 Radio buttons



Estos comandos nos permiten seleccionar sólo una opción de entre varias disponibles. En varias de las operaciones disponibles en de_Terminación.PPV el usuario puede encontrar que estos comandos muestran o esconden secciones de ingreso de datos. Cuando una sección de ingreso de datos se esconde, es debido a que no se requieren dichos datos para realizar los cálculos.

A continuación en la **IMAGEN IV.12** se muestra un ejemplo del uso de los radio buttons en el programa.

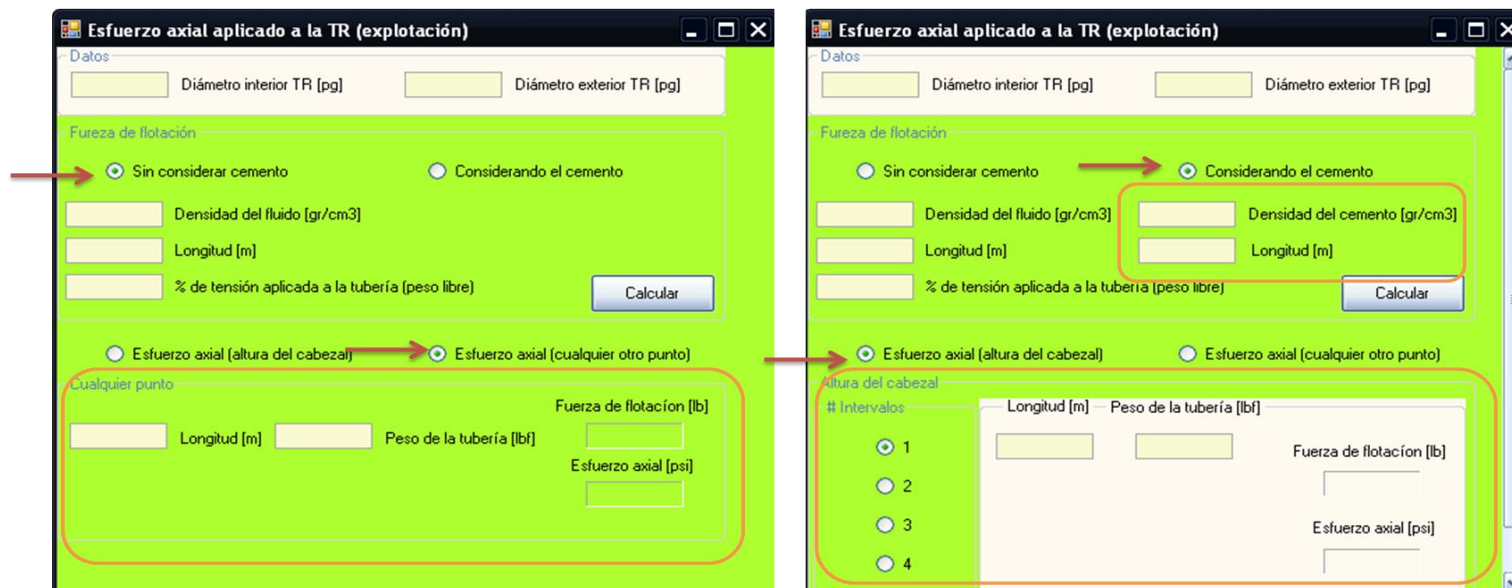


IMAGEN IV. 12.- En las dos pantallas presentadas se tiene la misma operación “Esfuerzo axial aplicado a la TR. En la pantalla izquierda el radio button superior activo es “Sin considerar cemento”, entonces los cuadros de ingreso de datos son: Densidad del fluido, Longitud y % de tensión aplicada a la tubería; el radio button inferior activo es “Esfuerzo axial en cualquier otro punto”, en el recuadro inferior de esta pantalla se aprecian los datos requeridos para esta opción. En la pantalla derecha se aprecia que el radio button superior activo es “Considerando cemento” con lo que se requieren ahora los datos de Densidad y longitud para este fluido; el radio button inferior activo es “Esfuerzo axial (altura del cabezal), con lo que ahora los datos requeridos se presentan en el recuadro inferior de esta pantalla.

IV.1.8 Check box



Este comando permite seleccionar varias opciones de una lista disponible, el caso más común que presenta el programa es la sección general, donde pueden elegirse una o varias operaciones para calcular sus parámetros, sin embargo existen operaciones particulares que requieren del uso de este comando.

En la misma forma que los radio buttons, estos comandos pueden aparecer u ocultar secciones de ingreso de datos, dependiendo de los requerimientos de la operación deseada. En la **IMAGEN IV.13** se presenta un ejemplo del funcionamiento de este comando.

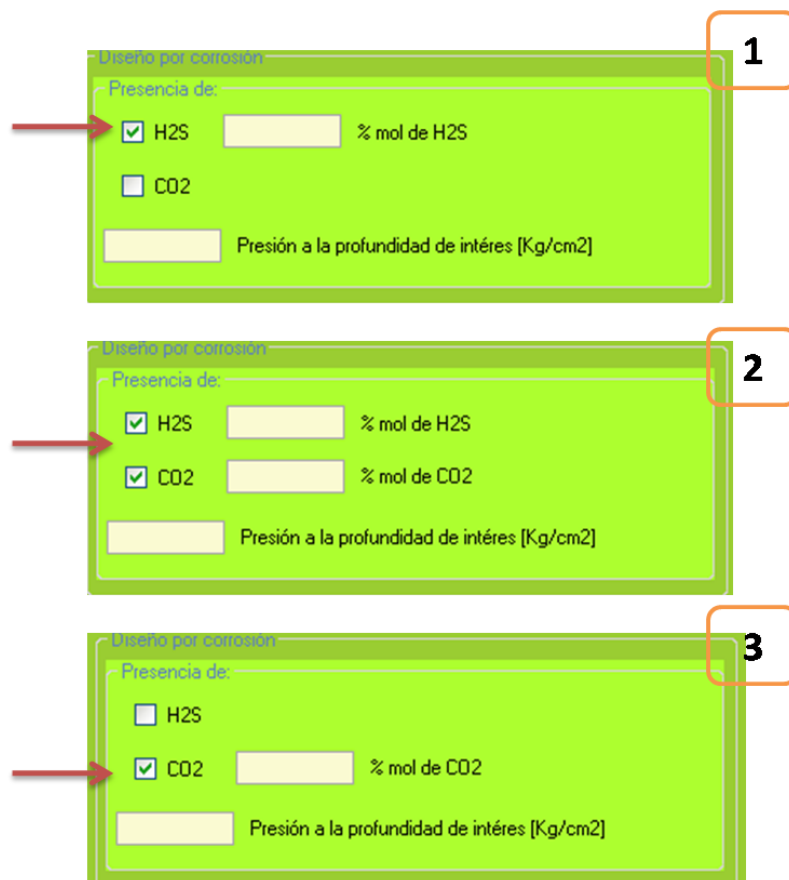
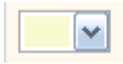


IMAGEN IV. 13.- Uso de "check box". En la pantalla 1 se aprecia que se ha seleccionado H₂S, por lo que se presenta el cuadro de ingreso de datos correspondiente. En la pantalla 2 se tiene la selección de H₂S y CO₂, es por ello que ahora también aparece el cuadro de ingreso de datos correspondiente al CO₂. Por último en la pantalla 3 se tiene seleccionado únicamente al CO₂.

IV.I.9 Combo box



Un combo box sirve para seleccionar únicamente un parámetro de una lista disponible. En la **IMAGEN IV.14** se presenta un ejemplo de este comando.



IMAGEN IV.14.- Uso de “combo box”. A la derecha puede apreciarse un combo box que contiene una lista de unidades de longitud de la cual sólo deberá ser seleccionada una opción.

IV.II Sección general

IV.II.1 Esfuerzos triaxiales

En las imágenes IV.15, IV.16 y IV.17 se presentan ejercicios resueltos extraídos de la literatura consultada, en relación con esfuerzos triaxiales.

Adelante, se presenta la solución de dichos ejercicios mediante el uso del software desarrollado, de esta forma, pueden compararse los resultados obtenidos originalmente y los calculados en de_Terinción.PPV.

Se tiene una tubería de revestimiento de explotación de 7" TRC-95 35 [lb/pie] de 0 a 1500 [m], una de 7" N-80 38 [lb/pie] de 1500 a 3000 [m] y una de 7" P-110 35 [lb/pie] de 3000 a 4500 [m]. La cima de cemento se encuentra a una profundidad de 3000 [m], la tubería se encuentra colgada en el cabezal de 10^{3/4}" 5M x 7" 10M; para alojar la tubería en las cuñas del cabezal se aplicó una tensión del 70% de su peso libre, además presenta un traslape de cemento de 100 [m] con respecto a la T.R. intermedia de 10^{3/4}" N-80 51#. La última etapa fue perforada con lodo de 1.6 gr/cm³, utilizando barrena de 8^{3/4}" y en la etapa de 10^{3/4}" se utilizó fluido de 1.3 [gr/cm³].

El intervalo de interés a probar se encuentra a una profundidad media de 4450 [m]. Considerando el espacio anular cerrado, determinar el esfuerzo triaxial que está siendo aplicado en la tubería de explotación a la altura del cabezal, a la profundidad de la cima de cemento, a la profundidad de la zapata de 10^{3/4}", a la profundidad del intervalo de interés y en el fondo del pozo.

Solución al esfuerzo triaxial a la altura del cabezal (σ_T) $\sigma_T = \sqrt{(f_1 f_2)^2 + f_3^2}$ si: $f_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) (P_o - P_i)$ $f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{D}{t}\right)^2}{\left(\frac{D}{t}\right) - 1} \right]$ $f_3 = \sigma_z - \left[\frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} \right]$

Calculando: $t = \frac{D-d}{2} = \frac{7-6.004}{2} = 0.498$ [pg]

$$f_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) (1,237.14 - 0) = 1,071.36 \left[\frac{lb}{pg^2}\right] \quad f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{7}{0.498}\right)^2}{\left(\frac{7}{0.498}\right) - 1} \right] = 7.5664 \left[\frac{lb}{pg^2}\right] \quad f_3 = 24,714.95 - \left[\frac{(3.002^2 * 0) - (3.5^2 * 1,237.14)}{3.5^2 - 3.002^2} \right] = 29,395.3 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

$$\sigma_T = \sqrt{(1,071.36 * 7.5664)^2 + (29,395.3)^2} = 30,492.56 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

Calculando el esfuerzo triaxial a la profundidad de la cima de cemento.

Calculando: $t = \frac{D-d}{2} = \frac{7-5.992}{2} = 0.504$ [pg]

$$f_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) (4,649 - 3,412) = 1,071.3 \left[\frac{lb}{pg^2}\right] \quad f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{7}{0.504}\right)^2}{\left(\frac{7}{0.504}\right) - 1} \right] = 7.4832 \left[\frac{lb}{pg^2}\right] \quad f_3 = 7,786.95 - \left[\frac{(2.96^2 * 6,826) - (3.5^2 * 8,063)}{3.5^2 - 2.96^2} \right] = 1,338.18 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

$$\sigma_T = \sqrt{(1,071.3 * 7.4832)^2 + (1,338.18)^2} = 8,128.33 \left[\frac{lb}{pg^2}\right]$$

IMAGEN IV. 15.- Ejercicio extraído de la literatura consultada²⁹ correspondiente a efectos triaxiales

²⁹ Cuaderno de ejercicios de Terminación de Pozos, UNAM 2005.

Determinar la elipse de esfuerzos triaxiales para las tuberías del ejercicio anterior.

Diámetro externo (D) [pg]	Grado	Punto de cedencia (Y _x) 1000 (lb/pg ²)	Peso (lb/pie)	Diámetro interno (d) [pg]
7	TRC	95	35	6.004
7	N	80	38	5.92

Calculando la elipse de esfuerzos triaxiales para la TRC-95:

Teniendo: $t = \frac{D-d}{2} = \frac{7-6.004}{2} = 0.498 [pg]$ y $f_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{(\frac{D}{t})^2}{(\frac{D}{t})-1} \right] = 7.5664 [pg]$

$$r = \frac{D}{t} = \frac{7}{0.498} = 14.056$$

Calculando:

$$r_o = 3.5 [pg] \quad y \quad r_i = 3.002 [pg]$$

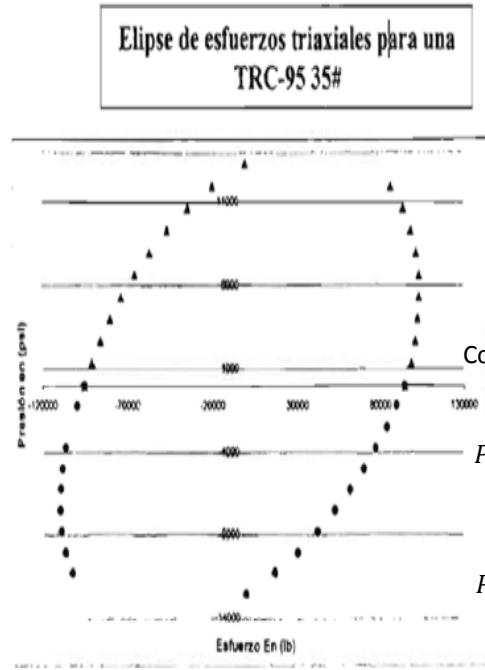
$$w_1 = \frac{r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} = \frac{3.5^2}{3.5^2 - 3.002^2} = 3.7832$$

$$w_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} f_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} * 7.5664 = 6.5527$$

$$w_3 = \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} = \frac{3.002^2}{3.5^2 - 3.002^2} = 2.7832$$

Se calcula para diferentes presiones internas y externas, considerando los límites de la gráfica.

Pi	σz	Po	σz
0.000	95000.000	0.000	95000.000
1334.405	98310.661	-1255.549	89893.080
2668.810	100804.354	-2511.099	84064.149
4003.215	102448.329	-3766.648	77487.738
5337.619	103182.869	-5022.198	70117.899
6672.024	102911.649	-6277.747	61881.843
8006.429	101482.994	-7533.297	52668.036
9340.834	98651.542	-8788.846	42303.375
10675.239	93990.180	-10044.396	30505.474
12009.644	86641.831	-11299.945	16767.329
13344.049	0.000	-12555.495	0.000
13344.049	0.000	-12555.495	0.000
12009.644	-19791.249	-11299.945	-102267.329
10675.239	-34567.441	-10044.396	-106505.474
9340.834	-46656.645	-8788.846	-108803.375
8006.429	-56915.940	-7533.297	-109668.036
6672.024	-65772.437	-6277.747	-109381.843
5337.619	-73471.499	-5022.198	-108117.899
4003.215	-80164.802	-3766.648	-105987.738
2668.810	-85948.669	-3766.648	-105987.738
1334.405	-90882.819	-1255.549	-99393.080
0.000	-95000.000	0.000	-95000.000



Considerando los siguientes límites de la grafica:

$$P_i = \pm \sqrt{\frac{Y_x^2}{w_3^2 + w_2^2}} = \pm \sqrt{\frac{95000^2}{2.78^2 + 6.55^2}} = 13,344.1 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

$$P_o = \pm \sqrt{\frac{Y_x^2}{w_1^2 + w_2^2}} = \pm \sqrt{\frac{95000^2}{3.78^2 + 6.55^2}} = 12,555.4 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

IMAGEN IV. 16.- Continuación 1 del ejercicio correspondiente a efectos triaxiales (TR 95). En el recuadro se aprecian datos para comparación con la ejecución del software (ver IMAGEN IV.20).

