

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE PETROLEO



MEJORAS EN LA CEMENTACION DE POZOS DEL
NOROESTE PERUANO MEDIANTE EL METODO
DE LA PREDICCION GRAFICA

T E S I S

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO DE PETROLEO

MAURO CATAÑO OROPEZA

PROMOCION 1978 - 2

LIMA - PERU 1991

A LA MEMORIA DE
MIS QUERIDOS PADRES
TOBIAS Y CRISTINA

CON CARIÑO Y AMOR PARA MI
ESPOSA ROSA Y MIS HIJOS
JUAN CARLOS, MARIA CRISTINA Y
CARLOS ENRIQUE.

TEMARIO

INTRODUCCION

CAPITULO I INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES

CAPITULO II MECANISMOS DE MIGRACION DEL GAS

CAPITULO III CEMENTACION DE POZOS CON PROBLEMAS DE GAS

3.1 Predicción grafica

3.2 Técnicas preventiva para el flujo de gas en el anular

3.2.1 Ajuste de la altura del anillo de cemento

3.2.2 Variación de los tiempos de bombeabilidad de la lechada de cemento

3.2.3 Aplicación de presión superficial en el espacio anular cementado

3.2.4 Incremento de la densidad del lodo en el espacio anular

3.2.5 Cementación en etapas multiples

3.2.6 Incremento de la densidad del agua de mezcla de la lechada de cemento

3.2.7 Lechadas de cemento modificadas

3.3 Diseño de la lechada

3.4 Preparación del pozo

3.4.1 Geometría del pozo

3.4.2 Acondicionamiento del lodo

3.4.3 Movimiento de la tubería de revestimiento.

3.4.4 Aislamiento lodo/cemento

3.5 Mecanismo de desplazamiento

3.5.1 Modelos matemáticos para evaluar el comportamiento de los fluidos

3.5.2 Cálculo del régimen de flujo crítico

3.5.3 Cálculo de las pérdidas de carga

CAPITULO IV EVALUACION DE CAMPO

CAPITULO V EVALUACION ECONOMICA

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

FIGURAS, TABLAS Y ANEXOS

BIBLIOGRAFIA

ANTECEDENTES

Los yacimientos del Noroeste Peruano, por su baja permeabilidad requieren siempre de fracturamientos hidráulicos para poder producir en cantidades comerciales.

Gran parte de esta técnica de estimulación depende de la calidad de la cementación primaria. Si esta última no es la apropiada, se requerirán de trabajos correctivos (cementaciones forzadas) para poder asegurar un margen de éxito en la completación y vida productiva del pozo. Todo esto conlleva a pérdida de tiempo y dinero.

Desde mucho tiempo atrás, los técnicos que han laborado y/o laboran en esta zona, siempre han tratado de mejorar la calidad de la cementación primaria. Muchos métodos y técnicas de limpieza del lodo, colocación del cemento, mezclas especiales, etc han sido empleadas con este fin, sin que hasta la fecha se haya definido un procedimiento o método de solución confiable.

Por otra parte, la Industria del Petróleo en general, ya desde 1960 reconocía la invasión del gas al anular después de cementar como un problema en la cementación primaria.

A partir de 1974, muchos investigadores empiezan a usar modelos de laboratorio a escala así como efectuar estudios de campo, con el fin de explicar el fenómeno de la migración de gas. Los resultados de muchos de éstos muestran que la presión hidrostática de la lechada disminuye durante el fragüe, y la entrada de gas ocurre cuando ésta es menor que la presión de formación.

Recientes investigaciones conducidas por la TEXAS A Y M UNIVERSITY RESEARCH FOUNDATION AND EXXON COMPANY concluyen en lo mismo; sin embargo, adicionalmente ellos desarrollaron una técnica gráfica que predice el flujo anular gaseoso luego de cementar, así como algunos métodos preventivos para solucionar este problema.

Basado en los resultados de estos trabajos, a partir de 1987 se empezó a probar en algunos pozos del Noroeste Peruano la técnica de la predicción gráfica y algunos métodos preventivos, habiéndose obtenido con ello resultados muy alentadores, los mismos que se discuten en el presente trabajo.

I. INTRODUCCION

Quando se encuentran formaciones que contienen gas, la cementación a veces da como resultado la migración de este fluido por la parte posterior de la tubería de revestimiento. Puede ocasionar una falta de control en las zonas gasíferas, así como la pérdida de valiosas cantidades de hidrocarburos; y si el gas llega a la superficie, puede presentarse una situación peligrosa. Además la tarea para remediar este flujo, menudo resulta difícil, laboriosa y costosa.

La canalización se manifiesta fácilmente en los pozos de poca profundidad en vista de que el gas llega a la superficie en unas cuantas horas después del trabajo de cementación, pero esto puede ocurrir a cualquier profundidad. En pozos profundos algunas veces se detecta fácilmente, porque el gas no necesariamente llega a la superficie sino que puede desplazarse a las zonas permeables de menor presión.

Quando se presenta la migración en un pozo, advertida o no, no sólo afectará a ese pozo en particular, debido a pérdidas de producción, sino que también puede afectar, con resultados serios y costosos a los pozos vecinos a su área.

Inicialmente este problema se le trató en forma convencional, y las técnicas, que a continuación se describen brevemente, siguen teniendo vigencia para las cementaciones de pozos con problemas de gas; pero éstas por si solas no son suficientes para controlar el problema

En primer término, se debe alcanzar una completa remoción del lodo mediante la implantación de buenas prácticas de cementación como el acondicionamiento del lodo, centrado y movimiento de la tubería de revestimiento y buenos criterios en el uso de lavadores y espaciadores sin descuidar las buenas técnicas de desplazamiento, ya sea en flujo turbulento o en tapón.

Otro cuidado igualmente importante es la de tener un control estricto de las propiedades de la lechada de cemento. Se debe mantener a bajo nivel la pérdida de fluido porque la reología que gobierna la remoción de lodos, no debe quedar afectada por un cambio en la relación agua/cemento durante el desplazamiento. En todo momento se debe evitar el puente del cemento hidratado. Además, los polímeros empleados en el control del filtrado, ayudan a reducir la migración del gas.

Por otra parte, se debe mantener a mínimos valores el agua libre para evitar la formación de "bolsas" de agua, siendo en los pozos desviados este parámetro mucho más

delicado, puesto que existe una tendencia bastante importante para la formación de una película continua de agua en la parte superior del pozo, que puede ofrecer un camino fácil a la trayectoria del gas.

Aún cuando en el Noroeste se puso mucho énfasis en la correcta aplicación de las técnicas explicadas brevemente, no se obtuvo los resultados esperados, debido fundamentalmente a cierta falta de comprensión del comportamiento de las lechadas en sus distintas fases hasta completar su fraguado.

Mientras el mecanismo exacto de la falla puede ser muy complejo, hay evidencia clara que indica que el flujo de gas ocurre debido a una reducción en la presión hidrostática ejercida por la columna de cemento durante su período inicial de hidratación.,

Algunas técnicas utilizadas en la industria del petróleo se encaminaron básicamente a mantener la mayor cantidad posible de presión hidrostática sobre la formación o intervalo gasífero. Esto se hizo, ajustando cuidadosamente las alturas y densidades de las columnas de lodo y cemento(s), y los tiempos de espesamiento de las mismas. Así mismo, se hicieron cementaciones en dos etapas ó con topes por debajo de la superficie.

Con la aplicación de esta nueva técnica en algunos pozos del Noroeste peruano, ha conseguido importantes resultados, que consideramos es el inicio a la solución del problema de mala cementación por efecto del gas en pozos de esta zona.

CAPITULO I

INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES

Algunos estudios previos del problema del flujo de gas anular han demostrado que el fenómeno puede deberse a factores tales como: una excesiva deshidratación, contracción e hidratación no uniforme del cemento.

Investigaciones recientes indican que a medida que la lechada de cemento comienza a espesarse, el gradiente hidrostático provisto por el cemento disminuye, desde su valor inicial igual al de la densidad de la lechada, hasta valores muy reducidos o nulos, después que la lechada obtiene su fragüe inicial, debido a que ésta ya no es un verdadero fluido.

APARATO

El aparato que se utilizó en estas investigaciones consiste (Fig.1) en un tubo de 1" pulgada de diámetro

centrado dentro de una cañería de 4-1/2" de diámetro. La instrumentación que consta de transductores de presión y termocuplas, fue usada para investigar el comportamiento de la presión mientras el cemento circula y fragua. La totalidad del aparato fue sumergido en un baño caliente para asegurar una temperatura uniforme a lo largo de todo el ensayo, simulando condiciones de reservorio.

La altura total del modelo fue de 47.23 fts. una columna de 12 fts fue utilizada durante cada serie de ensayos y un plato poroso fue instalado en la base de la cañería para permitir la introducción del gaseoso a una presión controlada.

En el ensayo inicial, una columna de cemento clase "H" de las siguientes características : Tiempo de bombeabilidad 3.5 hrs., densidad 16.4 #/gal y una altura de columna de 12 fts., fue observada durante el proceso de hidratación bajo condiciones estáticas a 150°F

En la fig.1. se aprecia el perfil de presión registrado en la base de la columna de cemento para varios intervalos de tiempo. La presión en la base de la columna de agua (P1) se mantuvo constante durante el ensayo; sin embargo la presión en la base de la columna de cemento (P2) comenzó a disminuir inmediatamente después de la ubicación de la lechada y continuó disminuyendo durante

el resto del ensayo. Después de que el cemento inició su fragüe , la fuerza de gel aparentemente formó un sello efectivo, permitiendo que la presión hidrostática en el cemento continuase cayendo por debajo de la presión hidrostática subyacente (P_1). Este decrecimiento de presión continuado se cree que está asociado con una disminución de volumen que ocurre en la matriz del cemento durante la reacción de hidratación.

Las mediciones de laboratorio han mostrado que el producto de la hidratación del cemento posee menor volumen que la suma de los volúmenes separados del cemento y el agua; de hecho el volumen de agua contenido dentro de la matriz del cemento hidratado se observó que disminuía alrededor de un 2% de la parte del agua combinada con los componentes del cemento.

La figura No.2 es un gráfico de presión vs. tiempo de la presión (P_2) registrada en la base de la columna de cemento en 5 hrs. Se observa que la lechada de cemento de 16.4 #/gal.de densidad a revertido la presión a un gradiente hidrostático igual al del agua de mezcla después de mantenerla estática durante 1 hr., al tiempo que la presión en el fondo es de 20 psi.

A medida que el cemento resulte más hidratado, la presión en el fondo continúa disminuyendo. Aproximadamente 3:15

hrs. después que se inició la circulación de la lechada de cemento en la celda de ensayo, la presión en el fondo comienza a disminuir rápidamente a medida que el cemento alcanza su fragüe inicial y se hace sólido.

Es interesante observar que esta lechada tuvo un tiempo de bombeabilidad de 3:15 hrs. a una temperatura de 150°F (fig. No.2). Los ensayos adicionales de observación fueron ejecutados durante este mismo estudio de laboratorio, mientras se variaba el tipo de lechada de cemento y el valor de presión hidrostática bajo la columna del cemento. Un resumen de los resultados observados en estos ensayos se muestran en la tabla I.

De los resultados de estos ensayos de laboratorio pueden derivarse las siguientes conclusiones:

- 1° Una mezcla de cemento API retiene su gradiente hidrostático inicial mientras se bombea y durante un corto tiempo posterior. En algún punto, cuando el cemento se vuelve estático, el gradiente hidrostático de la columna de cemento disminuye lentamente hasta que la lechada alcance su fragüe inicial; a partir de este punto el gradiente disminuye rápidamente.

- 2° La presión puede ser transmitida a través de una columna estática de cemento hasta que obtenga su fragüe inicial (Ensayos B, D y F Tabla N°I).
- 3° Aumentando la densidad del agua de mezcla se obtiene un incremento en el gradiente hidrostático del cemento durante el período en que la lechada es capaz de transmitir presión; es decir antes que el cemento alcance su fragüe inicial (Ensayos C y D Tabla N°I).
- 4° Reduciendo el contenido de agua libre de la lechada, no se elimina la pérdida de gradiente hidrostático de la misma, hecho que ocurre a medida que ésta se hidrata. Las lechadas utilizadas en los ensayos A, B, E y F - Tabla I contienen cantidades mínimas de agua libre, a pesar de esto, a medida que se hidrata el cemento, el gradiente hidrostático disminuye drásticamente.

Resultados similares fueron observados en otros estudios de laboratorio, incluso con pérdidas aún más drásticas.

Por todo esto, se podría considerar que la presión hidrostática efectiva en el espacio anular de la parte inferior, llenado con el lodo y el cemento, disminuiría a medida que la columna de cemento estática se hubiese espesado antes de obtener o llegar a su fragüe inicial.

Si la presión hidrostática reducida llega a ser menor que la presión de una formación de gas expuesta, el potencial para el flujo de gas en el espacio anular existirá. Esta conclusión fue utilizada como fundamento para el desarrollo de un método gráfico con el objeto de predecir el potencial del flujo de gas en el espacio anular y para desarrollar técnicas alternativas a los efectos de prevenir tales surgencias.

CAPITULO II

MECANISMO DE MIGRACION DE GAS

Basado en los resultados de la pruebas anteriores, se propone la siguiente teoría sobre el mecanismo de la invasión de gas.

Después que el cemento es desplazado y colocado detrás de la tubería, muchos procesos empezaron a ocurrir en la lechada tales como: deshidratación de la fase líquida, gelificación de la lechada, asentamiento y endurecimiento de las partículas sólidas, etc. A una profundidad determinada uno o más de estos procesos puede tornarse dominante sobre los otros; de este modo controla el cambio o variación en el comportamiento de la lechada.

A los efectos de intentar una explicación detallada del proceso que pasa una mezcla de cemento colocado en el espacio anular del pozo hasta completar su fraguado, podemos dividir este en tres etapas (Fig.3).

Cabe señalar que el sistema que se establece está lejos de ser estático. Si bien el desplazamiento a concluido, existe durante todo este período un intenso movimiento de fluidos. Primero, debido a la diferencia de presión hidrostática, el filtrado del cemento se mueve hacia la formación y luego, si hay flujo de gas, los fluidos de la formación (gas) se moverán hacia la masa de cemento.

Obviamente todo esto ocurre en una forma continua y sin pausa hasta que se establece un equilibrio mediante el control del gas.

1era ETAPA.—El cemento inmediatamente después de bombeado al pozo se encuentra en estado líquido y por lo tanto con habilidad de transmitir presión hidrostática (Fig.3a)

Esta capacidad se ve facilitada si se cuenta con una lechada dispersa, capaz de transmitir toda la presión del anular, y si ésta es mayor que la presión de la formación gasífera, por el momento, no existirá ningún problema de gas en el anular.

También es necesario considerar el movimiento de fluidos. En esta etapa será el agua de mezcla la que se filtre en la formación.(Fig. 4).

2da. ETAPA. - Se presenta en el momento en que se inicia el fragüe y por lo tanto empiezan a formarse los hidratos amorfos del cemento.

En esta fase, la lechada cambia de un estado líquido a un estado gelatinizado de cierta resistencia (Fig.3b), en el cual la presión hidrostática inicial queda atrapada dentro de los espacios porales de la matriz del cemento; aquí el gas todavía no puede ingresar, pues, la presión de los poros es mayor que la de la formación gasífera.

Posteriormente el cemento pasa a una estructura frágil y fácilmente desmenuzable (Fig.3c), la que se forma principalmente por la unión entre los hidratos más que por las fuerzas electrostáticas.

Durante esta etapa, la lechada no solamente se vuelve autosoportante y pierde su habilidad para transmitir la presión del fluido, sino que, el agua atrapada en los poros de la estructura existente, continúa reaccionando con los núcleos secos de los granos del cemento, disminuyendo su volumen (0.1 - 0.6%) y su presión poral, posibilitando de esta manera la migración de gas (Fig.5).

Aunque los líquidos no pueden desplazarse a través de una matriz de baja permeabilidad, un gas presurizado sí lo puede hacer (Fig.6); sin embargo, si la estructura de gel responsable para la restricción de la presión a través de la lechada de cemento, se genera con un margen aceptable de diferencial de presión entre el anular y la formación gasífera, daría lugar a que las partículas del cemento lograrían alcanzar una adherencia suficiente para inhibir el flujo de gas.

Según las investigaciones realizadas, el tiempo en el cual el cemento empieza a perder habilidad para transmitir presión es muy similar a su thickening time o tiempo de bombeabilidad, tal como se aprecia en la (Fig.7).

3ra. ETAPA.—En esta etapa, el cemento está fraguado (Fig. 3d). Los hidratos se interconectan rellenando los poros e incrementando su resistencia y reduciendo su permeabilidad a cualquier fluido de la formación.

Si bien los hidratos pueden taponear la porosidad normal del cemento y si ya se ha producido un canal con el gas, no tendrán la capacidad de rellenarlo, puesto que éstos son demasiado grandes, están secos y no hay una cantidad adicional de agua para hidratar más cemento.

CAPITULO III

CEMENTACION DE POZOS CON PROBLEMAS DE MIGRACION DE GAS

3.1.- PREDICCIÓN GRAFICA

La técnica de predicción gráfica fue diseñada para ubicar dos consideraciones básicas:

- 1° El gradiente hidrostático de una columna de cemento se revierte a un gradiente hidrostático igual al de su agua de mezcla durante la fase inicial de su hidratación, antes de alcanzar su fragüe inicial.
- 2° Después de alcanzar su fragüe inicial, una columna de cemento tendrá una resistencia a la compresión suficiente para prevenir la intrusión de gas.

Este gradiente hidrostático fue seleccionado como fundamento de la técnica gráfica, aunque es conocido que el gradiente hidrostático de la lechada continuará

disminuyendo después que el cemento alcance su fragüe inicial.

El desarrollo de esta técnica se inicia con la construcción de un perfil de Presión vs. Profundidad (Fig.8) que representa los efectos hidrostáticos combinados del lodo y/o el cemento, desde su colocación en el anular hasta cuando el cemento alcance su fragüe inicial.

El procedimiento es el siguiente:

- 1) Seleccione las escalas convenientes para la presión y .profundidad.
- 2) Trace un esquema del pozo en la escala de profundi-
dad, anote el nivel del tope de cemento deseado, la
profundidad de las cañerías y los datos de las
formaciones.
- 3) Grafique todas las presiones porales de las forma-
ciones atravesadas. Una línea que une estos puntos la
constituye la recta A-C en la Fig. 8
- 4) Construya una línea de gradiente de densidad de lodo
acondicionado para la cementación, comenzando por la

superficie y yendo hasta la profundidad del tope del cemento (B).

- 5) Trace la línea de gradiente hidrostático de la mezcla del cemento, comenzando por la parte superior y a lo largo de todo el anillo. Este trazado forma el segmento B-D. La línea A-B-D representa el perfil del gradiente hidrostático de fluidos en el anular inmediatamente después de terminado el desplazamiento.
- 6) Trace la línea de gradiente de fractura de todas las formaciones atravesadas.
- 7) Desde el tope del cemento (B) hasta la profundidad total, construya un perfil de gradiente hidrostático para el agua de mezcla. La línea A-E corresponde al perfil del gradiente hidrostático ajustado.

Para el caso específico del Noroeste Peruano, donde no se conoce con exactitud las presiones porales de las formaciones atravesadas, ni los gradientes de fractura de éstas, se hacen las siguientes asunciones:

- a) La presión poral es \leq la Presión Hidrostática del lodo.

b) Las gradientes de fractura de las formaciones son similares para pozos de una determinada zona.

Si todos los trazados de presiones porales de formación en este gráfico son menores que los correspondientes perfiles ajustados del gradiente hidrostático, la migración de gas en el espacio anular no ocurrirá después de cementar.

Si la presión poral de formación (Línea A-C) es mayor que el correspondiente gradiente hidrostático ajustado (Línea A-B-E), se deberían considerar medidas preventivas.

En pozos donde el flujo de gas en el espacio anular hacia la superficie fue encontrado, la presión superficial registrada después de la cementación se ha aproximado mucho mucho a la presión de desbalanceo predichas por el perfil de presiones vs. profundidad. La Tabla II muestra los resultados de tres pozos evaluados en campos de EE.UU.

Después de completar el perfil Presión vs. Profundidad para un pozo que muestra un potencial para la migración del gas en el espacio anular, puede evaluarse cada técnica preventiva a aplicar.

Cada una de estas técnicas preventivas que se discutirán poseen la finalidad común de ubicar el perfil ajustado del gradiente hidrostático lodo/cemento (Línea A-B-E mostrado en la Fig.8), entre el perfil de la presión poral de formación (Línea A-C) y el de gradiente de fractura, para evitar la migración de gas y no ocasionar pérdida de fluido por ruptura de la formación.

3.2 TECNICAS PREVENTIVAS PARA CONTRARRESTAR EL FLUJO DE GAS EN EL ESPACIO ANULAR

Una de la más importantes consideraciones para la selección de una técnica preventiva determinada, es la integridad de la formación.

Los parámetros que se deben considerar cuidadosamente antes de seleccionar una técnica preventiva determinada son:

- 1° La configuración del pozo.
- 2° Las limitaciones de presión en el equipamiento de superficie y de profundidad.
- 3° Diseño tubular y análisis de la estabilidad de la carga.
- 4° Reología del lodo y del cemento.
- 5° Control de la calidad del cemento.

- 6° Disponibilidad y precisión de los datos de diámetro del pozo. En lo posible debe contarse con el registro caliper, caso contrario como segunda alternativa se puede emplear el procedimiento del Anexo A.
- 7° Datos precisos de profundidad y presión poral de todas las formaciones a cementar.
- 8° Temperatura de circulación.
- 9° Problemas encontrados durante la perforación

3.2.1 Ajuste de la altura del anillo de cemento

El método más simple y efectivo para reducir el potencial de flujo de gas en el espacio anular después de cementar, consiste en disminuir la altura del anillo de cemento.

Esta técnica disminuye la cantidad de columna de cemento que se revertirá a un gradiente hidrostático del agua de mezcla. La columna de cemento debe ser de suficiente altura para cubrir completamente todas las zonas productivas, con el fin de prevenir la comunicación interzonal y proveer sustentación adecuada para la estabilidad de la cañería.

Sin embargo, si el riesgo de flujo en el espacio anular está indicada por el análisis gráfico, entonces se debe intentar reducir la altura de la columna de cemento y

solucionar cualquier problema de inestabilidad en forma anticipada.