Calculando la elipse de esfuerzos triaxiales para la N-80:

$$r = \frac{D}{t} = \frac{7}{0.54} = 12.963$$

Teniendo: $t = \frac{D-d}{2} = \frac{7-5.92}{2} = 0.54 [pg]$ y $f_2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{D}{t} \right)^2 \right] = 7.0233 [pg]$

Calculando:

$$r_o = 3.5[pg] \quad y \quad r_i = 2.96[pg]$$

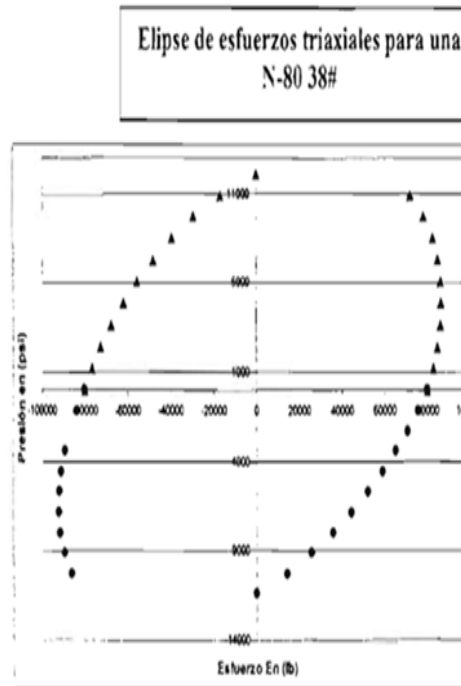
$$w_1 = \frac{r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} = \frac{3.5^2}{3.5^2 - 2.96^2} = 3.5116$$

$$w_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} f_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} * 7.0233 = 6.0823$$

$$w_3 = \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} = \frac{2.96^2}{3.5^2 - 2.96^2} = 2.5116$$

Se calcula para diferentes presiones internas v externas, considerando los límites de la gráfica.

Pi	sz	Po	sz
0.000	80000.000	0.000	80000.000
1215.711	82710.964	-1139.069	75699.435
2431.422	84728.056	-2278.139	70790.862
3647.132	86023.213	-3417.208	65252.832
4862.843	86545.222	-4556.278	59046.652
6078.554	86211.371	-5695.347	52111.026
7294.265	84891.142	-6834.416	44352.030
8509.975	82372.730	-7973.486	35623.895
9725.686	78285.540	-9112.555	25688.820
10941.397	71878.991	-10251.624	14119.856
12157.108	0.000	-11390.694	0.000
12157.108	0.000	-11390.694	0.000
10941.397	-16917.321	-10251.624	-86119.856
9725.686	-29430.722	-9112.555	-89688.820
8509.975	-39624.764	-7973.486	-91623.895
7294.265	-48250.028	-6834.416	-92352.030
6078.554	-55677.110	-5695.347	-92111.026
4862.843	-62117.814	-4556.278	-91046.652
3647.132	-67702.656	-3417.208	-89252.832
2431.422	-72514.351	-3417.208	-89252.832
1215.711	-76604.112	-1139.069	-83699.435
0.000	-80000.000	0.000	-80000.000



Considerando los siguientes límites de la grafica:

$$P_i = \pm \sqrt{\frac{Y_x^2}{w_3^2 + w_2^2}} = \pm \sqrt{\frac{80000^2}{2.511^2 + 6.082^2}} = 12,157 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

$$P_o = \pm \sqrt{\frac{Y_x^2}{w_1^2 + w_2^2}} = \pm \sqrt{\frac{80000^2}{3.511^2 + 6.082^2}} = 11,390 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

IMAGEN IV. 17 Continuación 2 del ejercicio correspondiente a efectos triaxiales (TR 80). En el ovalo de superior que encierra al dato "5.92" se observa un error, pues el dato correcto debe ser "5.992" en relación al enunciado. En el recuadro de la izquierda se observan datos para comparación con la ejecución del software (ver IMAGEN IV.22).

La solución de los anteriores ejercicios en de_Terminación.PPV se muestra a continuación.

El primer paso será indicar los parámetros que a calcular, en este caso se quiere calcular un diseño de aparejo de producción, para poder realizar este diseño se tiene que seleccionar dicha operación en la sección general; posteriormente se desplegará la ventana para introducir datos generales (IMAGEN IV.18), el siguiente paso es dar clic en continuar, entonces se desplegará una nueva pantalla en la que se solicitan datos específicos de la operación, en este ejemplo se seleccionó “diseño triaxial”, después, de acuerdo a la tubería especificada (TR o TP) deberá ingresarse datos adicionales. El procedimiento se muestra en las imágenes IV.19 y IV.20.

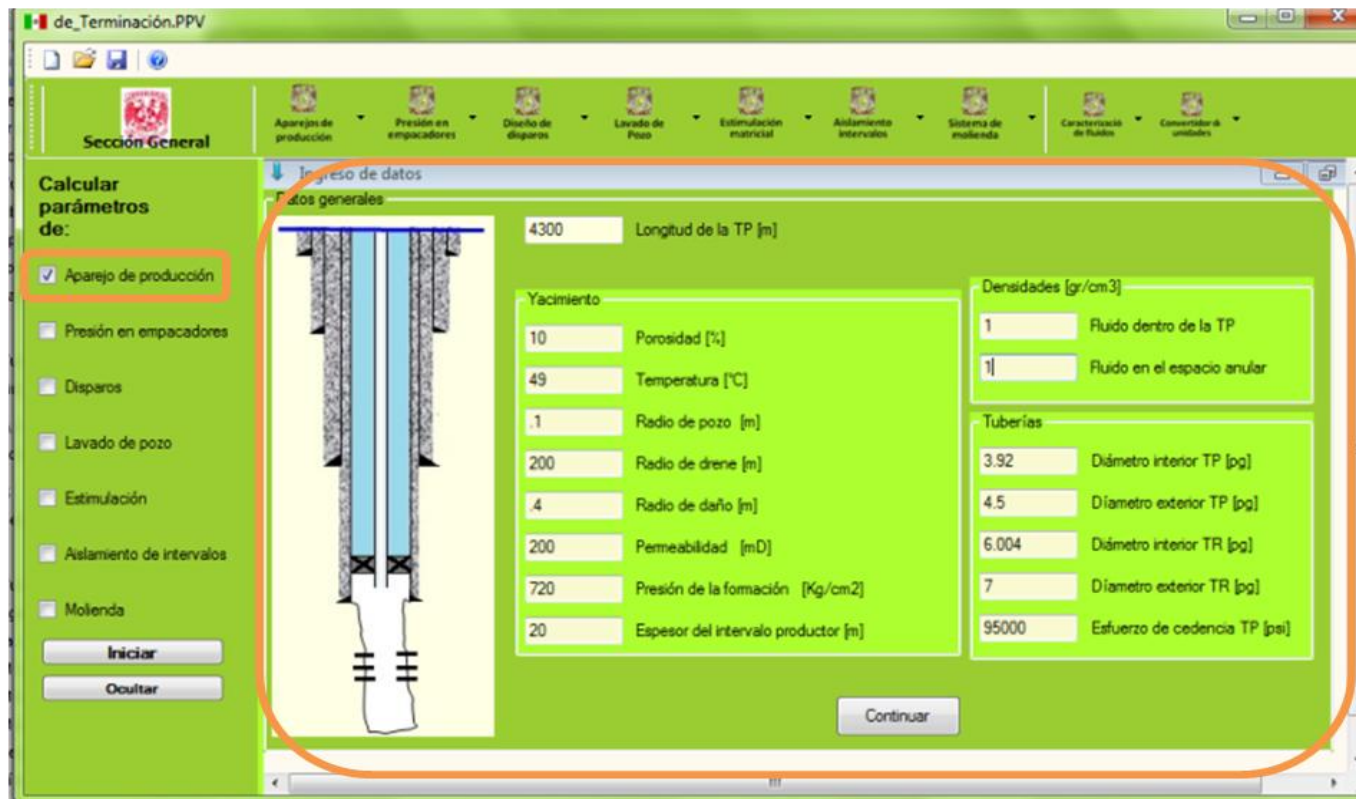


IMAGEN IV.18.- Solución del ejercicio. Apartado de selección e ingreso de datos generales. En el recuadro de la izquierda se aprecia la selección de la operación “Aparejos de producción”; en el recuadro de la derecha se aprecia la pantalla de ingreso de datos generales.



IMAGEN IV. 19 Pantalla de inserción de datos particulares para la operación de “aparejos de producción”. En el recuadro inferior se aprecia que se ha seleccionado “diseño de TR y los datos ingresados.

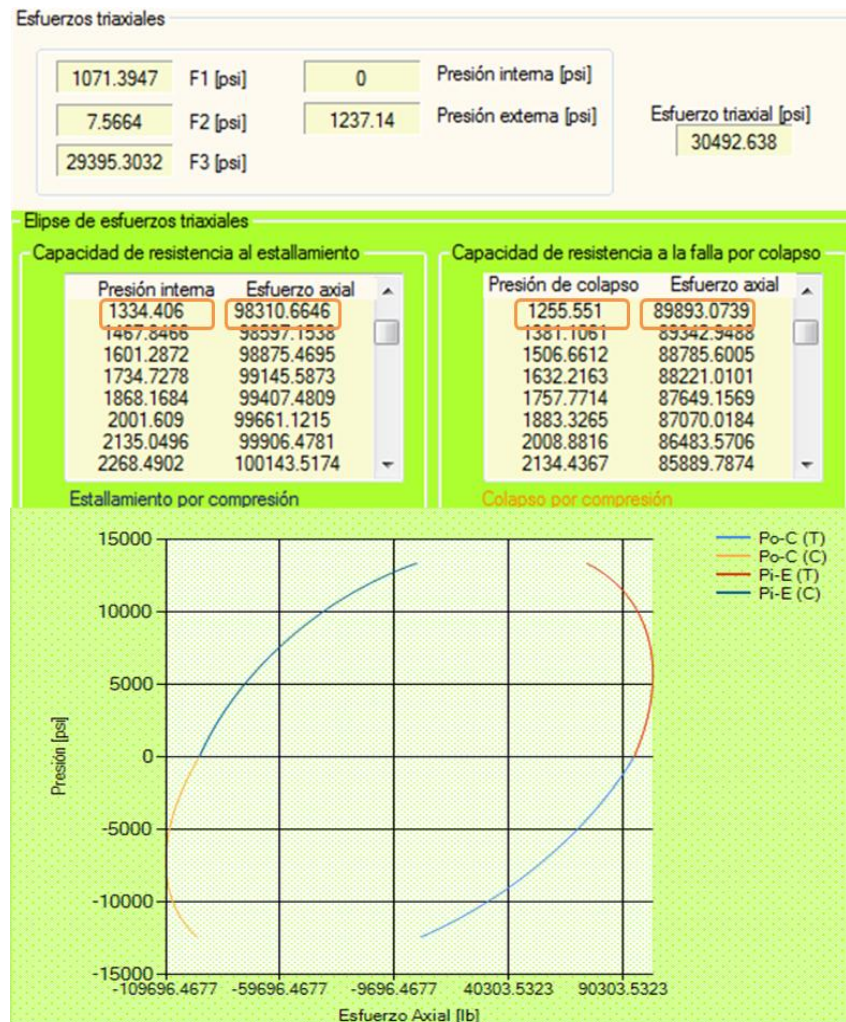


IMAGEN IV. 20.- Pantalla de resultados de para la primera parte del ejercicio (TR 95). Pueden compararse los valores presentados en los recuadros (1334.406, 98310.6646, 1255.551 y 89893.0739) con los de la IMAGEN IV.16.

En el ejercicio de comparación mostrado en las imágenes anteriores, se puede observar que se tienen dos tipos de TR, por lo tanto se requiere ejecutar nuevamente el programa pero ahora para obtener los cálculos correspondientes a la segunda tubería.

Se utilizan las funciones “guardar” y “abrir”, así podrán almacenarse os datos de la primer corrida y con esto únicamente se tendrán que cambiar los datos de la TR como se muestra en la **IMAGEN IV.21**. Los resultados se muestran en la **IMAGEN IV.22**.

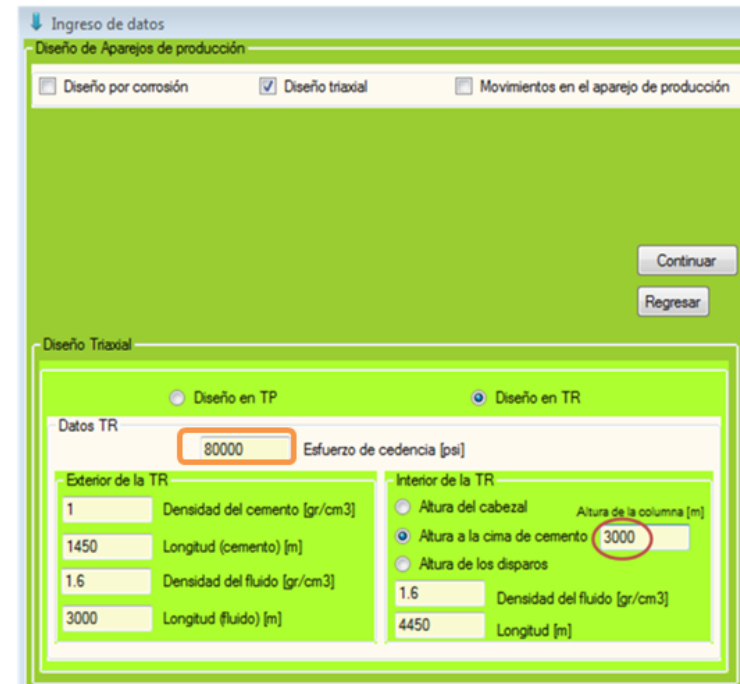
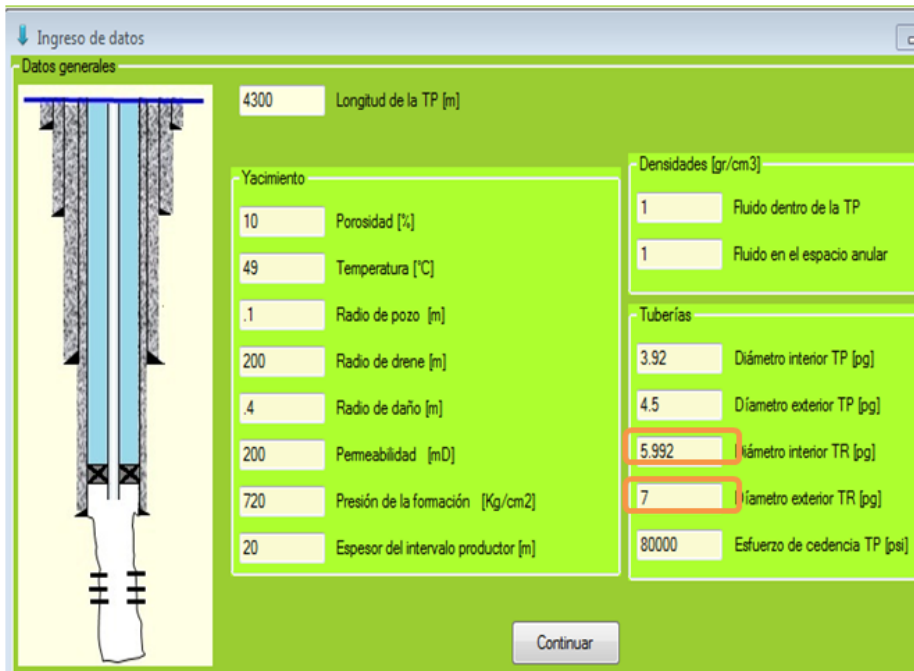


IMAGEN IV. 21.- Continuación de la ejecución del software para el ejercicio de esfuerzos triaxiales. En Los recuadros se observa que únicamente se reemplazan los valores de la anterior TR (TR 95) por los de la tubería actual (TR 80).

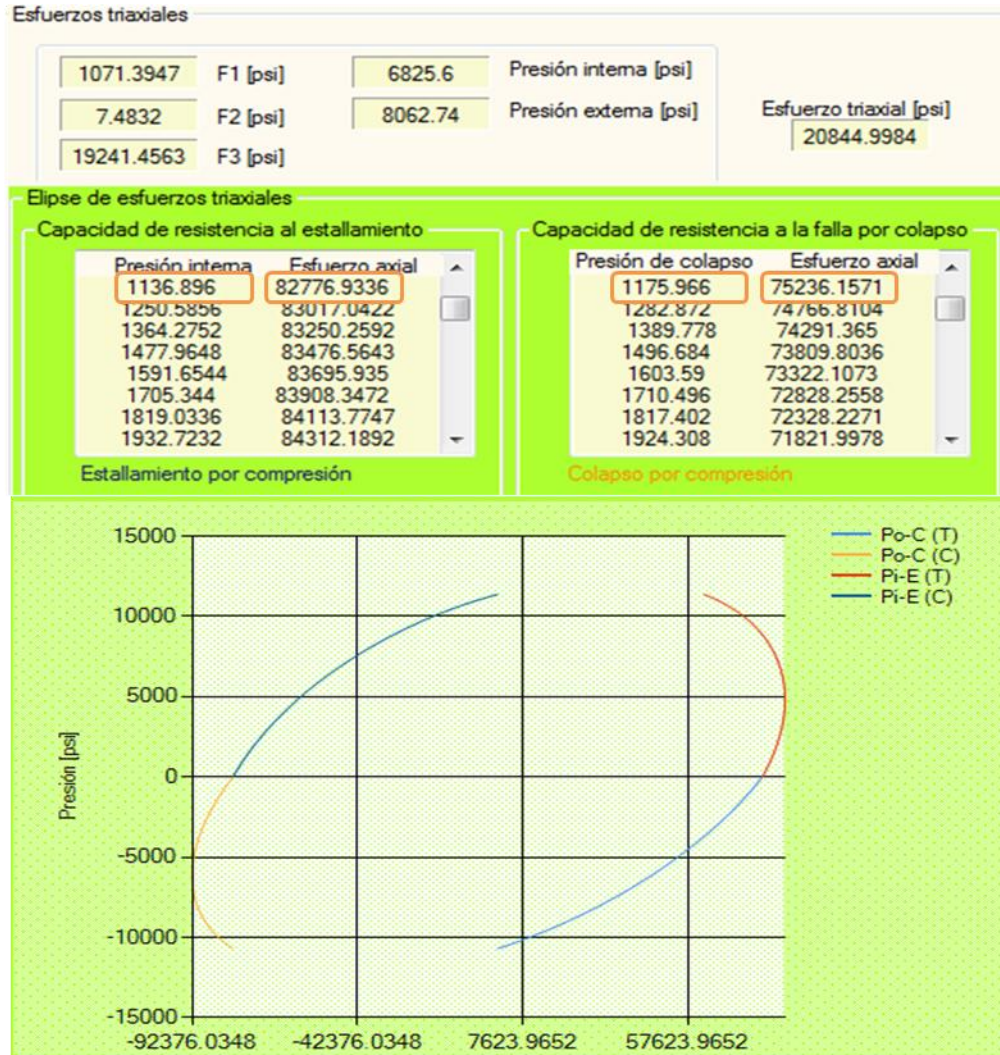


IMAGEN IV. 22.- Continuación de la solución al ejercicio de esfuerzos triaxiales. Se aprecia la ventana de resultados correspondientes a la TR 80.

IV.II.2 Aparejo de producción, empaques, disparos y lavado de pozo

Teniendo un yacimiento de aceite, se requieren obtener ciertos parámetros para una terminación rápida y eficiente, para el yacimiento se cuentan con los siguientes datos:

- ⊕ Espesor del intervalo productor; $h_f = 20$ [m]
- ⊕ Presión de formación; $P_{wf} = 720$ [kg/cm^2]
- ⊕ Permeabilidad; $k = 200$ [mD]
- ⊕ Porosidad ; $\Phi = 10$ [%]
- ⊕ Temperatura; $T = 49$ [$^{\circ}\text{C}$]

Como datos adicionales se tiene:

- ⊕ radio del pozo $r_w = 0.1$ [m]
- ⊕ radio de drene $r_e = 200$ [m]
- ⊕ radio de daño $r_x = 0.4$ [m]

Los datos arrojados por la bitácora de perforación, indican que la profundidad total del pozo es de 4470 [m], quedando el intervalo productor a 4420 [m].

Se tiene un TR 7", TRC-95, 35 [$lb/pipe$], $d_i = 6.004$ [pg] de 0 a 4470 [m]. La cima de cemento se encuentra a 3000[m], la tubería se encuentra colgada en un cabezal de 10 $^{3/4}$ " (5M) x 7" (10M), la última etapa fue perforada con lodo de 1.6 [gr/cm^3], para posteriormente quedar con un fluido de terminación de 1 [gr/cm^3] (agua), se considera que el espacio anular se encuentra cerrado.

Para culminar la etapa de terminación se tiene un aparejo de producción de 4 $^{1/2}$ ", N-80,13.5 [$lb/pipe$], $d_i = 3.92$ ", con un empacador 415-01, 80-32 anclado a 4300[m].

A continuación se presenta la solución del ejercicio propuesto mediante la ejecución del software de_Terminación.PPV.



IMAGEN IV.23.- Selección de los parámetros que se desean calcular de acuerdo al ejercicio propuesto

- a) Determinar tanto la presión interna como la presión externa a la altura del cabezal, graficar la elipse triaxial correspondiente a la TRC-95 y calcular el acortamiento o elongación del aparejo causado por los efectos de pistoneo, baloneo, pandeo y temperatura.

Teniendo en cuenta que se realizara una prueba de admisión con una presión de superficie de 597 [kg/cm^2], la temperatura antes de iniciar la prueba es de 120 [°F] y la temperatura del agua es de 70 [°F], considere la presencia de H₂S y CO₂.

H₂S= 2% mol

CO₂= 4% mol

En la **IMAGEN IV.24** se muestra el ingreso de datos requeridos para la sección de aparejos de producción.

Ingreso de datos

Diseño de Aparejos de producción

Diseño por corrosión Diseño triaxial Movimientos en el aparejo de producción

Diseño por corrosión

Presencia de:

H2S 2 % mol de H2S

CO2 4 % mol de CO2

4420 Profundidad de los disparos [m]

Continuar

Regresar

Diseño Triaxial

Diseño en TP Diseño en TR

Datos TR

95000 Esfuerzo de cedencia [psi]

Exterior de la TR

1 Densidad del cemento [gr/cm3]

1420 Longitud (cemento) [m]

1.6 Densidad del fluido [gr/cm3]

3000 Longitud (fluido) [m]

Interior de la TR

Altura del cabezal Altura de la columna [m]

Altura a la cima de cemento 0

Altura de los disparos

1.6 Densidad del fluido [gr/cm3]

4420 Longitud [m]

Movimientos en el aparejo de producción

Pistoneo

3.2 Diámetro interior del empacador [pg]

597 Presión en superficie [Kg/cm2]

Baloneo

597 ΔP dentro de la TP [Kg/cm2]

0 ΔP fuera de la TP [Kg/cm2]

0 Δρ dentro de la TP [gr/cm3]

0 Δρ fuera de la TP [gr/cm3]

0 ΔP debido al flujo [Kg/cm2]

Buckling

13.5 Peso de la tubería por unidad de longitud [lb/pie]

Temperatura Longitud pasar a pies en el código

120 Temperatura superficial antes de la prueba [°F]

70 Temperatura superficial después de la prueba [°F]

IMAGEN IV. 24.- Ingreso de datos correspondiente a la sección de aparejos de producción

- b) Calcular tanto la presión sobre el empacador como la presión bajo el empacador y obtener la diferencial de presión considerando la prueba de admisión mencionada con una presión de bombeo de $750 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$.

En la **IMAGEN IV.25** se muestra la sección que corresponde a los efectos de presión en el empacador.

Ingreso de datos

Efectos de presión sobre el empacador

Presión diferencial en el empacador

1.3 Densidad del fluido empacador (salmuera = 1.3 [gr/cc])

4300 Profundidad vertical del empacador [m]

750 Presión de bombeo [Kg/cm²]

Tipo de prueba

Estimulación

Admisión .85 Densidad del fluido de terminación Diesel=0.85 [gr/cc]

Inducción

Regresar Continuar

IMAGEN IV. 25.- Ingreso de datos para la sección de empacadores

- c) Los registros sísmico y densidad en el intervalo productor de 4400-4420 [m] dan una medida de $\Delta t = 45$ [μ segs.] y una $p_b = 8$ [gr/cm^3], el análisis de los registros indican una invasión somera, ¿cuál debe ser la presión diferencial previa al disparo y determinar la densidad del fluido y la columna de este para evitar la inestabilidad en el pozo? Se debe considerar que el accesorio tubular nuevo de menor rango tiene una capacidad de 350 [Kg/cm^2].

La **IMAGEN IV.26** es la correspondiente a la sección de diseño de disparos.

Ingreso de datos

Diseño de Disparos

Datos

45 Tiempo de tránsito [μ seg/pie]

8 Densidad volumétrica [gr/cc]

Arena consolidada

Resistencia compresiva

Presión de trabajo del elemento de menor rango

Fluidos Esperados

Formación con aceite

Formación con gas

Tipo de Invasión

Invasión somera

Invasión profunda

Condiciones de la tubería

Nueva

Regular

350 Presión de trabajo del elemento de menor rango [Kg/cm²]

1 Densidad del fluido [gr/cc]

4420 Altura a la profundidad de los disparos [m]

Regresar Continuar

IMAGEN IV. 26.- Ingreso de datos que corresponden a la sección de diseño de disparos

- ⊕ Diámetro de la partícula = 0.4 [pg]
- ⊕ Densidad de la partícula = 2.1 [gr/cm^3]
- ⊕ Diámetro de la sarta = 3.5 [pg]
- ⊕ Max. Gasto de bombeo = 150 [gal/min]

Para el bache separador se tiene:

$$\rho_{\text{sep}} = 1.53 \text{ [gr/cm}^3\text{]} \text{ y } \mu = 34 \text{ [cp]}.$$

Para el bache lavador se tiene:

$$\rho_{\text{lav}} = 1.65 \text{ [gr/cm}^3\text{]} \text{ y } \mu = 26 \text{ [cp]}.$$

Para el bache viscoso se tienen las siguientes lecturas del viscosímetro Fann:

$$\rho_{\text{vis}} = 0.94 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$$

$$L_{600} = 371$$

$$L_{300} = 220$$

Determinar los volúmenes de los baches (separador, viscoso, lavador), calcular el gasto mínimo para los tres baches y su factor de eficiencia tanto para el bache viscoso como el bache lavador.

La **IMAGEN IV.27** pertenece al último inciso del ejercicio propuesto que concierne a la sección de lavado de pozo.

The screenshot shows a software window titled "Ingreso de datos" (Data Entry) for a well washing section. The interface is organized into several panels:

- Lavado de pozo (Well Washing):**
 - Datos del pozo (Well Data):**
 - Profundidad vertical de la sarta de lavado [m]: 4420
 - Densidad del fluido de perforación [gr/cm³]: 1.6
 - Densidad de la partícula (baches) [gr/cm³]: 2.1
 - Diámetro de la partícula [µg]: .4
 - Diámetro donde el espacio anular sea el más amplio [µg]: 3.5
 - Diámetro externo de la sarta de lavado: 3.5
 - Datos de la bombas de lodo (Mud Pump Data):**
 - Máxima presión de trabajo [Kg/cm²]: 750
 - Máximo gasto de bombeo [gal/min]: 150
- Bache separador (Separator Slurry):**
 - Densidad del fluido [gr/cm³]: 1.53
 - Viscosidad [cp]: 34
- Bache lavador (Washer Slurry):**
 - Densidad del fluido [gr/cm³]: 1.65
 - Viscosidad [cp]: 26
- Bache viscoso (Viscous Slurry):**
 - L 600: 371
 - L 300: 220
 - Densidad del fluido [gr/cm³]: .94

At the bottom of the window, there are two buttons: "Regresar" (Return) and "Continuar" (Continue).

IMAGEN IV. 27.- Ingreso de datos para la sección de lavado de pozo

De acuerdo al ejercicio propuesto a continuación se muestran los resultados arrojados por el software de_terminacion.PPV.

Resultados:

En la **IMAGEN IV.28** podemos ver los resultados del inciso “a” que pertenecen a la sección de aparejos de producción.