La Fig.9 muestra un pozo de 8000 pies de profundidad, con un lodo de densidad 11 Lbs/galón y cementado con una lechada de 15.6 Lbs./galón . En este ejemplo, el tope de cemento a 6000 pies (Caso II) cubriría en forma adecuada los horizontes productivos, pero la práctica corriente de campo en esta área es colocar el tope de cemento a 3000 pies (Caso I).

El análisis gráfico indica que cuando la columna de cemento se revierte a un gradiente hidrostático de agua dulce, la altura de la columna de cemento posee un efecto significativo sobre el estado de balance del pozo.

En este ejemplo, una reducción de 3000 pies en la altura de la columna de cemento debería tomarse en cuenta para incrementar 417 psi de presión hidrostática a 8000 pies, durante el período en que la columna de cemento mantiene el gradiente del agua dulce.

Basándose en la presión poral indicada, la migración de gas en el espacio anular podría resultar un problema significativo en el Caso I. En el Caso II la migración de gas en el espacio anular después de cementar no se daría debido al sobrebalance hidrostático esperado.

3.2.2 Variación de los tiempos de bombeabilidad de la lechada de cemento

En situaciones donde se precisan grandes columnas de cemento, los tiempos de bombeabilidad de las lechadas a usar pueden ajustarse de tal manera que la columna del anillo de cemento fragüe selectivamente, desde el fondo hacia el tope, sin que el gradiente hidrostático caiga debajo de la presión poral y origine la entrada de gas.

Teóricamente, el cemento puesto frente a una formación con potencial de flujo de gas, debe alcanzar la suficiente resistencia a la compresión para prevenir la intrusión de gas, antes que las lechadas superiores se revierten en el gradiente hidrostático del agua de mezcla.

La variación de los tiempos de bombeabilidad puede obtenerse, controlando algunas propiedades de las lechadas o mediante una adecuada dosificación de retardadores y aceleradores.

La Fig.10 muestra un pozo que va ser cementado hasta 3000 pies con 2 mezclas de cemento, y que según el análisis gráfico, existe un flujo de gas por debajo de los 6400 pies.

Sino se usa la técnica preventiva descrita, la comunicación interzonal o la migración de gas hacia la superficie es de esperarse.

Con el objeto de ubicar correctamente el perfil ajustado del gradiente hidrostático hacia la derecha, la columna de cemento puede dividirse en dos lechadas separadas por el tiempo de bombeabilidad.

En este ejemplo, con una diferencia en el tiempo de bombeabilidad de aproximadamente 2 horas, la lechada de fondo tendría un cierto fragüe antes que la lechada superior alcance su fragüe inicial y pierda la mayor parte de su gradiente hidrostático original.

Este efecto se refleja en la ubicación de las líneas de gradiente del agua de mezcla (8.33 lbs/gal.), tal que ellas se correspondan con cada etapa de cementación.

3.2.3 Aplicación de presión superficial en el espacio anular cementado

La capacidad de flujo de gas en el espacio anular puede también reducirse mediante la aplicación de una presión superficial sobre el espacio anular cementado inmediatamente después de la colocación del cemento.

Esta presión aplicada, compensa la pérdida de gradiente hidrostático del cemento que ocurre a medida que la lechada se fragua. Esta técnica requiere que la lechada se diseñe para adquirir resistencia inmediatamente después de su fragüe inicial.

La Fig. 11 muestra un pozo con un potencial de gas determinado debajo de los 7000 pies, y según el análisis gráfico, la zona de particular interés situada a 7800 pies, tendría un desbalance negativo de +/- 100 psi cuando la columna de cemento de 2000 pies se revierta al gradiente hidrostático de su agua de mezcla.

Aplicando una presión superficial de 300 psi, todo el perfil hidrostático lodo/cemento, se ubica hacia la derecha. Esta nueva ubicación de la línea, provee aproximadamente 300 psi de desbalance positivo a 7800 pies, reduciendo consecuentemente la capacidad de migración del gas:

Es importante hacer notar que la presión superficial debe ser aplicada inmediatamente después de cementar, de tal manera que el gradiente de presión se transmita a lo largo de toda la columna lodo/cemento.

Una vez que la columna de cemento ha comenzado a incrementar su fuerza de gel, es dudoso que la presión

pueda transmitirse a través de ésta hasta la profundidad requerida.

Reportes de campo de muchos trabajos efectuados en la Costa del Golfo nos indican que la técnica de aplicar presión en la superficie después de cementar tuvo éxito en la prevención del flujo de gas en el espacio anular, especialmente en pozos con presión anormal.

Por ejemplo, un reporte indica que en un pozo, el flujo de gas en el espacio anular, ocurrió después de que se cementó la cañería de producción a 12 600 pies (Fig 12). La primera indicación se observó 6 horas después que se colocó el cemento. La presión en el espacio anular cerrado, comenzó a aumentar gradualmente durante 8 horas, hasta que eventualmente se estabilizó a 1995 psi.

La Fig.12 muestra las condiciones de presión esperadas en el fondo del pozo, a medida que se alcanzaba el gradiente hidrostático del agua de mezcla de la lechada (0,433 psi/pie).

Observe que la presión diferencial entre la formación de gas a 12 500 pies y la presión hidrostática efectiva de las columnas de lodo/cemento a esa profundidad, fue aproximadamente de 2060 psi. Los perfiles sónicos, probados en este pozo después de que se observó la

presión superficial, mostraron que a los 12 500 pies una zona de gas estaba fluyendo hacia una formación de menor presión situada a 11 500 pies. Operaciones de reparación de la cementación se requirieron para detener los problemas de flujos de gas en la interzona.

Antes de cementar la cañería de producción en el próximo pozo perforado en este campo, se recurrió al método de predicción gráfica para definir el problema de entrada de gas. El gráfico mostró que una presión diferencial de aproximadamente 200 psi ocurriría entre una formación de gas a 11 800 pies y la columna hidrostática efectiva a esa profundidad.

Inmediatamente después de colocar el cemento los preventores de surgencia fueron cerrados sobre la cañería de producción, y una presión de 300 psi fue aplicada en el espacio anular cementado durante 12 horas, durante el cual el cemento obtuvo su fragüe inicial.

La presión aplicada fue entonces eliminada y las operaciones de terminación fueron reanudadas. No se observó evidencia de fuga de gas en el espacio anular, tanto en el fondo del pozo como en la superficie.

3.2.4 Incremento de la densidad del lodo en el espacio anular

El incremento de la densidad del lodo de perforación encima de la columna de cemento, es otra técnica preventiva que se puede usar para ubicar la totalidad del perfil hidrostático, desde la superficie hasta la profundidad final, encima de la presión poral.

En la Fig.13 se muestra un pozo de 8000 pies con una densidad de lodo de 10 Lbs./Gal y una densidad de lechada de cemento de 15,6 Lbs./Gal. Según el gráfico, si el pozo fuera cementado en estas condiciones, el flujo de gas en el espacio anular se daría desde varios intervalos debajo de 6,000 pies (tope del cemento); pero, si incrementamos la densidad del lodo, se puede obtener una mayor hidrostática en el anular que origine un desbalance positivo y evite la migración de gas.

El factor más importante a tenerse en cuenta, cuando se utiliza esta técnica, es la integridad de la formación; por tanto su uso se justifica solamente si el pozo puede resistir el efecto hidrostático adicional del aumento de la densidad del lodo. Si el pozo no puede resistir la presión hidrostática total ejercida por esta columna, es probable que ocurran pérdidas de circulación durante la cementación. Las pérdidas al final pueden resultar en

una migración del gas en el espacio anular y/o problemas de control del pozo potencialmente graves.

3.2.5 Cementación en etapas múltiples

Cuando una de las técnicas mas simples y económicas para la prevención de flujo de gas en el espacio anular no es práctica, las herramientas para cementación en múltiples etapas pueden ser empleadas con este fin, colocando el cemento en el anular, selectivamente.

Cada etapa de cementación o columna debería fraguar antes de realizar la etapa subsiguiente; para esto, se utiliza dispositivos de cementación que son abiertos mecánicamente, provocando una separación física y en tiempo entre las lechadas de cada etapa.

La Fig. 14 muestra un ejemplo de un pozo que contiene numerosas zonas productivas entre 3000 y 5000 pies y de 6500 a 8000 pies. Si el pozo se cementa desde el fondo hasta los 3000 pies, estaría desbalanceada negativamente varias zonas de gas debajo de los 6500 pies. Basado en el perfil de gradiente hidrostático ajustado lodo/cemento que se muestra en dicha figura, un incremento neto de 261 psi en la presión hidrostática podría alcanzarse separando esta gran columna en dos etapas. En consecuencia este pozo sería un firme candidato para la

cementación en etapas, dado que la ausencia de horizontes productivos entre los 5000 y 6000 pies no requiere que este intervalo sea cementado.

3.2.6 Incremento de la densidad del agua de mezcla de la lechada de cemento

El incremento de la densidad del agua de mezcla de la lechada de cemento, es otra técnica que puede utilizarse para la prevención de gas en el espacio anular en algunos pozos. Los ensayos fueron realizados en lechada con densidad de agua de mezclas incrementadas para verificar la retrogresión hidrostática atestiguada con lechadas de agua dulce.

Como se muestra en la Tabla I, los ensayos de las series C y D, utilizaron soluciones de agua de mezclas saturadas con cloruro de sodio para hidratar el cemento API Clase "H". En ambos ensayos, la columna de cemento se remitió a la gradiente de fluido bastante aproximado al del agua saturada con sal, antes de alcanzar su fragüe inicial.

La Fig.15 muestra un pozo en el cual una cañería de producción fue cementada entre 6000 y 8000 pies. Como se indica mediante la línea de gradiente de 8,34 Lbs./Gal., el potencial del gas en el espacio anular podría esperarse en zonas debajo de los 7000 pies.

Aumentando la densidad del agua de mezcla de la lechada a 9,5 Lbs./Gal. con el agregado del 18% de cloruro de sodio, un incremento neto de 122 psi en la presión hidrostática sería suficiente para prevenir la migración de gas en el espacio anular.

El pozo fue cementado exitosamente y terminado sin rastros de migración de gas.

3.2.7 Lechadas de cemento modificadas

Un reciente desarrollo para resolver el flujo de gas en el espacio anular involucra una nueva lechada de cemento diseñada para mantener un gradiente fluido cerca de la densidad original durante el período de hidratación inicial. El cemento desarrollado por varias compañías de servicios de cementación, es formulado para contener burbujas de gas diminutas que actúan como compensadores de presión, compresibles durante el período inicial de la hidratación. A medida que la lechada de cemento estática comienza a perder su gradiente hidrostático inicial estas burbujas de gas se expanden para mantener una presión constante en el fondo del pozo, proveyendo así un desbalance hidrostático positivo adecuado.

Un pozo de gas de la Gulf Coast, ubicado en un área conocida por sus problemas de flujo de gas en el espacio

anular, fue seleccionado como pozo de ensayo para esta nueva lechada de cemento. Los análisis gráficos de esta operación de cementación (Fig.16) mostraron que la presión de formación a 6500 pies de profundidad excedería a la presión hidrostática en 217 psi si el gradiente de la lechada se revirtiese al gradiente 0,433 psi/pie del agua de mezcla del cemento. Los perfiles sónicos y C.B.L. corridos en este pozo después de cementar con una lechada con aditivo generador de gas, no mostró señales de flujo de gas en el espacio anular.