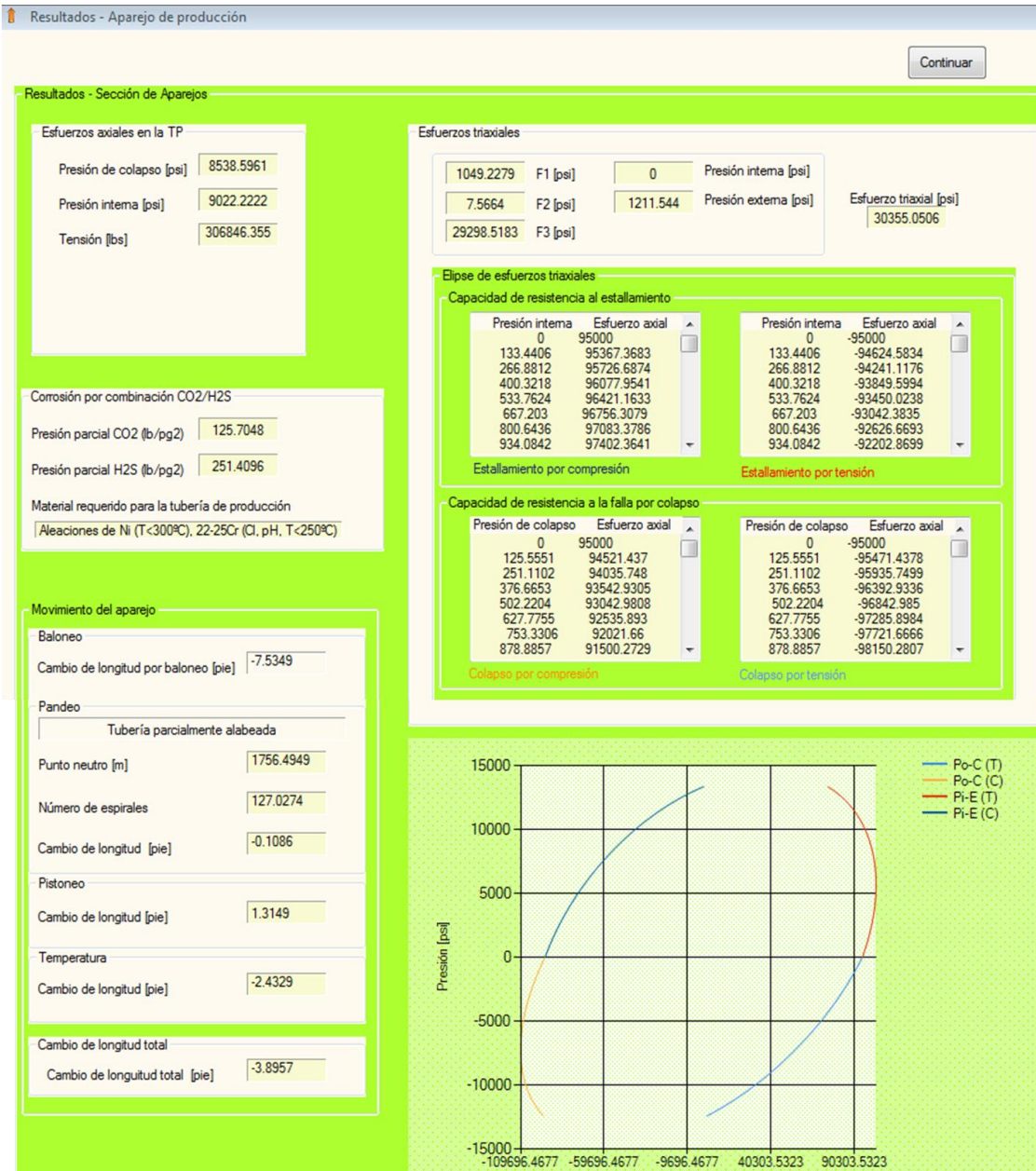


IMAGEN IV. 28.- Resultados arrojados por el software que corresponden a aparejos de producción

La **IMAGEN IV.29** muestra los resultados de la sección de Empacadores con respecto al inciso “b” del ejercicio.

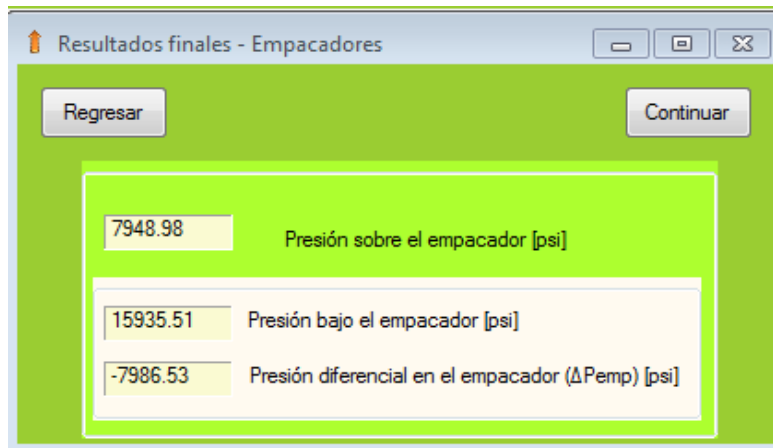


IMAGEN IV. 29.- Resultados finales de la sección de empacadores

También se muestra en la **IMAGEN IV.30** los resultados finales arrojados por la sección de diseño de disparos que corresponden al inciso “c” del ejercicio.

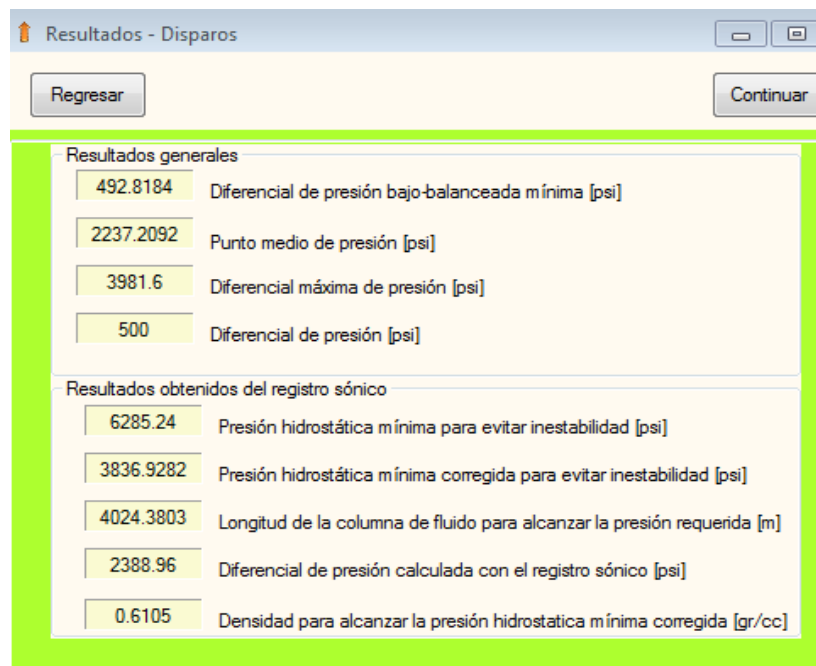


IMAGEN IV. 30.- Resultados arrojados por el software que corresponden al diseño de disparos

Por último la **IMAGEN IV.31** muestra los resultados finales del lavado de pozo que corresponde al inciso “d” del ejercicio, también se muestra un aviso con la leyenda “ejecución completa”, con lo que se finaliza la ejecución del programa de_terminación.PPV.

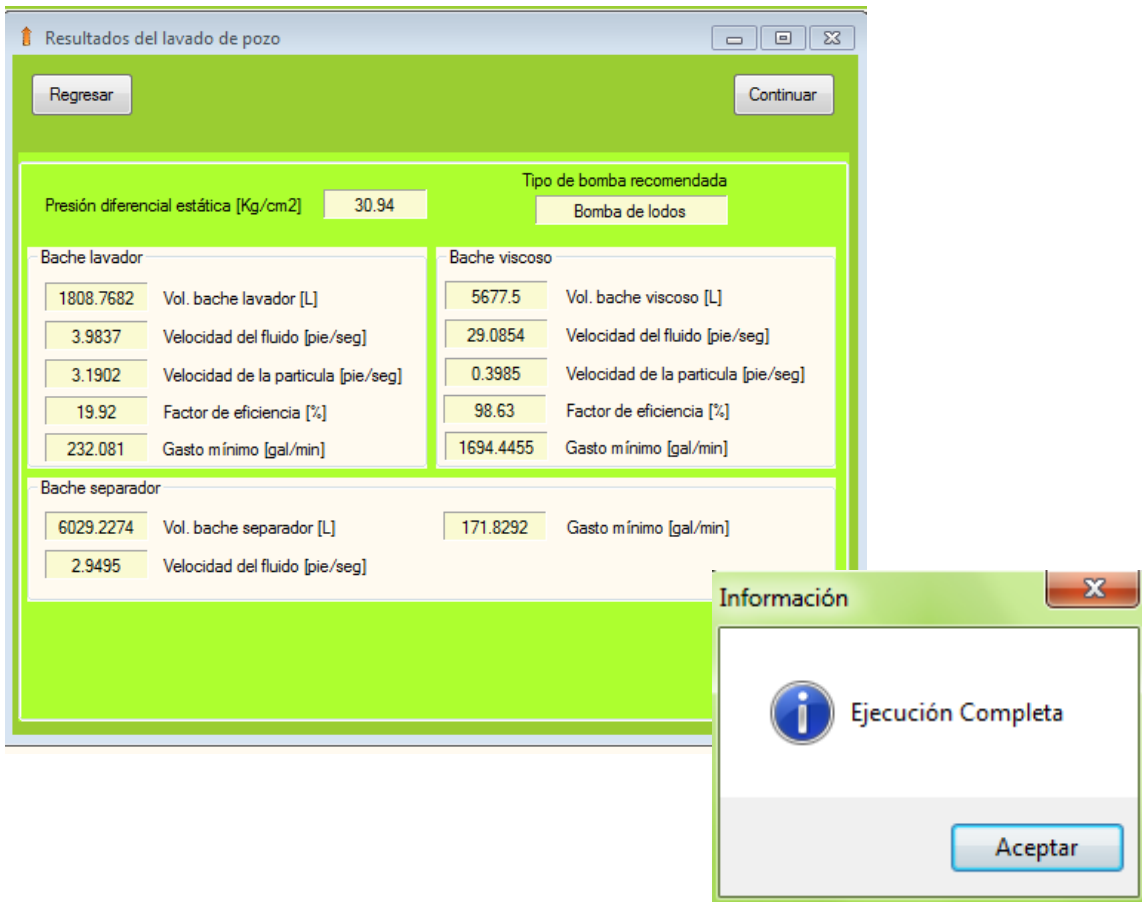


IMAGEN IV. 31.- Resultados finales de la sección de lavado de pozo y fin de la ejecución.

IV.III Sección particular

IV.III.1 Presión interna

En este caso se requiere calcular la resistencia a la presión interna de acuerdo a los datos mostrados en la **IMAGEN IV.32**. Con la pantalla de la sección particular correspondiente a la presión interna se puede realizar la comparación de resultados (**IMAGEN IV.33**).

Determinar la resistencia a la presión interna de la siguiente tubería:

Diámetro ext. [pg]	Grado	Esfuerzo de cedencia (Yx) 1000 [lb/pg ²]	Peso [lb/pie]	Diámetro int. [pg]
2 3/8	N	80	4.6	1.995

Solución:

$$P_i = 0.875 \left(\frac{2Y_x t}{D} \right) \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{2.375 - 1.995}{2} = 0.19[\text{pg}]$$

Sustituyendo:

$$P_i = 0.875 \left(\frac{2 * 80,000 * 0.19}{2.375} \right) = 11,200 \left[\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right]$$

La tubería N-80 tiene una resistencia a la presión interna de 11,200[lb/pg²]

IMAGEN IV. 32.- Ejercicio tomado de la literatura consultada³⁰ correspondiente a presión interna

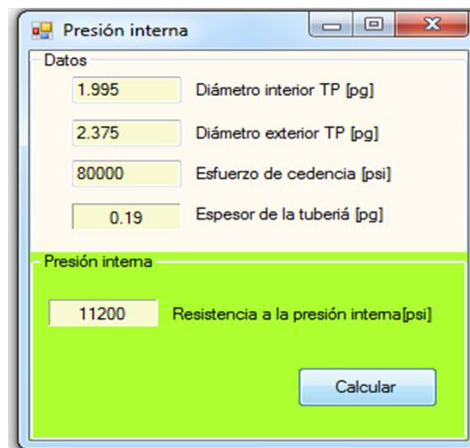


IMAGEN IV. 33.- Pantalla de datos y resultado para el ejercicio en de_Terminación.PPV.

³⁰ Cuaderno de ejercicios de Terminación de Pozos, UNAM 2005.

IV.III.2 Movimientos en el aparejo: baloneo

De acuerdo al ejercicio mostrado en la **IMAGEN IV.34**, se ejecutó la sección particular correspondiente a baloneo. La IMAGEN de los resultados obtenidos en el software se observan en la página siguiente con la **IMAGEN IV.35**.

Ejercicio:

Considerar un aparejo de producción de 4¹/₂" N-80 13.5 [lb/pie], d=3.92, con empacador 415-01 80-32 para una T.R. de 7⁵/₈" 39 [lb/pie] y el Baker anclado a 4300 [m]. Determinar el acortamiento o elongación debido al efecto de baloneo cuando se efectúa una prueba de admisión re presionando la T.P. en superficie con 8500 [lb/pg²].

Datos:

- Densidad del fluido dentro de la tubería de producción 1 [gr/cm³]
- Densidad del fluido por el espacio anular 1 [gr/cm³]

Calculando la relación de diámetros (R):
$$R = \frac{D}{d} = \frac{4.5 [pg]}{3.92 [pg]} = 1.1479$$

Tomando las siguientes consideraciones:

	Condiciones iniciales	Condiciones finales	Cambio de condiciones
Densidad Interna	$\rho_{i_1} = 1 [\text{gr}/\text{cm}^3]$	$\rho_{i_2} = 1 [\text{gr}/\text{cm}^3]$	$\Delta\rho_i = 0$
Densidad en el E.Anular	$\rho_{o_1} = 0 [\text{gr}/\text{cm}^3]$	$\rho_{o_2} = 0 [\text{gr}/\text{cm}^3]$	$\Delta\rho_o = 0$
Presión Interna	$P_{i_1} = 0 [\text{lb}/\text{pg}^2]$	$P_{i_2} = 8,500 [\text{lb}/\text{pg}^2]$	$\Delta P_i = 8,500 [\text{lb}/\text{pg}^2]$
Presión en el E.Anular	$P_{o_1} = 0 [\text{lb}/\text{pg}^2]$	$P_{o_2} = 0 [\text{lb}/\text{pg}^2]$	$\Delta P_o = 0 [\text{lb}/\text{pg}^2]$

$$\Delta L = -\frac{2\mu L}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta P_i}{R^2 - 1} \right)$$

Sustituyendo:

$$\Delta L = -\frac{2(0.3)(4300)}{3 \times 10^7} \left(\frac{8500}{(1.1479)^2 - 1} \right) = -2.3 [m]$$

El efecto de baloneo provoca un acortamiento del aparejo de 2.3 metros.

IMAGEN IV. 34 Ejercicio extraído de la literatura consultada³¹ correspondiente al efecto de baloneo

³¹ Cuaderno de ejercicios de Terminación de Pozos, UNAM 2005.

The screenshot shows a software window titled "Baloneo". It is divided into two main sections: "Datos" (Data) and "Resultados" (Results).

Datos:

- Longitud de la TP [m]: 4300
- Diámetro interior de la TP [pg]: 3.92
- Diámetro exterior de la TP [pg]: 4.5
- Cambio de presión dentro de la TP [kg/cm²]: 597
- Cambio de presión fuera de la TP [kg/cm²]: 0
- Cambio de densidad dentro de la TP [gr/cc]: 0
- Cambio de densidad fuera de la TP [gr/cc]: 0
- Caída de presión debido al flujo [kg/cm²]: 0
- Relación de poisson del material: 0.3
- Módulo de Young [psi]: 3×10^7

Resultados:

- Cambio de longitud por baloneo [pie]: -7.5349

A "Calcular" button is located at the bottom right of the results section.

IMAGEN IV. 35.- Pantalla de ingreso de datos y de resultado para la operación de baloneo propuesta en el ejercicio anterior

Para la comparación de resultados en este ejemplo, se recurrió al convertidor de unidades de la sección auxiliar (IMAGEN VI.36)

The screenshot shows a utility window titled "Dimensiones y unidades". It is used for unit conversions and displays the following information:

Cantidad-Dimensiones:

- longitud (selected)
- Dimensional systems: **M L T** and **F L T**

Conversión de unidades:

- Magnitud: Longitud
- Convertir: 7.5349
- de: pies
- a: metros
- Result: = 2.29663752

IMAGEN IV. 36.- Uso del auxiliar "Dimensiones y unidades"

IV.III.3 Movimientos en el aparejo: pandeo

En las imágenes IV.37 y IV.38 se propone un ejercicio para la operación de pandeo. En el ejercicio se observa que los datos requeridos por el programa son en su mayoría dados por un estado mecánico, esto produce una reducción de los tiempos de cálculo comparado a realizar la metodología necesaria para determinar si la tubería sufre de pandeo (Buckling) sin éste software.

La comparación de esta operación se muestra en la **IMAGEN VI.39** que se encuentra en las siguientes páginas.

Considerar un aparejo de producción de 4¹/₂" N-80 13.5 [lb/pie], d=3.92", un empacador 415-01 80-32 para T.R. de 7⁵/₈" 39[lb/pie], d= 6.625", y el Baker anclado a 4300[m]. Determinar el acortamiento o elongación debido al efecto de Buckling, cuando se efectúa una prueba de admisión re presionando la T.P. en superficie con 8500[lb/pg²].

Datos:

- Densidad del fluido dentro de la tubería de producción 1 [gr/cm³]
- Densidad del fluido por el espacio anular 1 [gr/cm³]

Solución:

Para determinar si existe efecto de Buckling debemos calcular la presión interna y la presión externa a la altura del empacador.

Calculando la presión interna a la altura del empacador: $P_i = P_{superficie} + P_{hidrostatica}$

$$P_{hidrostatica} = \frac{1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] \times 4300 [m]}{10} \times 14.22 = 6,114.6 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \quad P_i = 8,500 + 6,114 = 14,614 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

Calculando la fuerza ficticia [lb].

$$F = A_p (P_i - P_o) \quad \text{donde} \quad A_p = \frac{\pi}{4} (d_{emp})^2 = \frac{\pi}{4} (3.2)^2 = 8.04 [pg^2]$$

$$F = 8.04 [pg^2] * \left(14,614 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] - 6,114 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \right) = 68,361.05 [lb]$$

Calculando el punto neutro para definir la ecuación a utilizar:

$$n = \frac{F}{w} = \frac{68,361.05 [lb]}{11.843 \left[\frac{lb}{pie} \right]} = 5,772.27 [pie] = 1,759.4 [m]$$

Donde w se obtiene de la siguiente manera:

$$w = w_{Tp} + w_i - w_o$$

IMAGEN IV. 37.- Ejercicio extraído de la literatura consultada³² correspondiente al efecto de pandeo

³² Cuaderno de ejercicios de Terminación de Pozos, UNAM 2005.

$$w_o = 0.43 * 1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 15.9 [pg^2] = 6.837 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad w_i = 0.43 * 1 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 12.06 [pg^2] = 5.18 \left[\frac{lb}{pie} \right]$$

$$w_{TP} = 13.5 \left[\frac{lb}{pie} \right] \quad \therefore w = 13.5 + 5.18 - 6.837 = 11.843 \left[\frac{lb}{pie} \right]$$

Cuando n es mayor que la longitud total de la tubería se considera que toda la tubería esta bucleada y se utiliza la siguiente ecuación para calcular la variación de la longitud.

$$\Delta L = - \frac{r^2 F^2}{8 \epsilon I w}$$

Calculando el claro radial [pg²]: $r = \frac{D_{int TP} - d_{Ext TP}}{2} = \frac{6.625 - 4.5}{2} = 1.06 [pg]$

Calculando el momento inercial: $I = \left(\frac{\pi}{64} \right) (D_{TP}^4 - d_{TP}^4) = \left(\frac{\pi}{64} \right) (4.5^4 - 3.92^4) = 8.53 [pg^4]$

$$\Delta L = - \frac{(1.06 [pg])^2 * (68,361.05 [lb])^2}{8 * \left(3 \times 10^7 \left[\frac{lb}{pg^2} \right] \right) * (8.53 [pg^4]) * \left(11.843 \left[\frac{lb}{pie} \right] \right)} = -0.216 [pies]$$

El efecto de Buckling provoca un acortamiento del aparejo de 0.216 [pies] o 0.0658 [m].

Calculando el número de espirales:

$$pitch = \pi \sqrt{\frac{8 \epsilon I}{F}} = \pi \sqrt{\frac{8 * (3 \times 10^7) * 8.53}{68,340}} = 543.74 [pg] = 45.31 [pies]$$

$$N_{esp} = \frac{n}{pitch} = \frac{5772.27 [pies]}{45.31 [pies]} = 127.39 [espirales]$$

IMAGEN IV. 38.- Continuación del ejercicio de pandeo

The screenshot shows a software window titled 'Buckling' with two main sections: 'Datos' (Data) and 'Resultados' (Results).

Datos (Input Data):

4300	Longitud de la TP [m]	1	Densidad del fluido en el interior de la TP [gr/cc]
3.92	Diámetro interior de la TP [pg]	1	Densidad del fluido en el exterior de la TP [gr/cc]
4.5	Diámetro exterior de la TP [pg]	13.5	Peso de la tubería por unidad de longitud [lb/pie]
3.2	Diámetro interior del empacador [pg]	597	Presión en superficie [kg/cm ²]
6.625	Diámetro interior de la TR [pg]	3 x 10 ⁷	Módulo de Young [psi]
7.625	Diámetro exterior de la TR [pg]		

Resultados (Calculation Results):

Tubería parcialmente alabeada		1.0625	Claro radial [pg ²]
5.1896	Peso del fluido en el interior de la TP [lb/pie]	8.5381	Momento de inercia
6.8389	Peso del fluido en el exterior de la TP [lb/pie]	68275.483	Fuerza de compresión [lb]
11.8507	Peso total [lb/pie]	1756.4949	Punto neutro [m]
14603.94	Presión en el interior de la TP [psi]	544.2578	Número Pitch [pg]
6114.6	Presión en el exterior de la TP [psi]	127.0274	Número de espirales
-0.2167	Cambio de longitud por buckling [pie]		

A 'Calcular' (Calculate) button is located at the bottom right of the results section.

IMAGEN IV. 39.- Pantalla de ingreso de datos y de resultados para el ejercicio de pandeo propuesto

IV.III.4 Colapso

En las imágenes IV.40 y IV.41 se muestra el ejercicio propuesto para esta sección y la ejecución del software para resolverlo.

Determinar la resistencia a la presión de colapso de la siguiente tubería.

Diámetro ext. [pg]	Grado	Esfuerzo de cedencia (Yx) 1000 [lb/pg ²]	Peso [lb/pie]	Diámetro int. [pg]
7	N	80	23	6.276

Calculando el espesor [pg]: $t = \frac{D-d}{2} = \frac{7-6.276}{2} = 0.362[pg]$

Sustituyendo tenemos: $r = \left(\frac{D}{t}\right) = \left(\frac{7}{0.362}\right) = 19.33$

La fórmula para calcular la presión de colapso plástico mínima es:

$$P_{C_{plástico}} = Y_x \left[\frac{A}{\left(\frac{D}{t}\right)} - B \right] - C \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

$$A = 2.8762 + 0.10679 \times 10^{-5}Y_x + 0.21301 \times 10^{-10}Y_x^2 - 0.53132 \times 10^{-16}Y_x^3 = 3.07$$

$$B = 0.026233 + 0.50609 \times 10^{-6}Y_x = 0.0667$$

$$C = -465.93 + 0.038867Y_x - 0.10483 \times 10^{-7}Y_x^2 + 0.36989 \times 10^{-13}Y_x^3 = 1,955.27$$

$$P_c = 80000 \left[\frac{3.07}{19.33} - 0.0667 \right] - 1,955.27 = 5,414.36 \left[\frac{lb}{pg^2} \right]$$

La presión de colapso mínima para que una tubería de grado N-80 7" falle es de 5,414.36

IMAGEN IV. 40.- Ejercicio extraído de la literatura consultada³³ correspondiente a la presión de colapso

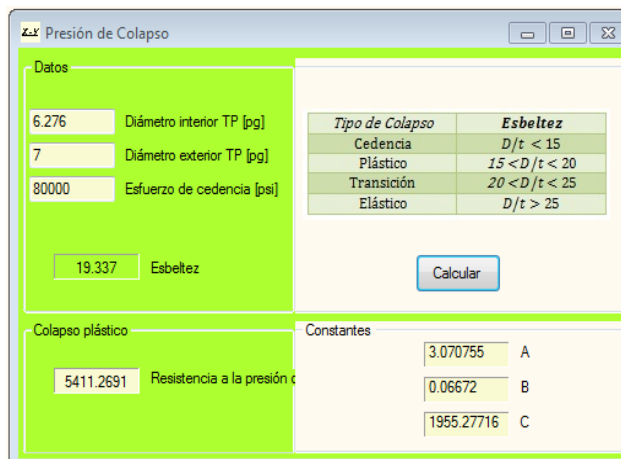


IMAGEN IV. 41. Pantalla de ingreso de datos y resultado para el ejercicio de presión de colapso

³³ Cuaderno de ejercicios de Terminación de Pozos, UNAM 2005.

IV.III.5 Aislamiento de intervalos (sistema del tapón)

Enseguida se muestra el ejercicio propuesto para determinar el sistema del tapón utilizado en un aislamiento de intervalos (**IMAGEN IV.42**), como en los ejemplos anteriores, se presenta al final la ejecución del software (**IMAGEN IV.43**) para poder realizar la comparación de resultados obtenidos en este con los mostrados en el ejercicio original

Colocar un tapón de cemento balanceado de 100 m balanceado para aislar un intervalo probado, el tapón se colocará de 5000 a 4900 m dentro de una tubería de revestimiento de 5" de 18 lb/pie

Datos:

Capacidades de las tuberías		
T. Revestimiento:	18.0 lb/pie	9.31 lt/m
T. Producción:	9.2 lb/pie	4.5 lt/m
Esp. anular	Entre 5" y 3.5":	3.1 lt/m

Información de los fluidos		
Lodo	Polimérico	1.35 gr/cc
Lechada	Convencional	1.95 gr/cc
Rendimiento	42.80 lt/saco	
B. Lavador	2 m3	
B. espaciador	2 m3	1.70 gr/cc

1.- Cálculo del volumen de la lechada

$$V_{lch} = h_{cto} * C_{TR} = 100 \text{ m} * 9.31 \text{ lt/m} = 931 \text{ lt}$$

2.- Cálculo de la cantidad del cemento

$$N_{sc} = \frac{V_{lch}}{R_{nto}} = 21.75 \text{ sacos}$$

3.- Cálculo de la altura de los fluidos para balancear el tapón durante la colocación

Altura de la lechada:

$$h_{cto} = \frac{V_{lch}}{C_{TR-TP} + c_{TP}} = 122 \text{ m}$$

Altura del bache separador:

$$h_{bs} = V_{bs} / (C_{TR-TP} + C_{TP}) = 263.1 \text{ m}$$

Altura del bache lavador:

$$h_{bl} = V_{bl} / (C_{TR-TP} + C_{TP}) = 263.1 \text{ m}$$

Cálculo de los volúmenes de los fluidos a bombear por delante y por detrás del cemento para balancear el tapón.

Volumen de la lechada dentro de la tubería:

$$V_{lch-TP} = h_{cto} * C_{TP} = 549.0 \text{ lt}$$

Volumen de la lechada en espacio anular:

$$V_{lch-ea} = h_{cto} * C_{TR-TP} = 378.5 \text{ lt}$$

Bache lavador en el espacio anular

$$V_{bl} = h_{bl} * C_{TR-TP} = 815.7 \text{ lt}$$

Bache lavador dentro de la tubería

$$V_{bl} = h_{bl} * C_{TP} = 1184.2 \text{ lt}$$

Bache separador en el espacio anular

$$V_{bs} = h_{bs} * C_{TR-TP} = 815.7 \text{ lt}$$

Bache separador dentro de la tubería

$$V_{bs} = h_{bs} * C_{TP} = 1184.2 \text{ lt}$$

Cálculo del volumen de desplazamiento para balancear el tapón:

$$V_d = C_{fl} * C_{TP}$$

$$C_{fl} = b_t - (h_{cto} + h_{bl} + h_{bs})$$

$$C_{fl} = 5000 \text{ m} - 684.3 \text{ m} = 4351.6 \text{ m}$$

$$V_d = 4351.6 \text{ m} * 3.1 \text{ lt/m} = 13490.2 \text{ lt}$$

IMAGEN IV. 42.- Ejercicio extraído de la literatura consultada³⁴ para la operación de aislamiento de intervalos

³⁴ Guía de diseño para aislar intervalos. Gerencia de Ingeniería, PEMEX.