3.3 DISEÑO DE LA LECHADA

Tal como se explica en el Capítulo "Mecanismo de migración de gas", muchos procesos como: deshidratación de la fase líquida de la lechada, endurecimiento de las partículas sólidas, etc., ocurren en la lechada después que ésta es colocada en el espacio anular.

En el diseño de la lechada se debe tomar en cuenta todas estas consideraciones, de tal forma que de acuerdo a las condiciones que presenta el pozo, y mediante el uso de aditivos químicos, se confieren a las lechadas características que permitan el control del flujo de gas.

Investigaciones de laboratorio, así como las experiencias de campo, coinciden en señalar como los factores más influyentes para propiciar el flujo de gas a lo siguientes :

Agua Libre :

El exceso de agua libre en una mezcla se separa formando bolsones o migran hacia la parte superior, disminuyendo la presión hidrostática de la mezcla, a la vez que origina un cemento de poca resistencia al esfuerzo y a la corrosión.

Lo ideal sería lograr un volumen de cemento fraguado igual al volumen de la lechada sin separación de agua libre; sin embargo, se esta obteniendo buenos resultados con lechadas que alcanzan 11 unidades de consistencia a presión atmosférica después de 20 minutos de agitación.

Este factor del agua libre es muy importante tomar en cuenta en pozos desviados o con alto grado de desviación, pues un inadecuado control podría generar el flujo de gas después de cementar (Figs. 17 y 18)

Pérdida de fluido :

Una lechada con alta pérdida de filtrado disminuye rápidamente su volumen haciendo decrecer prematuramente la presión de poros de la mezcla y/o generando

puentes(bridges) que impiden la transmisión de la presión hidrostática, coadyuvando de esta manera a la entrada de gas al anular (Fig. 18).

Los valores de pérdida de filtrado dependen de la permeabilidad de las formaciones a cubrir y su control se obtiene con el agregado de aditivos para este fin..

Alta resistencia de Gel :

Las lechadas con esta característica fácilmente dejan de transmitir la presión ejercida en el espacio anular debido a que se convierten en autosoportables favoreciendo de esta manera a la canalización del gas.

Se recomienda pues una lechada dispersa para pozos con problemas de migración de gas.

3.4 PREPARACION DEL POZO

Para lograr una cementación exitosa, se debe controlar todos los componentes del trabajo y que estos sean cuidadosamente ejecutados..

Un trabajo de cementación eficaz requiere que todo el espacio vacío se llene de cemento y que éste se fije tanto a la tubería de revestimiento como a la formación.

No hay duda que el primer paso hacia el control de la migración de gas, es una conveniente remoción del lodo de perforación durante la operación de colocación del cemento. La no remoción de todo el lodo, puede tener como resultado la presencia de una o más venas de lodo a lo largo de la tubería o la cara del pozo, que al entrar en contacto con los líquidos de la formación se convierten pronto en canales, entonces el gas podría migrar a través de estos (Fig. 18).

Para obtener una eficiente remoción del lodo se requiere:

- Una adecuada geometría en el hueco abierto.
- Buen acondicionamiento del lodo antes de cementar.
- Movimiento del casing durante el acondicionamiento del lodo y la cementación.
- Evitar reacciones de contaminación lodo-cemento.
- Un adecuado mecanismo de desplazamiento durante la cementación. Este punto por su importancia será tratado con mayor detalle más adelante.

3.4.1 Geometría del hueco abierto

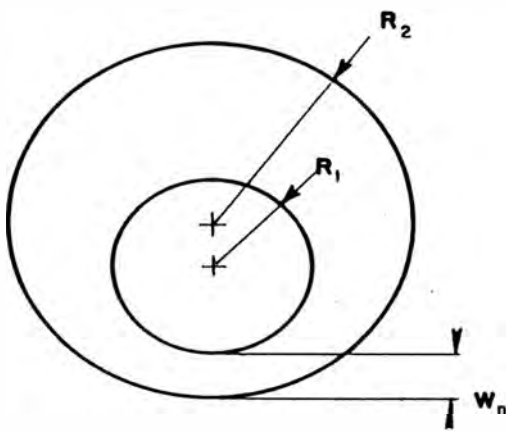
Centralización de la tubería.

Cuando la cañería no es bien centralizada las fuerzas de arrastre a través del área del flujo no son uniformes.

Esta descentralización aumenta las posibilidades de la canalización del cemento a través del lodo, al quedar éste en la parte más angosta del espacio anular.

La centralización puede ser expresada cuantitativamente por el porcentaje de Standoff. Definido por la formula:

$$\% \text{ Standoff} = \frac{W_n}{R_h - R_c} \times 100$$



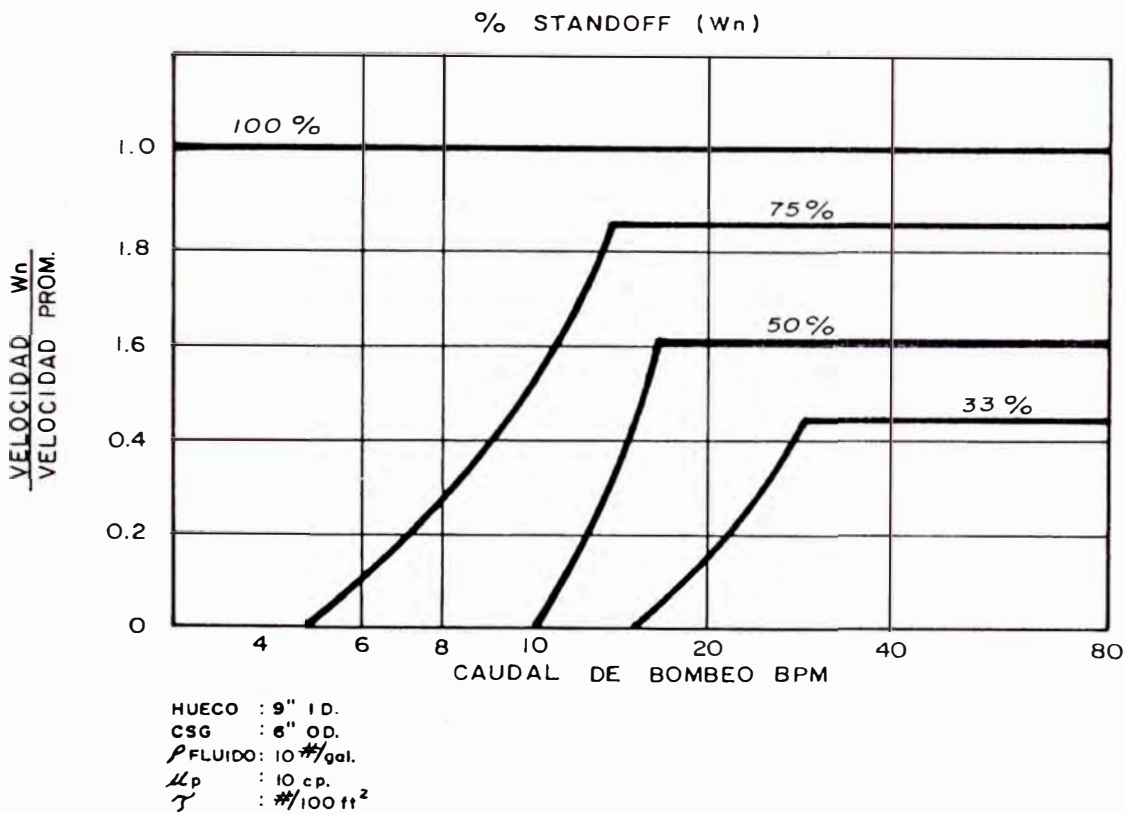
W_n= Mínima distancia entre el hueco y el casing.
R_h= Radio del hueco.
R_c= Radio del casing.

100% de Standoff significa que la cañería está perfectamente centralizada.

0 % de Standoff significa que la cañería está tocando la pared.

Investigaciones realizadas mostraron que la reducción del Standoff requiere aumentar la velocidad de bombeo para iniciar el flujo en la parte más angosta del espacio anular

.En el diagrama siguiente se puede ver dicho efecto



Ubicación de los Centralizadores.

Los centralizadores deben ser usados :

- 1) En zonas o intervalos de producción o de interés para conseguir aislamiento con el cemento.

- 2) En las zonas donde existe riesgo de fuerzas de atracción o atoramiento. Por ejemplo: zonas permeables, poco espacio anular, alta desviación, etc.
- 3) En pozos desviados para prevenir que la cañería se pegue sobre la pared.
- 4) Entre el zapato y collar flotador y en el dispositivo de doble etapa.

Los centralizadores deben ser colocados alrededor de las juntas de la cañería de tal forma que siempre corra hacia dentro o fuera del hueco. Nunca debemos empujar un centralizador porque puede atascar la cañería.

Espaciamiento entre Centralizadores

El espacio entre centralizadores es determinado por el ángulo de desviación y el Standoff deseado. El espaciamento máximo se determina por :

$$L = \left[\frac{(D^4 - d^4) Y}{3.056 \times 10^{-6} W \sin \theta} \right]^{1/4}$$

Donde :

- L = Espaciamiento entre centralizadores, pies.
- D = Diámetro exterior de la cañería, pulgadas
- d = Diámetro interno de la cañería, pulgadas.

W = Peso de la cañería, lb/pie.

O = Angulo de desviación, grados.

Y = Deflexión de descentralización, pulgadas.

$$Y = \left[R_h - R_c \right] - Wn$$

Como regla debemos usar un centralizador :

- Entre el zapato y el collar flotador.
- Dos juntas por arriba del zapato.
- Cada tubo y 100 pies arriba y debajo de la zona de interés
- Arriba y debajo del dispositivo para cementación en etapas.

3.4.2 Acondicionamiento del lodo

Esta etapa es muy importante para la cementación pues requiere conocer la incidencia de ciertos factores que afectan las características que debe tener el lodo para que sea fácilmente desplazado durante la cementación.

Estos factores son :

- 1) Densidad del lodo y efecto de flotabilidad.
- 2) Resistencia del Gel.
- 3) Caudal de circulación.

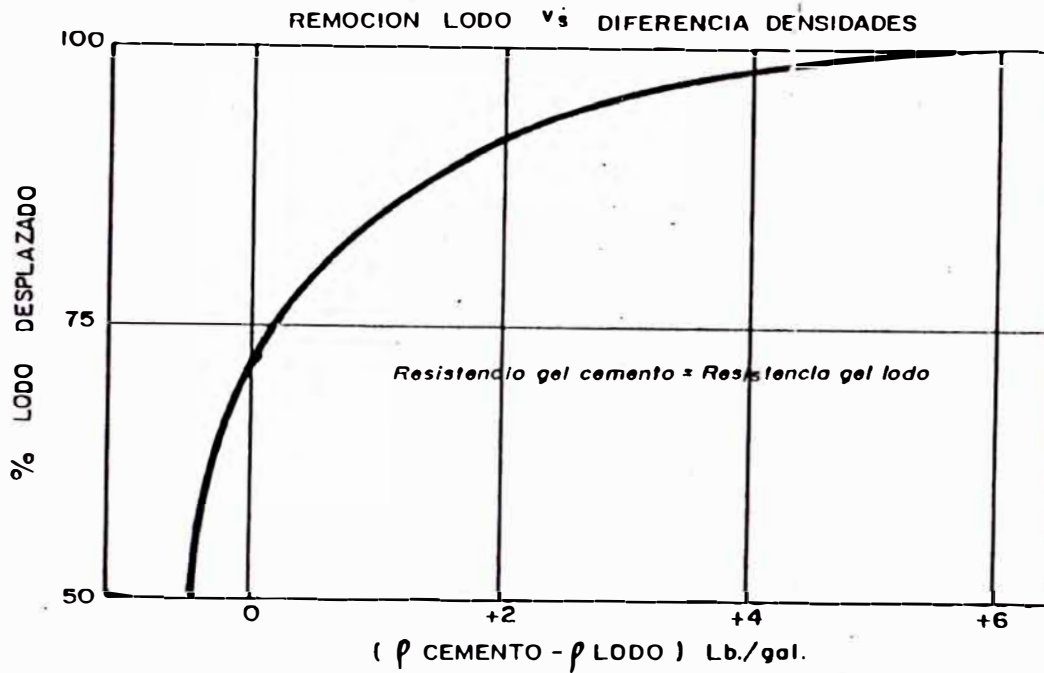
- 4) Propiedades del lodo.
- 5) Retornos.
- 6) Volumen o tiempo a circular.
- 7) Presión de circulación.
- 8) Movimiento de la cañería.