Determinación del tapon de cemento balanceado

Datos

Información de tuberías

Agujero entubado Agujero descubierto

Diámetros de la sarta de trabajo

2.992 Diámetro interior [pg]
3.5 Diámetro exterior [pg]

Diámetros de la TR

4.276 Diámetro interior [pg]
5 Diámetro exterior [pg]

Capacidades anulares

9.2646 [lt/m] TR o agujero descubierto
4.536 [lt/m] Sarta de trabajo
3.0575 [lt/m] Espacio anular

Información de fluidos

Longitud del intervalo a taponar
100 [m]

Base del tapon
5000 [m]

Cima de los fluidos
4351.2267 [m]

Rendimiento de la lechada de cemento
42.8 [lt/saco]

Bache lavador Bache espaciador
2 [m³] 2 [m³]

Resultados

Lechada de cemento

926.46 Volumen de la lechada de cemento [lt] 122.007 Altura de la lechada de cemento [m]
553.4237 Volumen de la lechada dentro de la sarta [lt] 21.6463 Cantidad de cemento a utilizar [# sacos]
373.0363 Volumen de la lechada en el espacio anular [lt]

Bache lavador

263.3832 Altura del bache lavador [m] 1194.706 Bache lavador dentro de la tubería (detrás) [lt]
805.294 Bache lavador en el espacio anular (delante) [lt]

Bache separador

263.3832 Altura del bache separador [m] 1194.706 Bache separador dentro de la tubería (detrás) [lt]
805.294 Bache separador en el espacio anular (delante) [lt]

19737.164 Volumen de desplazamiento para balancear el tapón [lt] **Calcular**

IMAGEN IV. 43.- Pantalla de ingreso de datos y resultados para la solución del ejercicio propuesto correspondiente a la operación de aislamiento de intervalos probados.



Capítulo V. Discusión y conclusiones

El software se desarrolló con el fin de brindar resultados rápidos y confiables para la comunidad universitaria, éste fue creado para que tanto alumnos como docentes lo utilicen para el desarrollo de sus actividades académicas. El programa de_Terminación.PPV también fue pensado para que se pueda utilizar en el campo laboral, porque cuenta con herramientas de cálculo muy útiles, como son: el convertidor de unidades, selección de herramientas de molienda y caracterización reológica de fluidos.

De este trabajo podemos concluir que el tiempo de cálculo es acortado significativamente con el uso del software propuesto, en comparación con la forma tradicional de hacer los cálculos (mediante hojas de cálculo, de Microsoft Excel principalmente); esto puede apreciarse en el Capítulo IV donde se aprecian las comparaciones entre los ejercicios consultados en la literatura revisada y la ejecución de de_Terminación.PPV.

Las bases teóricas de cálculos matemáticos realizados en “de_Terminación.PPV se encuentran apegados a las guías de diseño actuales de PEMEX, potenciando una importante ventaja del desarrollo de software: el software desarrollado está adaptado a las necesidades del diseñador y no a la inversa como sucede generalmente.

Una ventaja más de haber trabajado con las guías de diseño desarrolladas por la Gerencia de Ingeniería de PEMEX se aprecia en los resultados obtenidos; es decir, de_Terminación.PPV garantiza la fiabilidad de los resultados obtenidos, pues concuerdan con los resultados presentados en las guías de diseño y con los presentados en ejercicios tomados de la bibliografía consultada.

de_Terminación.PPV cuenta con la posibilidad de calcular los parámetros básicos de siete de las operaciones más comunes en la terminación de pozos verticales:

- ⊕ Aparejos de producción
- ⊕ Presión sobre los empacadores
- ⊕ Disparos
- ⊕ Lavado de pozo
- ⊕ Estimulación
- ⊕ Aislamiento de intervalos probados y
- ⊕ Molienda,

haciéndolo un programa eficiente y útil tanto en el campo académico como en el profesional.

Debido a la gran complejidad de estas siete operaciones, bien podría realizarse una tesis de cada una de ellas, por lo que en este trabajo sólo se tocaron los factores más importantes y comunes a las mismas.

El tiempo de cálculo para las operaciones es rápido (comparado con tener que ingresar los datos en hojas de cálculo y calculadoras carentes de un formato de ingreso de datos); esto se debe a varias cuestiones:

- ⊕ La familiaridad del software (ambiente Windows) hace que el usuario reconozca de inmediato las funciones y comandos.
- ⊕ Los datos requeridos para la ejecución de la mayoría de las subrutinas son fáciles de obtener.
- ⊕ El ingreso de datos es sencillo
- ⊕ Las funciones de “guardar” y “abrir” ahorran tiempo de ingreso de datos si un proyecto existente va a ser modificado.
- ⊕ El tiempo de cómputo es mínimo.

de_Terminación.PPV permite al usuario desarrollar diversos escenarios de las operaciones enlistadas, bajo distintas condiciones de diseño, para poder seleccionar el mejor.

Por otro lado, se intentó comparar el software con un programa similar de terminación, pero fue imposible debido a que el único software que encontramos estaba en manos de una compañía privada, sin mencionar que no tenía la misma metodología de cálculo.

Cabe mencionar que por falta de nuestra experiencia en el campo laboral, no se toman varios parámetros y consideraciones que podrían mejorar el software, por lo que este proyecto tiene posibilidades de incrementar su contenido y por la tanto su eficiencia.

Finalmente, se espera que este trabajo estimule en el lector el gusto por aplicar los conocimientos adquiridos durante su experiencia académica como profesional, en la elaboración de sus propias herramientas.

Apéndice A. Caracterización reológica de fluidos

La caracterización de los fluidos utilizados durante algún proceso de perforación, terminación o reparación, es fundamental, pues con dicha caracterización se podrá conocer el modelo matemático emplear en el cálculo de la hidráulica.

E.C. Bingham en 1929 introdujo el concepto “reología” para definir al estudio de la deformación y flujo de la materia. La reología es definida por la Real Academia Española como “el estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos”. Estas definiciones cubren todo el campo de la dinámica del medio continuo, sin embargo, por convención, se ha decidido limitarla a aquel campo no cubierto por las teorías lineales de elasticidad y viscosidad, por lo tanto, se excluyen de la reología los sólidos Hookeanos y fluidos newtonianos.

Es conveniente pensar en la reología como la descripción de un conjunto de comportamientos más que la descripción de un conjunto de materiales

La clasificación del comportamiento reológico para líquidos está basado en su comportamiento al flujo, generalmente son fluidos newtonianos y no newtonianos.

Fluidos Newtonianos.- Los fluidos newtonianos son aquellos cuya relación esfuerzo de corte vs gradiente de deformación es lineal y su viscosidad es una constante. La viscosidad de un fluido newtoniano está determinada únicamente por la temperatura y composición.

$$\tau = \mu * \gamma$$

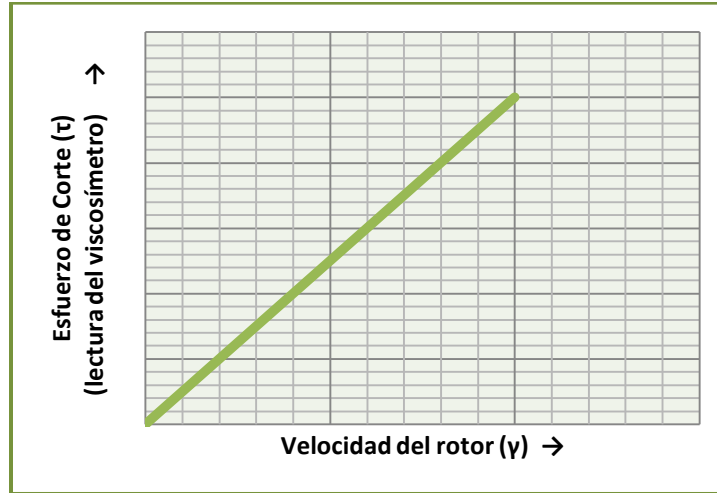
$$\tau = \text{Esfuerzo de corte} \frac{\text{lb}f}{100 \text{ pie}^2}$$

$$\mu = \text{Viscosidad newtoniana} [cp]$$

$$\gamma = \text{Velocidad de corte ó rotor} (seg^{-1})$$

La gráfica 1.a representa el modelo del fluido Newtoniano, el cual es una línea recta que parte del origen cuando se grafica en coordenadas rectangulares, el esfuerzo de corte (lectura del viscosímetro Fann-35) vs la velocidad de corte.

Ejemplos de fluidos Newtonianos son el agua dulce, el agua salada, el diesel, aceites naturales y sintéticos.



Gráfica 1a.- Modelo Newtoniano en coordenadas rectangulares

Fluidos No-Newtonianos.- Los fluidos no newtonianos son aquellos cuya relación esfuerzo de corte y gradiente de deformación no es lineal. Aun que dentro de este tipo de fluidos podemos encontrar varias clasificaciones, para efectos de este documento se describirán únicamente a los fluidos No Newtonianos conocidos como modelo “Plástico de Bingham” y el modelo de “Ley de potencias”, los cuales cubren prácticamente todo el rango de fluidos utilizados en la reparación de pozos.

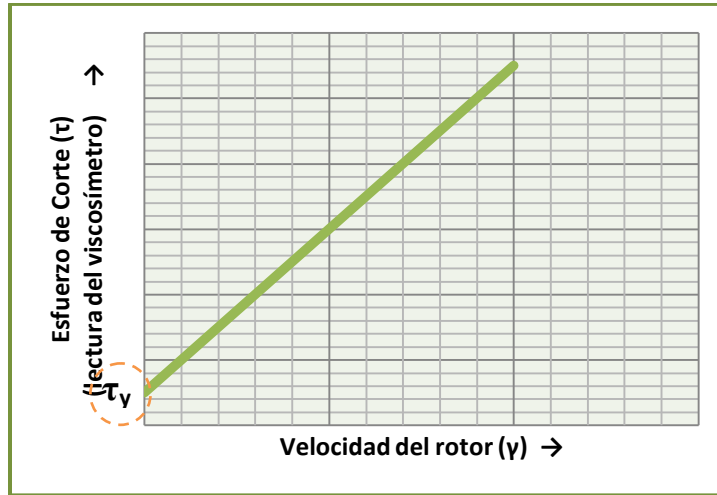
Modelo Plástico de Bingham:

Los fluidos plásticos de Bingham son aquellos en que la relación esfuerzo de corte y gradiente de deformación es lineal, pero para esfuerzos de corte pequeños se comportan como sólidos, presentando características elásticas y únicamente por el incremento del esfuerzo de corte hasta un cierto valor el sistema fluye, denominándose fluidos con esfuerzo de corte inicial. En otras palabras, un fluido plástico de Bingham no fluirá hasta que el esfuerzo de corte aplicado (τ) exceda un cierto valor mínimo conocido como punto cedente (τ_p). Este modelo se representa mediante la ecuación:

$$\tau = \tau_p + \mu_p * \gamma$$

$$\tau_p = \text{Punto de cedencia} \frac{lbf}{100 pie^2}$$

$$\mu_p = \text{Viscosidad plástica [cp]}$$



Gráfica 2a.- Modelo Plástico de Bingham en coordenadas rectangulares

La gráfica 2.a representa el modelo de un fluido no Newtoniano: Plástico de Bingham, el cual es una línea recta que no parte del origen cuando se grafica en coordenadas rectangulares (como se aprecia en la ventana circular), el esfuerzo de corte (lectura le viscosímetro Fann 35) vs la velocidad de corte.

Se puede observar que tiene que ser aplicada una fuerza mínima para iniciar el movimiento, después el comportamiento entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte es lineal.

Modelo de Ley de Potencias.

Este modelo supone que no existe una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte. El modelo de ley de potencias se expresa mediante la siguiente expresión:

$$\tau = k * \gamma^n$$

k = índice de consistencia [cp (equivalente)]

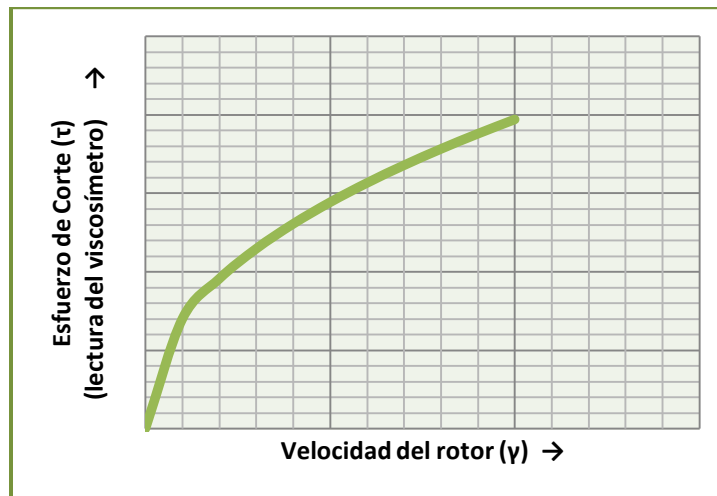
n = índice de comportamiento [adimensional]

El índice de consistencia indica el grado de “bombeabilidad” o espesamiento del fluido; el índice de comportamiento, el cuál es considerado como una medida del grado de desviación de un fluido con comportamiento Newtoniano.

El modelo de ley de potencias puede usarse para representar un fluido pseudo plástico ($n < 1$), un fluido newtoniano ($n = 1$) o un fluido dilatante ($n > 1$).

La gráfica 3.a representa el modelo de un fluido no Newtoniano: Ley de potencias, el cual es una línea curva que parte del origen cuando se grafica en coordenadas rectangulares el esfuerzo de corte vs la velocidad de corte.