Densidad del Lodo y efecto de flotabilidad.

Una lechada de alta densidad en un lodo de baja densidad, produce una fuerza positiva de desplazamiento en el lodo causado por el efecto de flotación. Hay una tendencia para el líquido más liviano a flotar encima del líquido más denso.

La lechada de cemento siempre es programada con mayor densidad que la densidad del lodo. La diferencia de ambas densidades es un factor importante si se quiere obtener una efectiva remoción de lodo tanto en flujo tapón como con flujo turbulento.

El siguiente diagrama muestra la eficiencia en la remoción del lodo en función de las diferencias de densidad entre la lechada y el lodo. Estos valores fueron obtenidos de modelos de estudio donde la resistencia del gel de la lechada y del lodo son iguales.

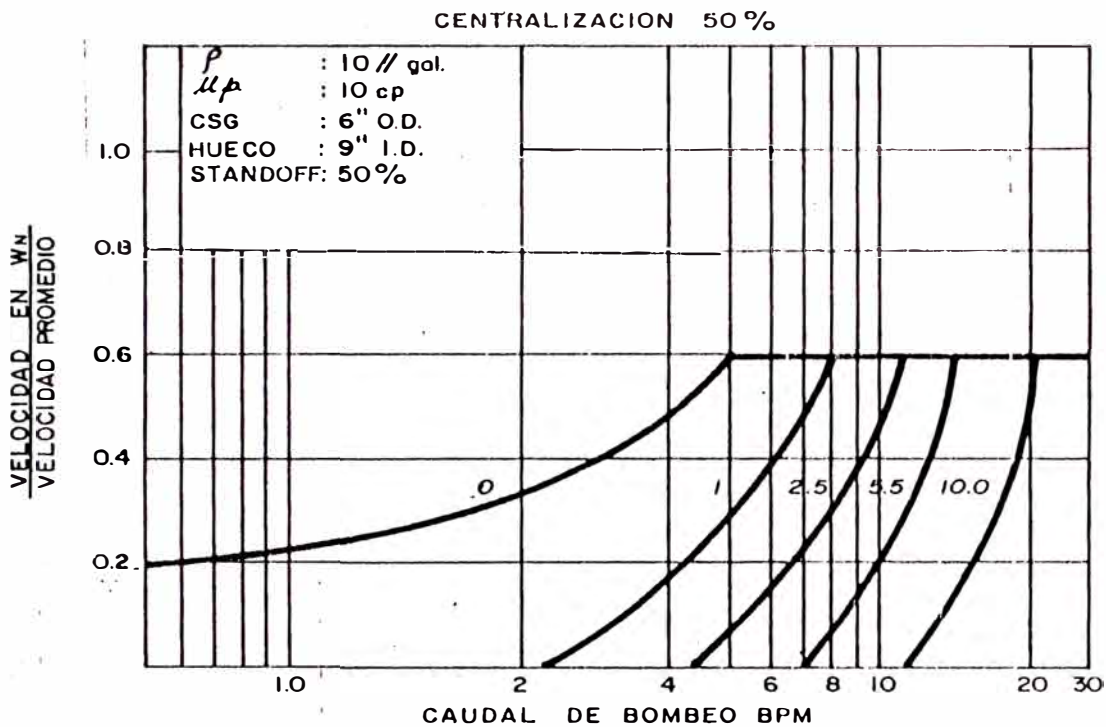


Por tanto, al acondicionar el lodo para una cementación, debemos tratar de reducir la densidad del lodo tanto como sea posible; esto nos dará una mayor diferencia de densidades y por consiguiente mayor eficiencia en la remoción del lodo.

Resistencia del Gel.

La resistencia del gel del lodo tiene fuerte influencia sobre la eficiencia del desplazamiento del lodo por el cemento.

El diagrama muestra el efecto de la resistencia del gel de un fluido sobre la velocidad necesaria para iniciar el movimiento en la parte más angosta de un espacio anular excéntrico para un Fluido Plástico Bingham con flujo turbulento.



En general la resistencia del gel debe ser reducida tanto como sea posible, para aumentar la eficiencia de la remoción del lodo.

Caudal de Circulación.

El caudal de circulación del lodo debería ser tan alto como para remover todas las escorias y masas de lodo deshidratado o gelificado; sin embargo, se debe tener cuidado en incrementar la fricción en el anular para no fracturar las formaciones.

Una buena práctica es lograr el regimen que se espera obtener durante la cementación.

Propiedades del Lodo.

Como fue dicho anteriormente es importante reducir la resistencia del gel del lodo, pero también debemos controlar algunas otras propiedades como: la viscosidad plástica, punto de cedencia, pérdida de fluido, etc., que faciliten y mejoren la remoción de este fluido.

Retornos :

Los retornos deben ser chequeados por la presencia de petróleo o gas y para verificar que no hay pérdida de circulación o un reventón subterráneo. No se debe comenzar el trabajo si alguno de estos existe.

Los retornos deben estar limpios y libres de escoria que puedan causar pegamiento de la cañería.

Las propiedades del lodo entrando y saliendo deben ser comparados. Un cambio de propiedades podría indicar, por ejemplo, pérdida de fluido dentro de una zona permeable, entrada de gas, etc.

Las propiedades deben ser medidas a la misma temperatura y deberán ser estables antes del trabajo.

Volumen o Tiempo a circular.

Debemos circular el pozo hasta que logremos las propiedades deseadas con el lodo que está saliendo. Experiencias de campo recomiendan circular por lo menos el volumen completo del hueco, chequeando que las propiedades del lodo que sale sean iguales a las del lodo que entra.

También es importante considerar que el pozo puede contener un volumen de lodo gelificado o deshidratado que no está en circulación, entonces el lodo podría pasar de largo a través de estas masas, y el cemento no podría removerlas, dejando un volumen sin cemento y resultando en un mal sello.

3.4.3 Movimiento de la tubería de revestimiento

El movimiento de la tubería, ya sea rotándola y/o reciprocándola, es necesaria para ayudar a romper la resistencia del gel del lodo y lograr una eficiente remoción de éste.

La reciprocación de la tubería es la práctica mas común y se hace generalmente en ciclos de uno o dos minutos, usando carreras de 15 a 20 pies.

La rotación permite una mejor remoción del lodo, pero es poco usual en nuestras operaciones del N.O. por el torque que se requiere sobre todo para pozos profundos.

Los rascadores, herramientas que actúan con el movimiento de la tubería, ayudan en mucho a la remoción del lodo siendo especialmente importante cuando se tiene costras de lodo gruesas y cuando se tenga que remover el lodo estático (Gelificado).

3.4.4 Aislamiento lodo-cemento

Siempre existe la posibilidad de mezclar cemento y lodo durante el bombeo y el desplazamiento.

Esta contaminación puede resultar en :

- Aceleración o retardo del tiempo de fragüe.
- Reducción de la resistencia a la compresión del cemento
- Aumento de la pérdida por filtrado.
- Formación de una masa imbombeable, etc.

Para prevenir estos problemas debe minimizarse el contacto entre el lodo y la lechada. El tapón de fondo previene la contaminación en el casing, y el espaciador líquido reduce el contacto lodo-cemento en el espacio anular.

Generalmente los espaciadores son diseñados para ser compatibles en ambos fluidos (lodo y cemento), y para actuar como un pistón, empujando al lodo hacia adelante.

Los lavadores químicos también sirven como separadores entre el lodo y el cemento, aunque su función principal es diluir y licuar el lodo para que el cemento no pueda flocular o gelificarse. Ayudan también a la remoción del lodo del espacio anular, sobre todo del adherido al casing, permitiendo de este modo una mejor adherencia entre cemento y casing.

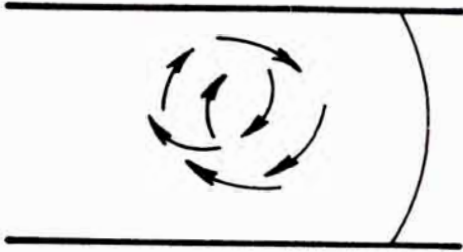
3.5 MECANISMO DE DESPLAZAMIENTO

La cementación primaria no solamente es un problema químico y de composición de la lechada, sino también de colocación del fluido en el anular.

Las técnicas actuales buscan obtener un perfil de velocidades plano de los diferentes fluidos y sus interfases, que permita un desplazamiento eficiente del fluido de perforación.

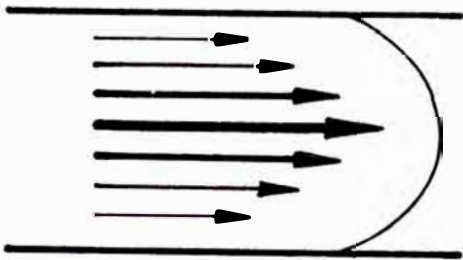
Hay dos regímenes de flujo que son aceptados por la industria como conducentes a una buena remoción del lodo. Uno es el flujo turbulento y otro es el flujo tapón.

FLUJO TURBULENTO



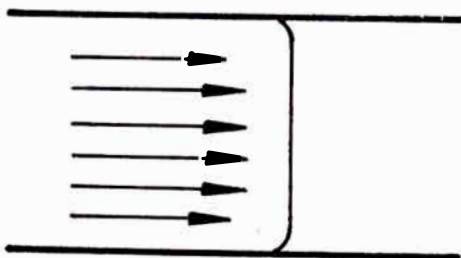
Las partículas no tienen una trayectoria recta pero el resultado es una velocidad constante .

FLUJO LAMINAR



Las partículas se mueven en línea recta con velocidad igual a cero en las paredes .

FLUJO TAPON



Las partículas se mueven en línea recta a una velocidad constante.

El que ha recibido mayor promoción es el flujo turbulento.

Como se sabe, la introducción de dispersantes para inducir turbulencia a bajas velocidades de bombeo, los lavadores químicos y espaciadores, han sido contribuciones de mayor importancia en esta técnica.