Se puede observar el comportamiento no lineal



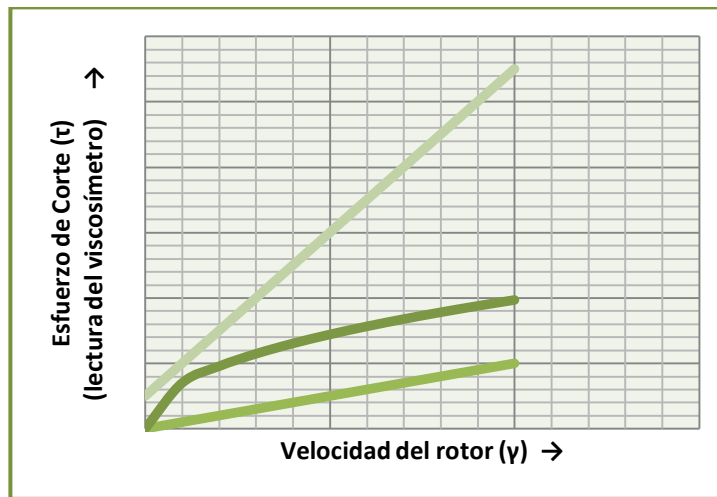
Gráfica 3a.- Modelo de Ley de potencias en coordenadas rectangulares

Procedimiento para determinar las propiedades de los fluidos:

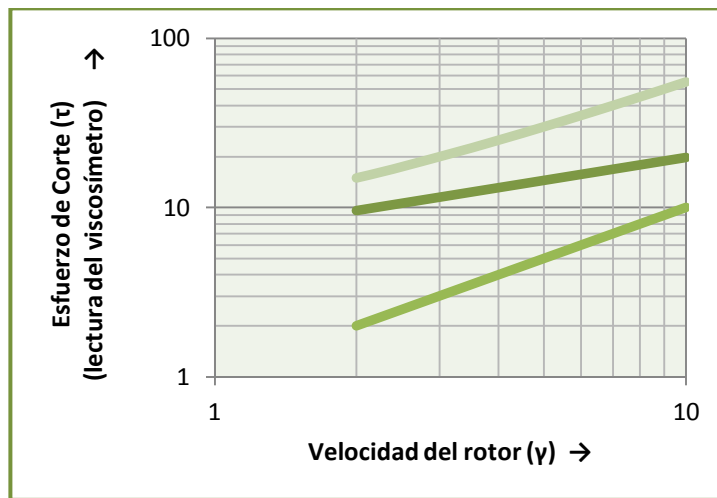
Para caracterizar los modelos reológicos Newtonianos y no Newtonianos se registran los datos obtenidos del viscosímetro Fann 35 a diferentes revoluciones por minuto (rpm).

El viscosímetro suele tener las velocidades de θ_3 , θ_6 , θ_{100} , θ_{200} , θ_{300} y θ_{600} pero las especificaciones según la API ya no utilizan las lecturas a 3, 6 y 600 rpm las velocidades de rotación de 100, 200 y 300 se operan por 20 segundos cada una.

Se grafican las diferentes rpm (eje X) contra los datos obtenidos de las lecturas del viscosímetro Fann (eje Y) en coordenadas rectangulares y logarítmicas. Después se compara la curva obtenida con las curvas que representan a cada uno de los tres modelos y se elige el modelo al que más se ajuste la curva obtenida.



Gráfica 4a.- Modelos en coordenadas rectangulares



Gráfica 5a.- Modelos en coordenadas log-log

Se calculan las propiedades del fluido en función de su tipo (Newtoniano, Bingham, o Ley de potencias).

Modelo	Parámetros a calcular	Fórmulas
Newtoniano	Viscosidad (μ)	$\mu = \frac{300 \times \theta_N}{N}$
Plástico de Bingham	Viscosidad plástica (μ_p)	$\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300}$
	Viscosidad aparente (μ_a)	$\mu_a = \mu_p + 5 * \frac{\tau_p * d_s}{v_a}$
	Punto de cedencia (τ_p)	$\tau_p = \theta_{300} - \mu_p$
Ley de Potencias	Índice de comportamiento (n)	$n = 3.32 * \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}}$
	Índice de consistencia (k)	$k = \frac{510 * \theta_{300}}{511^n}$
	Viscosidad aparente (μ_a)	$\mu_a = \frac{k}{144} \left[\frac{(d_2 - d_1)}{v_a} \right]^{1-n} * \left[\frac{2 + 1/n}{0.0208} \right]^n$
	Velocidad media (v_a)	$v_a = \frac{q}{2.448 * (d_2^2 - d_1^2)}$

Nota para el modelo de Ley de potencias: La viscosidad aparente es para el espacio anular. En el caso de lodos bentonita-agua, se recomienda que la viscosidad plástica sea utilizada como la viscosidad aparente. Los términos “q” y “d” se mencionan a continuación:

$$q = \text{Gasto supuesto del fluido} \left[\frac{\text{gal}}{\text{min}} \right]$$

$$d_1 = \text{Diámetro exterior de la TP}_{\text{perforación}} \text{ [pg]}$$

$$d_2 = \text{Diámetro interior de la TR [pg]}$$

$$d_s = \text{Diámetro equivalente del recorte [pg] agregar a la tesis}$$

Apéndice B. Selección de herramientas de molienda

Definiciones:

Molino.- Es una herramienta constituida formada por un cuerpo sólido, aletas estabilizadoras, orificios, vías de circulación, conexión y es revestido con tungsteno molido o con insertos de carburo de tungsteno, en forma de pastillas cilíndricas, angulares varias formas. Los hay de tipo: Plano, cóncavo, de aletas, piloto, cónico, sandia, entre otros y esta diseñados para moler metal suelto (pedazos, conos, etc.) así como tapones de cemento.

Tungsteno.-Es un compuesto químico inorgánico que contiene partes iguales de átomos de carbón y tungsteno, es tres veces más duro que el acero, también es más denso, pero presenta menos resistencia a los impactos; para mejorar su resistencia al impacto se le adiciona cobalto

Molienda.- Es la acción de reducir materiales en pequeñas partes utilizando metales de alta dureza. Los materiales seleccionados deberán tener la capacidad de triturar los materiales con los que se fabrican las tuberías, los accesorios de pozos y el cemento.

Parámetros a considerar:

La geometría del pozo.- Distribución de TR's, desviación del pozo, característica del accesorio o cuerpo a moler.

Características del fluido.- Propiedades reológicas en general, densidad, viscosidad, punto de cedencia.

Velocidad anular.- La velocidad anular mínima recomendada es de 120 [pie] / [minuto].

Patrón de flujo.- Para u mejor transporte de los recortes se deberá alcanzar flujo turbulento.

Velocidad de transporte.- Es la velocidad con a que los recortes son transportados por el espacio anular hasta la superficie.

Velocidad de deslizamiento.- Es la velocidad con la que la partícula desciende en el seno del fluido y está en función del diámetro equivalente y peso del recorte.

Tiempo de atraso.- Es el tiempo que tarda en llegar el lodo del fondo a la superficie.

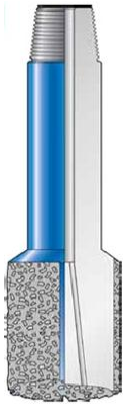
En las siguientes páginas se muestran algunos de los molinos (junto con sus principales características) más utilizados en la industria, al final se presenta una tabla de recomendaciones de molinos según el elemento a moler o la finalidad de la molienda.

Molinos utilizados comúnmente en la industria.



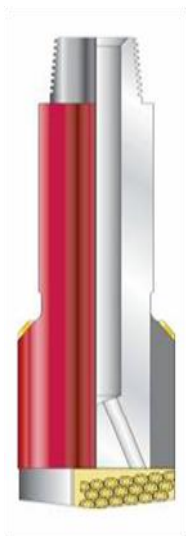
Bladed junk mil.

Estos molinos cuentan con orificios grandes internos y canales grandes externos para enfriar el área de ataque y facilitar el acarreo de los residuos, sus aletas se revisten con pastillas, para moler peces o chatarra fija o con revestimiento de tungsteno convencional para chatarra ó peces sueltos.



Buster mill

Molino cóncavo revestido con Superloy, para moler conos de barrenas u otros objetos, donde se requiere mantener el pez centrado, para que la molienda sea efectiva.



Clear Cut MP Mill

Diseñado para moler tapones metálicos a un alto ritmo de penetración, cuando se utiliza con motor de fondo. Está hecho de Custom Cut para minimizar el tiempo de molienda, al producir piezas pequeñas y uniformes de residuos que pueden ser removidos con facilidad.



Custom Cut Pilot Mill

Se utiliza para moler una variedad de tubulares, consiste en una punta guía revestida al drift del tubular y una sección de mayor diámetro de al menos $\frac{1}{4}$ " más que el cople del mismo tubular. Se puede revestir con carburo de tungsteno convencional o con insertos tipo pastillas según sea su aplicación. Se utiliza para moler, tubing, casing, liner, colgadores de liners, tubería de perforación, tuberías lavadoras.

Su revestimiento de pastillas, produce residuos metálicos pequeños de fácil transporte a superficie.



Econo Mill

Muy eficientes en la molienda de cemento ó tapones molibles, ofrecen un área de flujo amplio para el desalojo de los recortes, la aleta principal atraviesa el centro del molino para evitar partes muertas sin moler.



Junk mill tipo P

Se utiliza para moler chatarra y residuos, también por su durabilidad se utiliza en moliendas de tuberías cementadas. El diseño de una "V" grande en su área de ataque maximiza la circulación para mejorar el enfriamiento y facilitar la remoción de los recortes. Se puede revestir con tungsteno convencional ó con pastillas.



Metal Muncher Junk Mill

Está diseñado para moler objetos fijos, utiliza la tecnología Metal Muncher como la estructura de corte, soportado por carburo de tungsteno Superloy, de tal manera que si se dañan los insertos de Metal Muncher, el molino se desempeñará como un molino convencional Junk Mill, hasta que otra columna de pastillas Metal Muncher aparezca. Se tiene el antecedente de que esta herramienta se ha desempeñado adecuadamente en la molienda de tuberías y drill collars cementados.



Metal Muncher Packer Mill

Diseñado para moler empacadores en el menor tiempo posible sin crear recortes grandes, utiliza la tecnología Metal Muncher como la principal estructura de corte y soportado con revestimiento Superloy, de tal manera que, si los insertos Metal Muncher se dañan, actuará como un molino estándar hasta que el desgaste del mismo llegue a otra cama de pastillas. Con este tipo de molinos se pueden moler empacadores hechos de aleación al alto cromo, diseñados para ambientes hostiles.



Molino Calibrador

Se corren antes de bajar una cuchara o cualquier herramienta que requiera calibración previa. Con su corrida se limpia cualquier restricción, asegurando el paso de las herramientas. Su puerto de circulación es concéntrico.



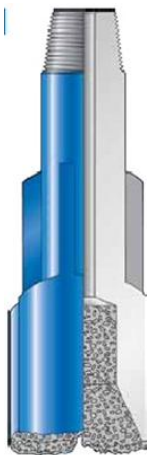
Molino de Aletas Junk Mill Superloy/Opticut

Diseñado para moler materiales abrasivos, ya que está revestido con Superloy/Opti-Cut, ideal para utilizarse con motor de fondo, ya que crea recortes finos y no requiere de mucho peso para desempeñarse satisfactoriamente



Molino Plano

Se utiliza para moliendas en general y además, puede utilizarse con movimientos reciprocantes contra la chatarra para romperla en pequeñas piezas y compactarlas para eficientar la molienda



Piraña

Es revestido con Superloy, utilizado para moler tuberías cementadas o en situaciones donde hay mucha chatarra. Este molino es especialmente diseñado con una "V" profunda en su área de ataque, para obtener una mejor circulación del fluido, además, contiene una mayor cantidad de tungsteno, para una mayor vida útil.



Skirted Mill

Los Junk Mills pueden solicitarse con una camisa guía a fin de alinear el pescado y moler eficientemente sobre el pez. Es útil cuando la boca del pez esta floreada o deforme y al centrar el pez, evita dañar el casing.



Taper Mill

Está diseñado para entrar en áreas restringidas en pozos entubados, agujero descubierto, tubing, etc. para remover restricciones u obstrucciones al paso. Su diseño varía de acuerdo al propósito. Cuando se utiliza dentro del casing, se reviste con Superloy fuerte desde la punta hasta el hombro, a un OD igual al drift del casing y más arriba se revestirá con Superloy más suave para evitar un daño innecesario al casing. El Taper Mill actúa como un estabilizador reduciendo la vibración.



Two pod mill.

Diseñado para moler tubulares que están cementados, este molino supera el desempeño y vida útil de los molinos estándar, lo cual reduce considerablemente los viajes por desgaste de molino. Tiene como característica dos aletas robustamente revestidas



Watermelon Mills

Se diseñan para varias funciones, una de ellas es para agrandar una ventana, además de utilizarse para remover objetos pegados a la pared del casing y otras restricciones, así como rimar para suavizar el paso a través del mismo. Estos molinos se fabrican con conexiones estándar para Tuberías de Perforación y Drill Collars para evitar el uso de combinaciones.

Tabla de recomendación de molino según operación o finalidad.

Accesorio a moler u objetivo de molienda	Molino recomendado
Chatarra	Piraña
	Buster mill
	Bladed junk mill
	Junk mill tipo P
	Molino plano
Tapones metálicos	Clear cut MP mill
	Econo mill
	Metal muncher
Cemento	Econo mill
	Junk mill tipo P
	Molino plano
Peces Fijos	Molino plano
	Junk mill tipo P
	Bladed junk mill
	metal muncher junk mill
Tubulares cementados	Piraña
	Two pod mill
Empacadores alto cromo / materiales abrasivos	Metal muncher packer mill
	Junk mill superloy/opticut
Obstrucciones al paso, restricciones	Taper mill
	Calibrador
Centrado del pez tubular	Skirted mill
	Custom cut mill
	Buster mill
Apertura de ventana	Window mill
Afinar ventanas	Window mill nariz redonda
	Water melon mill
Remover obstrucciones Rimar Casing Suavizar pata de perro	Water melon mill

Apéndice C. Dimensiones y unidades

Tabla de dimensiones para distintos parámetros en los sistemas Masa-Longitud-Tiempo y Fuerza-Longitud-Tiempo.