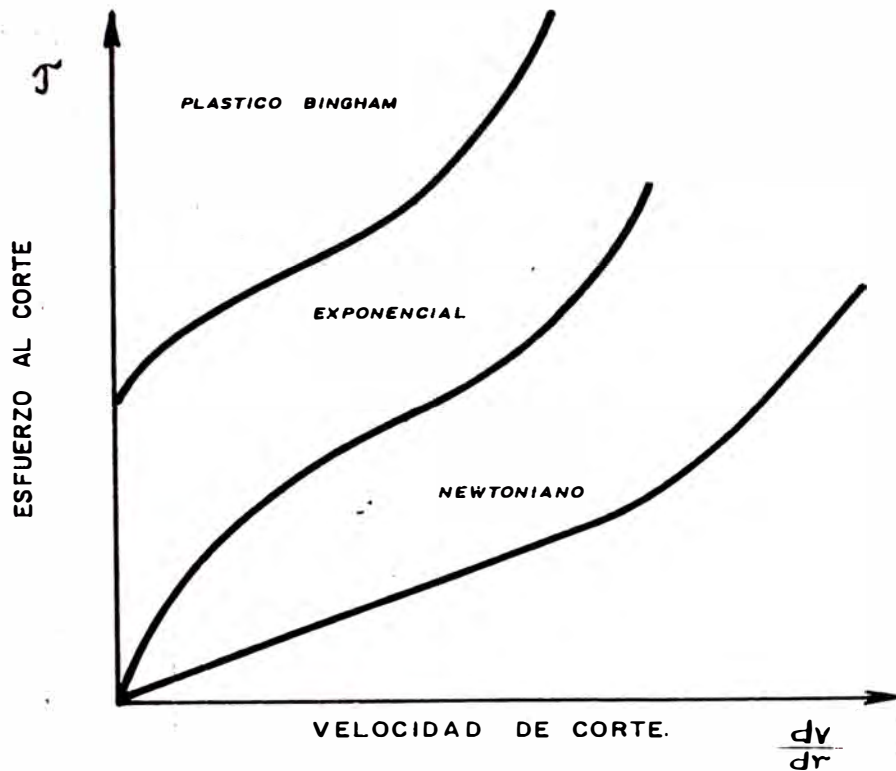
El flujo tapón es la segunda mejor alternativa y su uso se limita a casos como: espacio anular grande, formaciones con grad. de frac. pequeñas y empleo de lechadas viscosas.

3.5.1 Modelos matemáticos para evaluar el comportamiento del fluido

Tanto las lechadas de cemento como el lodo de perforación son fluidos no Newtonianos. Investigaciones realizadas para estos tipos de fluidos han permitido desarrollar modelos matemáticos que pueden ser utilizados para predecir las propiedades de flujo y la relación velocidad-presión.

Para establecer qué modelo usar, es necesario determinar en el laboratorio la relación esfuerzo de corte-velocidad de corte (con lecturas en un medidor Fann de 600, 300, 200, 100, 6 y 3 RPM), y luego establecer la comparación gráfica a curvas tipo que se muestra a continuación:

CURVAS TÍPICAS DE FLUJO



Velocidad de corte = C x RPM

C, factor de conversión según
combinación Rotor - Bob.

	B1	B2	B3
R1	1.7034	0.3769	0.2683
R2	5.4200	0.4084	0.2757
R3	0.3770	0.2703	0.2358

Esfuerzo de corte = C x fs x F RPM

C = factor de conversión

fs = cte. del resorte (1)

F RPM = lectura del dial para c/RPM.

	Dina/cm ²	Lbf/pie ²	Lbs/100 pie ²
B1	5,11	1,068 x 10 ⁻²	1.068
B2	10.09	2.108 x 10 ⁻²	2.108
B3	20.49	4.272 x 10 ⁻²	4.272

Modelo Plástico Bingham

Los fluidos que se aproximan a este modelo ofrecen resistencia (Gel Stregth) al movimiento o flujo cuando se aplica presión. Se distinguen tres regimenes de flujo :

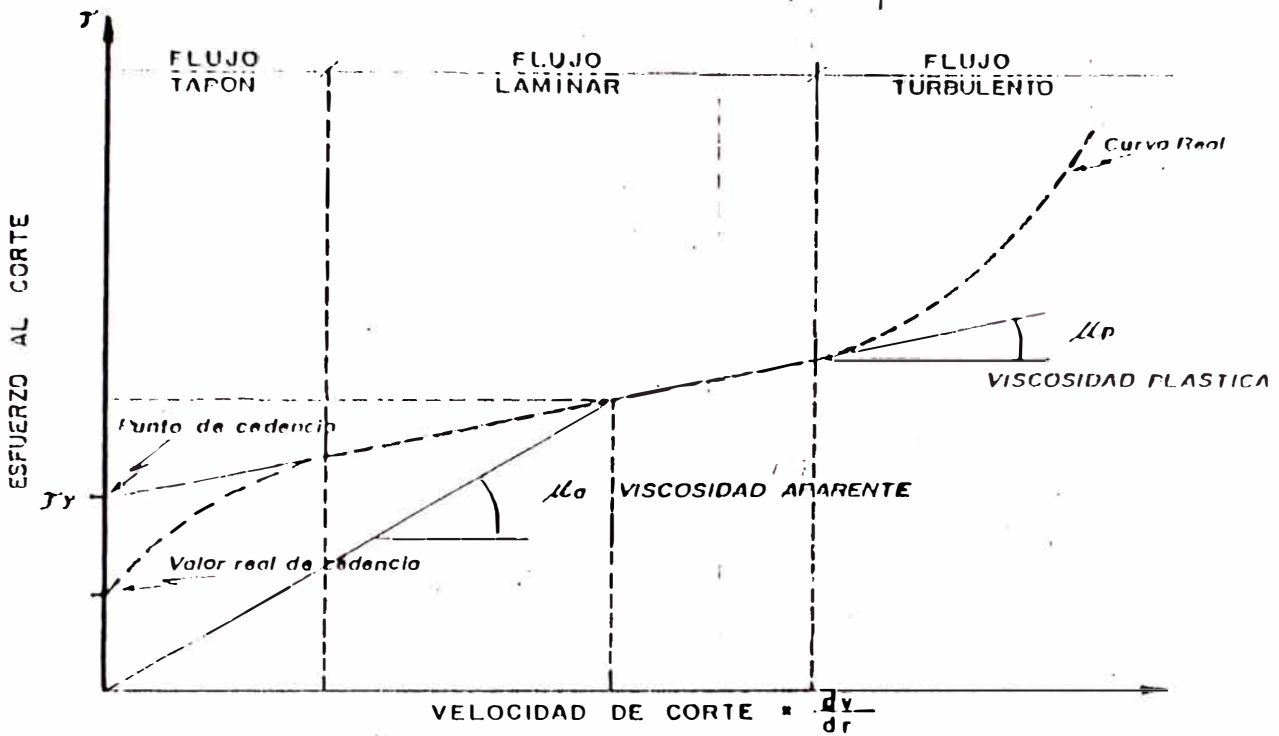
- Flujo tapón
- Flujo laminar
- Flujo turbulento

La expresión matemática del modelo viene dada por :

$$\tau = \tau_y + \mu_p \, dv/dr$$

donde :

- τ = Esfuerzo al corte
- τ_y = Pto. cedencia (Bingham Yield Point)
- μ_p = Viscosidad plástica
- dv/dr = Velocidad de corte



Modelo Exponencial (Power Law)

Los fluidos que se ajustan a este modelo tienen la característica que el Log del Esfuerzo de corte es directamente proporcional al Log de la Velocidad de corte cuando el fluido está en flujo laminar.

Los fluidos regidos por este modelo presentan dos tipos de flujo: laminar y turbulento.

La expresión matemática de este modelo es:

$$\tau = K' \left[\frac{dv}{dr} \right]^{n'}$$

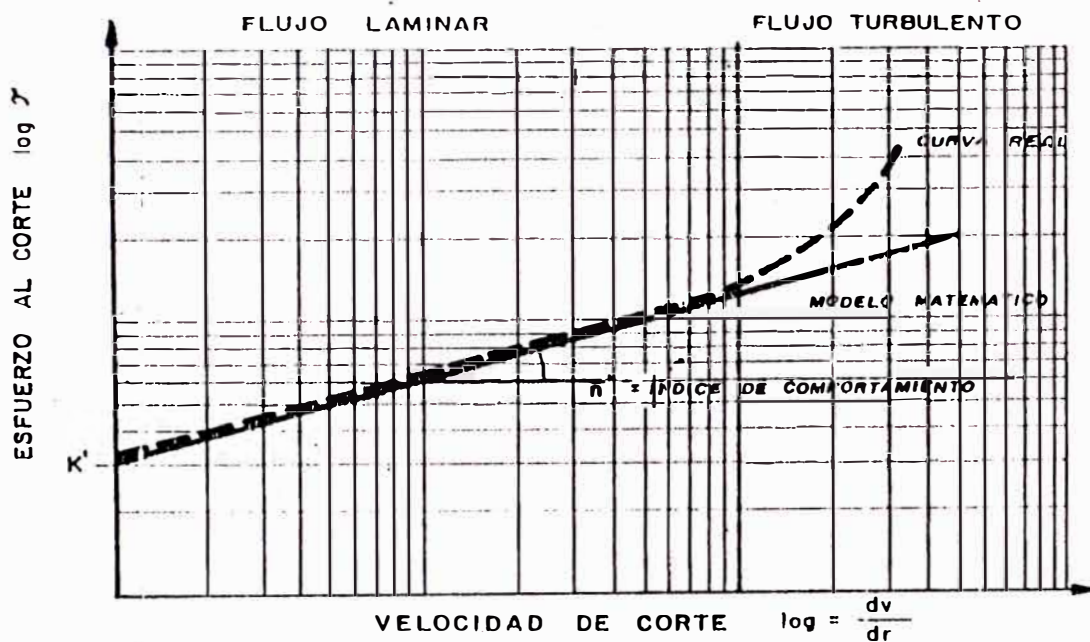
En forma logarítmica ;

$$\log \tau = \log K' + n' \log (dv / dr)$$

donde :

n' = Índice de Comportamiento

K' = Índice de Consistencia.



Cuando se usa una combinación R1 B1, un cálculo simplificado para aplicaciones de campo puede usarse para determinar los parámetros reológicos de los modelos Plásticos Bingham y Ley de Potencia, registrando únicamente dos lecturas.

LECTURAS	L 300 L 100	L 300 L 200
Visc. Plást.	$\mu_p = 1.5(L300 - L100)$	$\mu_p = 3(L300 - L200)$
Pta. de flue.	$\tau_y = L300 - \mu_p$	$\tau_y = L300 - \mu_p$
Ind. comport.	$n' = \frac{\text{Log}(L300/L100)}{\text{Log } 3}$	$n' = \frac{\text{Log}(L300/L200)}{\text{Log } 1.5}$
Ind. Const	$K' = 0.01065 \frac{L300}{(511)^{n'}}$	$K' = 0.01065 \frac{L300}{(511)^{n'}}$

3.5.2 Calculo del regimen de flujo critico

Modelo Plástico Bingham :

En este modelo se utiliza el método de Hedstrom para estimar el caudal del fluido en régimen turbulento.

El método consiste en :

a) Determinar el diámetro equivalente, D_e

$$D_e = 0.8165 (D_i - D_o)$$

D_i = Diámetro del hueco (Pulg.)

D_o = Diámetro externo Casg. (Pulg.)

b) Estimar el número de Hedstrom N_{He} :

$$N_{He} = \frac{3.7 \times 10^4}{\mu_p^2} \frac{\tau_y}{De^2}$$

τ_y = Punto de cedencia, lbf/100 pie²

μ_p = Viscosidad Plástica, cps.

c) Encontrar el número de Reynolds Crítico $N'R$ para el número de Hedstrom establecido (Figs. 19 y 20)

d) Calcular el área hidráulica, A

$$A = 0.7854 (D_i^2 - D_o^2)$$

$A = \text{pulg}^2$, D_i y $D_o = \text{pulg}$

e) Determinar el regimen crítico de bombeo, Q_c

$$Q_c = \frac{8 \times 10^{-5} \times A \times \mu_p \times N'R}{De \times \rho}$$

$Q_c = \text{BPM}$

$\rho = \text{Densidad de fluido (Lbs/gal)}$

Modelo Exponencial

En este modelo se utiliza el método de Metzner--Reed para estimar el caudal del fluido en régimen turbulento.

El procedimiento consiste :

a) Determinar el número de Reynolds Modificado Crítico (NRM) en base al índice de comportamiento n' (Fig..21)

b) Determinar el diámetro equivalente, D_e

$$D_e = 0.8165 (D_i - D_o)$$

$$D_i \text{ y } D_o = \text{Pulg.}$$

c) Calcular el área hidráulica, A

$$A = 0.7854 (D_i^2 - D_o^2)$$

$$A = \text{Pulg}^2 \quad D_i \text{ y } D_o = \text{pulg}$$

d) Determinar el regimen crítico de bombeo, Q_c

$$Q_c = 0.0742 \times A \left[\frac{0.538 \text{ NRM} \times K' (96/D_e)^{n'}}{\downarrow} \right]^{1/2-n'}$$

$Q_c = \text{BPM}$

NRM = Número de Reynold Modificado

$K' = \text{Indice de consistencia Lbf seg}^{n'} / \text{pie}^2$

$n' = \text{Indice de comportamiento}$

$\rho = \text{Densidad del fluido Lb/Gal.}$

3.5.3 Cálculo de pérdida de carga

Estimar las pérdidas de carga es muy importante en la cementación primaria, pues, su conocimiento ayuda a descartar la posibilidad de fracturar las formaciones debido al incremento de la presión por las pérdidas por fricción.

Las pérdidas por fricción son ocasionadas por dos efectos:

Fricción en las paredes F_p

Fricción entre partículas F_v

cuando el flujo es laminar $F_p \gg F_v$

cuando el flujo es turbulento $F_v \gg F_p$

La pérdida de carga por fricción está dada por :

$$P_f = \frac{0.039 * \rho * f * V^2 * L}{D_e}$$

- P_f = Pérdida de carga, psi
 ρ = Densidad del fluido, Lbs/gal.
 V = Velocidad de flujo, Pies/seg
 f = Factor de fricción
 L = Profundidad, pies
 D_e = Diámetro equivalente, pulg.

Esta fórmula es aplicable a ambos modelos matemáticos, Plástico Bingham y Exponencial.

El factor de fricción " f " es obtenida graficamente de las Figs. 21 y 22.

Flujo Tapón

Su uso se limita a cuando no se puede alcanzar el flujo turbulento, debido fundamentalmente a:

- Limitaciones de Equipo de bombeo
- Posibilidad de fracturar formaciones debido a las altas pérdidas por fricción.
- Secciones de pozos muy grandes (Washout)

El caudal para flujo tapón en fluido Plástico Bingham viene dado por :

$$Q_p = 0.0136 (D_i + D_o) (D_i - D_o)^2 \tau_y / \mu_p$$

Q_p = flujo tapón BPM

D_i = Diámetro del hueco ,pulg.

D_o = OD del Casing ,pulg.

τ_y = Punto de cedencia ,lbf/100 p²

μ_p = Viscosidad plástica ,cp.

Es muy importante tener en cuenta el tiempo de bombeabilidad de la lechada cuando se decida emplear el flujo tapón en la cementación de un pozo.

CAPITULO IV

EVALUACION DE CAMPO

En el Noroeste Peruano, el fenómeno de migración de gas después de cementar aún no ha sido tratado como tal, no obstante saber que por los tipos de reservorios de este lugar (Gas Disuelto y Gas Cap), este problema es potencial. Prueba de ello es la constante evidencia que se observa en muchos innumerables registros de cementación (CBL-VDL) y pruebas de comunicación que se han efectuados en diferentes pozos.

La forma convencional en que se cementa los pozos del N.O se basa en colocar el cemento frente a las zonas de interés después de "conseguir" la remoción del lodo, apoyándose para ello en el uso de lavadores químicos, fluidos espaciadores y desplazamiento en flujo turbulento

A mediados de 1987 se inicia la aplicación de algunas técnicas preventivas para evitar el flujo de gas después

de cementar, derivadas de la interpretación de la predicción gráfica. Anteriormente se había intentado controlar el flujo gaseoso mediante el empleo de lechadas de cemento impermeable.

A continuación describimos la evaluación de algunos trabajos de cementación, donde se puede apreciar las ventajas e importancia del uso de la Predicción Gráfica para afrontar el problema de la migración de gas en el anular.

POZO 6020 SANDINO

Este pozo perforado hasta 8770 pies ,fue exploratorio por las formaciones Muerto, Sandino, Ancha y Mesa.

Las características del pozo son:

Profundidad total	: 8770 pies
Temperatura	: 154 °F BHST, 135 °F BHCT
Diámetro prom. pozo	: 9 $\frac{3}{8}$ pulg
Entrada de gas a	: 4673' (2672 psi), 5557' (3439 psi) 5934' (3672 psi), 6775' (4404 psi) 7108' (4695 psi), 7469' (5243 psi) 7809' (5685 psi), 8000' (5907 psi) 8100' (5981 psi), 8116' (5993 psi) 8230' (6077 psi), 8724' (6442 psi)

Grado de desv : 5°@ 5760', 4°@ 8770'

Centralización : PF-7540' (77%-C/80')
7540'--6580' (0%-C/120')
6580'-sup. (No centraliz.)

Casing Prod. : 5 1/2 pulg.

En la cementación se emplearon dos mezclas de cemento de composición y características siguientes:

	<u>Mezcla I</u>	<u>Mezcla II</u>
Cemento (Sx)	893	1351
Bentonita (%)	2	-
Reductor Filt. (%)	0.6	0.5
Reductor Filt. HT (%)	-	1.0
Antiespumante (Gl/1000)	0.3	3.0
Inhib. arcilla (Gl/1000)	-	1.6
Agent. preventor del flujo gaseoso (Gl/1000)	-	20.0
Densidad (Lb/Gl)	14.7	15.6
n'	0.769	0.829
k'	0.0128	0.0025
Agua libre (cc)	NR	NR
Filtrado (cc/30 min)	250	230
Bombeabilidad (Hr:min)	3:20	3:15

Lodo acondicionado

Densidad : 14.3 Lb/Gl

μ_p : 43 cps

γ_p : 9 Lb/100 P²

El pozo fue circulado durante 7 hrs. antes de cementar usándose 50 bls de lavador químico pesado (14.5 Lb/Gl) para remover el lodo de perforación.

Las lechadas fueron colocadas con tope a 1600 y 4500 pies respectivamente, y el desplazamiento se hizo a un regimen de 9 BPM para lograr el flujo turbulento en los fluidos removedores

El registro de cementación CBL-VDL (Anexo Ia), tomado previo a la completación, muestra buena adherencia cemento-formación desde el fondo hasta +/- 7300 pies, e intercalaciones de buena y mala adherencia entre el casing-cemento para este mismo intervalo. A partir de 7300 pies hasta +/- 2900 pies (tope registrado), se nota en general una deficiente adherencia entre cemento-formación y de regular a mala adherencia entre casing-cemento.

La mala adherencia registrada podría deberse a la deficiente remoción del lodo, atribuible a una inadecuada centralización del casing.

Los trabajos de completación (Anexo Ib), por tratarse de un pozo exploratorio, se hizo en forma selectiva y siguiendo una secuencia de punzonamiento y prueba de producción, con el fin de evaluar el comportamiento productivo de cada intervalo. Las formaciones Muerto Sandino y la parte inferior de Ancha, fueron abandonadas por producir agua.

Como parte de la completación también se efectuaron pruebas de comunicación frente a la formación Sandino (Entre punzados 8044', 7990' y 7920'), con el fin de descartar un posible mal sello del cemento. Los resultados indicaron un buen aislamiento, quedando confirmado con ello la información mostrada en el registro CBL-VDL.

La Predicción Gráfica post cemento (Anexo Ic), muestra que las zonas con riesgo de entrada de gas están por debajo de 6500 pies y entre 6000 y 4600 pies.

De acuerdo a este método predictivo, no era necesario utilizar la costosa mezcla de cemento impermeable hasta 4500 pies ; bastaba con colocarla hasta 6400 pies y el

resto del pozo podría haber sido cubierta con lechadas convencionales de 15.6 y 14.7 Lb/gl. de densidad.

El pozo finalmente quedo produciendo de las formaciones Ancha y Mesa (RPI: 55x0xPUx1100 GOR), después de ser estimuladas mediante fracturamiento hidráulico.

Conviene recalcar que la escasa producción inicial podría ser consecuencia de una deficiente estimulación, derivada a su vez de la mala cementación mostrada en el CBL-VDL; la cual habría originado que tanto el fluido fracturante como el agente de sosten, hayan migrado u ocupado en su mayor parte las zonas más débiles o de menor gradiente de fractura, las que no precisamente serian las de mayor interés productivo.

POZO 7279-TAIMAN

Este pozo fue perforado hasta 8740 pies, y encontró las formaciones productivas: Cretáceo, San Cristóbal, Mogollon, Ostrea y Echino Insitu.

Las Características del pozo son:

Profundidad : 8740 pies
temperatura : 138°F BHST, 132°F BHCT
Diam. pozo : 8 1/8" (PF-8000')
10 3/4" (8000'-5000')
11 5/8" (5000'-2000')
10 1/2" (2000'-400')

Entrada de gas : 3380' (1900 psi), 4368' (2635 psi)
5818' (3570 psi), 7098' (4318 psi)
8255' (4899 psi), 8260' (5627 psi)

Grado de desv. : 1°@ 3580', 2°@ 5640', 3°@ 6245'
4 1/2°@ 7565', 4°@ 8740'

Centralización : PF-8520' (66 % C/80')
8520'-5520' (16-58 % C/120')
5520'-3000' (No centralizado)
3000'-1560' (67 % C/120')
1560'-Superf (No centralizado)

Collar dos etapas : a 5000'
Casing de Prod. : 5 1/2".Disp

La cementación se hizo en dos etapas, usandose para ello un dispositivo mecánico a 5000 pies y cuatro mezclas de cemento (2 para cada etapa), cuya composición y características fueron:

	<u>1era Etapa</u>		<u>2da Etapa</u>	
	<u>Mzcla I</u>	<u>Mzcla II</u>	<u>Mzcla III</u>	<u>Mzcla IV</u>
Cemento (Sx)	950	115	540	1060
Bentonita (%)	6	4	8	8
Red. Filt.(%)	0.65	---	0.4	0.75
Disp. Sol.(%)	0.5	---	0.5	0.5
Disp. Liq.(gl/Sx)	---	0.13	---	---
Antiesp. (Gl/Sx)	0.008	0.005	0.008	0.008
Retard.(%)	---	0.1	0.1	0.1
Agente preventor flujo gas (Gl/Sx)	---	2.5	---	---
Densidad (Lb/gl)	13.5	14.1	13.1	13.1
μ_p (Cps)	20.3	15.7	16.9	19.4
Y_p (Lb/100F ²)	3.5	2.6	0.9	2.1
Agua Libre(cc)	NR	NR	NR	NR
Filt.(cc/30min)	155	45	395	150
Bombeab.(Hr:min)	3:00	2:20	3:00	3:10

Lodo Acondicionado

	<u>1era Etapa</u>	<u>2da Etapa</u>
Densidad (Lb/gl)	13.1	11.3
μ_p (cps)	32.0	18.0
Y_p (Lb/100F ²)	7.0	10.0

Para cementar la 1ra etapa se circuló 4:30 Hrs, usándose 40 bls de espaciador para desplazar el lodo de perforación. El desplazamiento se hizo a 8.9 BPM para lograr flujo turbulento en los fluidos removedores.