Parámetro	M	L	T	F	L	T
Aceleración		L	T ²		L	T ²
Aceleración de la gravedad		L	T ²		L	T ²
Área		L ²			L ²	
Carga producida por una bomba		L			L	
Coefficiente de rugosidad	-	-	-	-	-	-
Compresibilidad	M ⁻¹	L	T ²	F ⁻¹	L ²	
Constante de los gases	-	-	-	-	-	-
Densidad	M	L ⁻³		F	L ⁻⁴	T ²
Densidad relativa	-	-	-	-	-	-
Diámetro		L			L	
Diferencia manométrica		L			L	
Distancia		L			L	
Energía	M	L ²	T ²	F	L	
Esfuerzo cortante	M	L ⁻¹	T ²	F	L ⁻²	
Espesor		L			L	
Factor de compresibilidad	-	-	-	-	-	-
Factor de fricción	-	-	-	-	-	-
Fuerza	M	L	T ²	F		
Fuerza de gravedad	M	L	T ²	F		
Fuerza de presión	M	L	T ²	F		
Fuerza de tensión superficial	M	L	T ²	F		
Fuerza de viscosidad	M	L	T ²	F		
Gasto en masa	M	L ⁰	T ⁻¹	F	L ⁻¹	T
Gasto en peso	M	L ²	T	F	L ⁻³	T ²
Gasto volumétrico		L ³	T ⁻¹		L ³	T ⁻¹
Litros		L ³			L ³	
Longitud		L			L	
Masa	M			M	L ⁻¹	T ²
Momento de inercia		L ⁴			L ⁴	
Número de moles	-	-	-	-	-	-
Número de Reynolds	-	-	-	-	-	-
Pérdida de carga por fricción	-	-	-	-	-	-
Perímetro mojado		L			L	

Apéndice C.-Dimensiones y unidades

Permeabilidad		L^2				L^2	
Peso	M	L	T^{-2}		F		
Peso específico	M	L^{-2}	T^{-2}		F	L^{-3}	
Peso molecular	-	-	-		-	-	-
Potencia	M	L^2	T^{-3}		F	L	T^{-1}
Presión	M	L^{-1}	T^{-2}		F	L^{-2}	
Presión atmosférica	M	L^{-1}	T^{-2}		F	L^{-2}	
Presión de vapor	M	L^{-1}	T^{-2}		F	L^{-2}	
Presión estática	M	L^{-1}	T^{-2}		F	L^{-2}	
Punto de cedencia	M	L^{-1}	T^{-2}		F	L^2	
Radio		L				L	
Radio de una tubería		L				L	
Radio hidráulico		L				L	
Relación de calores específicos	M	L^{-1}	T^{-2}		F	L^2	
Resultante de fuerzas	M	L	T^{-2}		F		
Temperatura absoluta	-	-	-		-	-	-
Tensión superficial	M		T^{-2}		F	L^{-1}	
Tiempo			T				T
Trabajo de flecha (par)			T				T
Trabajo por unidad de tiempo	M	L^2	T^{-3}		F	L	T^{-1}
Velocidad		L	T^{-1}			L	T^{-1}
Velocidad angular	-	-	-		-	-	-
Velocidad del sonido		L	T^{-1}			L	T^{-1}
Viscosidad absoluta	M	L^{-1}	T^{-1}		F	L^{-2}	T
Viscosidad cinemática		L^2	T^{-1}			L^{-2}	T^{-1}
Viscosidad dinámica	M	L^{-1}	T^{-1}		F	L^{-2}	T
Volumen		L^3				L^3	
Volumen específico	-	-	-		-	-	-

Tablas de conversiones de unidades.

Las TABLAS se presentan con el formato de la TABLA mostrada a la derecha; donde para convertir el valor de la unidad “A” a la unidad “B” es necesario multiplicar el valor a convertir de “A” por la cantidad “l” y así sucesivamente para el caso que se requiera.

Magnitud			
	A	B	C
A	1	l	m
B	o	1	q
C	r	s	1t

LONGITUD								
	milímetros	centímetros	metros	kilómetros	pulgadas	pies	yardas	millas
milímetros	1	0.1	0.001	1.00E-06	0.03937	0.00328	0.0010936	6.21E-07
centímetros	10	1	0.01	100000	0.393700787	0.032808399	0.010936133	6.21E-07
metros	1000	100	1	0.001	39.3700787	3.2808398	1.09361329	0.000621371
kilómetros	1000000	100000	1000	1	39370.07008	3280.8398	1093.6132	0.621371
pulgadas	25.4	2.54	0.0254		1	0.083333333	0.027777777	1.58E-05
pies	304.8	30.48	0.3048	0.0003048	12	1	0.333333333	0.000189394
yardas	914.4	91.44	0.9144	0.0009144	36	3	1	0.000568182
millas	1609344	160934.4	1609.344	1.609344	63360	5280	1760	1

Apéndice C.-Dimensiones y unidades

ÁREA										
	milímetros cuadrados	centímetros cuadrados	metros cuadrados	kilómetros cuadrados	pulgadas cuadradas	pies cuadrados	yardas cuadradas	millas cuadradas	hectáreas	acres
milímetros cuadrados	1	0.01	0.000001	1E-12	0.001550003	1.07639E-05	1.1956E-06	3.861E-13	1E-10	2.47E-10
centímetros cuadrados	100	1	0.0001	1E-10	0.15500031	0.001076391	0.000119599	3.861E-11	1.00E-08	2.471E-08
metros cuadrados	1000000	10000	1	1.00E-06	1550.0031	10.76391	1.19599	3.86E-07	1.00E-04	0.0002471
kilómetros cuadrados	1E+12	1.00E+10	1000000	1	1550003100	10763919.41	1195990.046	0.3861021	100	247.10538
pulgadas cuadradas	645.16	6.4516	0.00064516	6.45E-10	1	0.00694444	0.000771605	2.49E-10	6.45E-08	1.59E-07
pies cuadrados	92903.04	929.0304	0.09290304	9.29E-08	144	1	0.111111111	3.59E-08	9.29E-06	2.29E-05
yardas cuadradas	83617.36	8361.2736	0.83612736	8.36E-07	1296	9	1	3.22E-07	8.36E-05	0.0002066
millas cuadradas	2.58999E+12	25899881103	2589988.11	2.58998811	4014489600	2787400	3097600	1	258.9988	640
hectáreas	1.00E+10	1.00E+08	10000	0.01	15500031	107639.1042	11959.90046	0.003861022	1	2.471053815
acres	4046856422	40468564.22	4046.856422	0.004046856	6272640	43560	4840	0.0015625	0.404685642	1

VOLUMEN									
	mililitros	litros	milímetros cúbicos	centímetros cúbicos	metros cúbicos	pulgadas cúbicas	pies cúbicos	galones (EU)	barriles (EU)
mililitros	1	0.001	1000	1	1.00E-06	0.06102376	3.53E-05	0.00026417	6.29E-06
litros	1000	1	1000000	1000	0.001	61.02376	0.0353147	0.2641722	0.0062898
milímetros cúbicos	0.001	0.000001	1	0.001	1.00E-09	6.10238E-05	3.53E-08	2.64E-07	6.29E-09
centímetros cúbicos	1	0.001	1000	1	1.00E-06	0.06102374	3.53E-07	0.000264172	6.2869E-06
metros cúbicos	1.00E+06	1000	1.00E+09	1000000	1	61023.76	35.3147	264.1277	6.2869
pulgadas cúbicas	16.3870597	0.016387	16387.0597	16.387064	1.64E-05	1	0.00057870	0.004329	0.0001030
pies cúbicos	28316.835	28.316835	2.83E+07	28316.836	0.02831684	1728	1	7.4805	0.1781076
galones (EU)	3785.40967	3.7854097	3.79E+06	3785.4097	0.0037854	231	0.13368056	1	0.0230895
barriles (EU)	1.59E+05	158.9872	1.59E+08	1.59E+05	0.1589872	9701.999	5.61458345	42	1

PRESIÓN							
	kilogramo / (centímetro ²)	libra / (pulgada ²)	atmósferas	bares	pascales	kilopascales	mm. de mercurio
kilogramo / (centímetro ²)	1	14.2233	0.9678	0.98066	98039.2156	98.039.2156	735.5614
libra / (pulgada ²)	0.0703069	1	0.0680459	0.068947	6894.757	6.89475	51.7236
atmósferas	1.033227	14.695949	1	1.01325	101325	101.325	760.127
bares	1.019716	14.50377	0.986923	1	100000	100	750.18754
pascales	1.01972E-05	0.00014504	9.87E-06	1.00E-05	1	0.001	0.0075018
kilopascales	0.0101972	0.1450377	0.00986923	0.01	1000	1	7.501875
milímetros de mercurio	0.0013595	0.01933353	0.00131557	0.001333	133.32	0.13332	1

GRADIENTE DE PRESIÓN			
	kilopascal / metro	libras / (pulgada ²)/ pie	kilogramo / (centímetro ²) / metro
kilopascal / metro	1	0.0476	0.0102
libras / (pulgada ²)/ pie	21.0207	1	0.2311
kilogramo / (centímetro ²)/ metro	0.980665	4.3349	1

VISCOSIDAD ABSOLUTA						
	centipoises	poises	gramo / (centímetro- segundo)	kilogramo / (metro- segundo)	libras / (pie- segundo)	libras- segundo / (pie ²)
centipoises	1	0.01	0.01	0.001	0.000671969	2.09E-05
poises	100	1	1	0.1	0.067198975	0.002088543
gramo / (centímetro- segundo)	100	1	1	0.1	0.0671969	0.00208854
kilogramo / (metro- segundo)	1000	10	10	1	0.671969	0.0208854
libras / (pie- segundo)	1488.163936	14.881639	14.881639	1.4881639	1	0.03108095
libras- segundo / (pie ²)	47880.25898	478.802589	478.8025	47.8802589	32.1740485	1

VISCOSIDAD CINEMÁTICA				
	centistokes	stokes	(centímetro ²) / segundo	(pie ²) / segundo
centistokes	1	0.001	0.001	0.000011
stokes	100	1	1	0.001076
(centímetro ²) / segundo	100	1	1	0.00107639
(pie ²) / segundo	92903.04	929.0304	929.0304	1

PERMEABILIDAD				
	milidarcy	darcy	milímetros ²	centímetros ²
milidarcy	1	0.001	9.87E-10	9.87E-12
darcy	1000	1	9.87E-07	9.87E-09
milímetros ²	1.01E+09	1.01E+06	1	0.01
centímetros ²	1.01E+11	1.01E+08	100	1

MASA				
	miligramos	gramos	kilogramos	slugs
miligramos	1	0.001	1.00E-06	6.85E-08
gramos	1000	1	0.001	6.85E-05
kilogramos	1000000	1000	1	0.068521
slugs	14593903	14593.903	14.593903	1

PESO					
	libras	miligramos	gramos	kilogramos	toneladas
libras	1	453592.37	453.59237	0.45359237	0.000453592
miligramos	2.20E-06	1	0.001	1.00E-06	1.00E-09
gramos	2.20E-03	1000	1	0.001	1.00E-06
kilogramos	2.204622	1.00E+06	1000	1	0.001
toneladas	2204.62262	1.00E+09	1.00E+06	1000	1

DENSIDAD		
	gramo / centímetro³	libra / pulgada³
gramo / centímetro³	1	0.036127
libra / pulgada³	27.679905	1

DENSIDAD RELATIVA DEL ACEITE EN GRADOS API
$^{\circ}API = \frac{141.5}{\text{densidad relativa } 60 - 60^{\circ}F} - 131.5$
<p>Donde la densidad relativa de 60-60 F, significa la densidad relativa del aceite a 60°F respecto a la densidad del agua a 60°F</p>

FUERZA				
	Newtons	libras	dinas	kilogramos
Newtons	1	0.224809	100000	0.1019716
libras	4.448222	1	4.45E+05	0.453592
dinas	0.00001	2.24E-06	1	1.01E-06
kilogramos	9.80665	2.204623	980665	1

ENERGÍA							
	joules	kilojoules	calorías	kilocalorías	BTU	pie-libra	kilowatt-hora
joules	1	0.001	0.238846	0.000238846	0.000947817	0.7375621	2.78E-07
kilojoules	1000	1	238.84589	0.238846	0.94781698	737.562122	0.000278
calorías	4.1868	0.004187	1	0.001	0.00396832	3.088109	1.16E-06
kilocalorías	4186.8	4.1868	1000	1	3.9683201	2088.109111	0.001163
BTU	1055.056	1.055056	251.995796	0.251995796	1	778.16934	2.93E-04
pie-libra	1.355818	0.001355818	0.323831	0.000323831	0.001285	1	3.77E-07
kilowatt-hora	36000000	3600	859845.24	859.84524	3412.14156	2655295.92	1

PODER				
	watts	kilowatts	caballos de fuerza	candelas
watts	1	0.001	0.001341022	54.11268096
kilowatts	1000	1	1.341022092	54112.68096
caballos de fuerza	745.69987	0.74569987	1	40351.81916
candelas	0.018479956	1.84E-05	2.48E-05	1

TEMPERATURA
$^{\circ}\text{F} = 1.8 (^{\circ}\text{C}) + 32$
$^{\circ}\text{C} = 5/9 (^{\circ}\text{F} - 32)$
$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.16$
$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459.69$

TIEMPO					
	segundos	minutos	horas	días	semanas
segundos	1	0.016666667	0.000277778	1.57E-05	1.65E-06
minutos	60	1	0.016666667	0.000694444	9.92E-05
horas	3600	60	1	0.0416666	0.00595238
días	86400	1440	24	1	0.14285714
semanas	604800	10080	168	7	1

VELOCIDAD				
	metros / segundo	pies / hora	kilometros / hora	millas / hora
metros / segundo	1	11811	3.6	2.236936
pies / hora	8.46E-05	1	0.0003048	0.000189394
kilometros / hora	0.2777777	3280.83333	1	0.62137
millas / hora	0.477704	5279.98944	1.609344	1

Bibliografía

1. *Apuntes del curso de terminación y reparación de pozos impartido por el ingeniero Leonardo Cruz Espinoza, semestre 2010-2.*
2. *Apuntes de ingeniería de perforación de pozos impartido por el ingeniero José Agustín Velasco Esquivel, semestre 2010-1.*
3. *Burgoyne, A.T. y colaboradores; "Applied Drilling Engineering"; SPE; 1991.*
4. *Fishing Services; Baker oil tools manual.*
5. *Fishing Services; Fichas técnicas de Weatherford.*
6. *Garaicochea P. Francisco; "Apuntes de terminación de pozos"; Facultad de Ingeniería (UNAM).*
7. *Guía de diseño para aislar intervalos probados. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*
8. *Guía de diseño para aparejos de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*
9. *Guía de diseño para disparos de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*
10. *Guía de diseño para empacadores de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*
11. *Guía de diseño para estimulación de pozos. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*
12. *Guía de diseño para fluidos empacadores de producción. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*
13. *Guía de diseño para fracturamientos hidráulicos. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*
14. *Guía de diseño para el lavado de pozos. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*
15. *Guía de diseño para la molienda de empacadores. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*
16. *Guía de diseño para la selección de herramientas de molienda. Gerencia de ingeniería y tecnología de la (UPMP).*

17. Halliburton; *"Perforating Solutions"*
18. Ingrid Devora Almeida García; *"Cuaderno de ejercicios de terminación de pozos"*; Facultad de Ingeniería (UNAM); 2005.
19. Jonathan Bellarby; *" Well completion design"*; Elsevier; 2009.
20. Nancy Ebner Gerschber. *Tabla de conversión de unidades, IQUIQUE – 2006.*
21. *Petróleo Internacional; "Glosario de Industria Petrolera"*; PennWell Publishig Company; 1992.
22. Rasso, Z.C: *"Un siglo de la perforación en México"*; Unidad de perforación y mantenimiento de pozos (UPMP); 2000.