Para la 2da. etapa se circuló durante 7 hrs. y se usó 30 bls de lavador químico para remover el lodo de perforación. El desplazamiento se hizo a 8.5 BPM para asegurar flujo turbulento en los fluidos removedores.

Del análisis efectuado al proceso de cementación de este pozo , se puede afirmar que por el diseño de centralización empleado, y las limitaciones para reciprocarse la tubería por los continuos agarres de ésta, no fue factible lograr una buena remoción del lodo; por tanto , no era de esperarse buena cementación. prueba de ello fue el excesivo retorno de cemento a superficie (200 sx en la 1° etapa y 300 sx en la 2° etapa) y la mala adherencia CSG-cemento y cemento-formación mostrado por el registro de cementación CBL-VDL (Anexo IIa).

Según la gráfica predictiva post cemento, elaborada en base al diseño de cementación empleada (Anexo IIb), la migración de gas en el anular era inminente por encima de 8000 pies, aún si se hubiera conseguido una buena remoción de lodo. Para la zona bien centralizada debajo

de 8000 pies ,la entrada de gas fue contrarrestada por el cemento impermeable empleado , conforme se aprecia en el registro CBL-VDL.

En la misma gráfica se aprecia también, que no era necesario cementar el pozo por etapas, pues no había riesgo de fracturar las formaciones, y el control del flujo gaseoso hubiese sido posible con alguno de los métodos descritos en el capítulo III.

En el anexo IIc se resumen los trabajos efectuados durante la completación del pozo; en él se puede apreciar lo tedioso y costoso que fue intentar resanar la cementación.

Finalmente el pozo quedó produciendo de la formación Mogollón con un aporte inicial de 128x18x1/4xSTx441 GOR.

POZO 7357 JABONILLAL

Este pozo fue perforado hasta 5380 pies, encontrando las formaciones productivas Bas.Sal., Mog. y Pariñas inf.

Las características de pozo son:

Profundidad	: 5380 pies
temperatura	: 113°F BHST, 118°F BHCT

Diam. Pozo : 8 3/8" (PF-4500'), 9" (4500'-2000')
 9 1/2" (2000'-300')

Entrada gas : 5150' (3210 psi), 5209' (3250 psi)

Grado Desv. : 2°@ 1164', 4°@ 1839', 5.5°@ 3824'
 3°@ 4518', 2°@ 5380'

Centralización : PF-4830' (85 % - C/80')
 4830'-2350' (0 % - C/120')
 2350'-1310' (No centralizado)
 1310'-1070' (0 % - C/120')
 1070'-830' (89 % - C/80')
 830'-Sup. (No centralizado)

Casing Prod. : 5 1/2"

Para la cementación se diseñaron cuatro mezclas de cemento cuyas composiciones y características fueron:

	<u>Mzcla I</u>	<u>Mzcla II</u>	<u>Mzcla III</u>	<u>Mzcla IV</u>
Cemento (Sx)	325	190	270	150
Bentonita(%)	8	6	2	0
Red. Filt.(%)	0.55	0.6	0.45	0.95
Dispers.(%)	0.5	0.5	0.5	0
Antiesp.(gl/Sx)	0.008	0.007	0.005	0.004
Densidad (Lb/gl)	13.1	13.5	14.8	15.6
μ_p (Cps)	16.7	21.1	67.1	69.3
Y_p (Lb/100P ²)	1.2	3.0	3.0	25.1
Agua Libre(%)	1.0	0.9	0.5	0
Filt.(cc/30min)	205	199	140	142
Bombeab.(Hr:min)	5:50	5:45	4:05	2:25

Lodo acondicionado

Densidad : 11.9 Lb/gl.

μp : 20 Cps.

Yp : 7 Lb/100F²

El pozo fue circulado durante 2 hrs y se usó 20 bls de lavador químico más 20 bls de espaciador delante de las lechadas de cemento. El desplazamiento se hizo a 9 BPM para obtener flujo turbulento con los fluidos removedores

Para controlar la entrada de gas determinada con el gráfico predictivo, la cementación del pozo se diseñó basado en el método de la "Variación de los tiempos de bombeabilidad de las lechadas", conforme se muestra en el Anexo IIIa; sin embargo por problemas operativos del camión cementador de la Cia. de servicios, la 4ta. mezcla solo fue bombeada el 22%, lo cual varió la presión hidrostática en el anular.

El Anexo IIIb muestra la nueva gráfica considerando el incidente descrito, y se puede observar que por encima de 5200 pies había riesgo de entra de gas.

El registro de cementación CBL-VDL (Anexo IIIc) muestra muy buena adherencia entre casing-cemento y cemento-

formación debajo de 5200 pies , y mala adherencia encima de esta profundidad.

La coincidencia del método predictivo con los resultados del registro CBL-VDL, permite afirmar que el principal factor que influyó en los pobres resultados de la cementación fue la entrada de gas del tope de la formación Basal Salinas, aunada probablemente a una mala remoción del lodo.

En el Anexo IIId, se muestra la completación y el reacondicionamiento efectuado en el pozo, donde se puede apreciar que la formación Basal Salina cubierta con buen cemento, después de la estimulación produjo dentro de lo estimado (RPI:174x1x1/4"xSFx1747 GOR) ; en cambio la formación Mogollon , mal cementada , solo dio un RPR: 17x1xPUx280GOR.

POZO 6035 HUALTACAL

Este pozo fue perforado hasta 3400 pies y fue exploratorio por las formaciones: Mogollon, Ostrea y Basal Talara.

Sus características son:

Profundidad : 3400 pies
 Temperatura : 120°F BHST, 100°F BHCT
 Diámetro : 9 1/4" (PF-1150')
 9 1/2" (1150'-203')
 Entrada Gas : No se registró
 Grad. Desv. : 2°@ 1368', 1°@ 2839'
 1 3/4°@ 3400'
 Centralización : PF-2990' (99 %-C/40')
 2990'-1270' (94 %-C/80')
 1270'-1030' (45 %-C/120')
 1030'-Sup. (No centraliz.)
 Casing Prod. : 5 1/2"

La cementación se efectuó con tres mezclas de cemento cuya composición y características fueron

	<u>Mzcla I</u>	<u>Mzcla II</u>	<u>Mzcla III</u>
Cemento (Sx)	223	271	201
Bentonita (%)	8	4	2
Red. Filt. (%)	0.9	1.1	1.05
Dispers. (%)	0.4	0.2	0.2
Antiesp. (G1/B1)	1.5	1.5	1.0
Densidad (Lb/g1)	13.1	14.1	14.7
K_p (Cps)	13.0	34.0	47.0
Y_p (Lb/100F ²)	1.0	1.0	2.0

	<u>Mzcla I</u>	<u>Mzcla II</u>	<u>Mzcla III</u>
Agua libre (cc)	2.0	2.0	2.0
Filt.(cc/30 min)	355	213	108
Bombeabil.(Hr:min)	5:10	3:50	2:55

Lodo acondicionado

Densidad : 10 Lb/gl

μ_p : 11 Cps

Y_p : 4 Lb/100P²

Para remover el lodo de perforación se circuló 3 hrs y se usó 20 bls de espaciador mecánico y 20 bls de lavador químico delante de las lechadas de cemento. El desplazamiento se hizo a 10 BPM para tener flujo turbulento en los fluidos removedores.

La cementación del pozo se diseñó utilizando la técnica preventiva de la "Variación de los tiempos de bombeabilidad de las lechadas", la cual, conforme se muestra en el Anexo IVa, controlaría la entrada de gas.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, pues, no se observa canalización de gas en el registro CBL-BDL, mostrando mas bien muy buena adherencia entre el Casing-Cemento y Cemento-Formación en casi todo el pozo (Anexo IVb).

Esta situación favoreció la completación del pozo, la cual se efectuó en un período bastante corto (Anexo IVc) no obstante haberse hecho en forma selectiva y mediante baleo y prueba de producción.

El pozo finalmente se abandonó por producir agua de todas las formaciones probadas.

POZO 7609 CARRIZO

Pozo perforado hasta 6350 pies para producir gas de la formación Mogollon y petróleo de las formaciones Ostrea Hélico y Arenas Perú

Las características del pozo son:

Profundidad	: 6350 pies
Temperatura	: 142°F BHST , 130°F BHCT
Diámetro	: 9" (6324'-5000')
	9 1/2" (5000'-3000')
	10" (3000'-1500')
	10 1/2" (1500'-323')
Entrada de gas	: 3485' (1864 psi), 5688' (3815 psi)
	5860' (3931 psi)
Grad. Desv.	: 2°@ 3000', 1 1/2°@ 4775'
	2°@ 6350'

Centralización : PF-5270' (88 %-C/90')
 5270'-2750' (55 %-C/120')
 2750'-Sup. (No centraliz.)

Casing Prod. : 5 1/2"

En la cementación se usaron 4 mezclas cuyas composiciones y características fueron:

	<u>Mzcla I</u>	<u>Mzcla II</u>	<u>Mzcla III</u>	<u>Mzcla IV</u>
Cemento (Sx.)	210	220	560	310
Puzolan. (Sx.)	215	240	---	---
Red. Filt (%)	0.42	0.45	1.1	---
Dispers. (%)	0.35	0.35	---	---
Disp. Liq. (gl/sx)	---	---	---	0.2
Retard. (%)	---	---	---	0.2
Antiesp. (gl/sx)	0.008	0.006	0.004	0.005
Agent. Imperm. al gas (gl/sx)	---	---	---	0.9
Densidad (Lb/gl)	13.1	14.1	15.6	15.6
R_p (cps)	25.7	49.5	100.9	30.3
Y_p (Lb/100P ²)	0.9	9.5	30.1	2.3
Agua Libre (%)	0.8	0.2	0.0	0.0
Filt. (cc/30 min)	315	204	65	64
Bombeab. (Hr:min)	5:00	3:15	2:00	2:25

Lodo acondicionado

Densidad : 12.9 Lb/gl

μP : 28 cps

Y_p : 3 Lb/100P²

Para remover el lodo de perforación se circulo durante 2:15 Hrs y se usó 30 bls de lavador químico más 30 bls de espaciador delante de las mezclas de cemento. El desplazamiento se hizo a 10 BPM para obtener flujo turbulento en los fluidos removedores.

El diseño de la cementación no se basó en la predicción gráfica, pero consideraba el empleo del cemento impermeable para la zona gasífera (Fm. Mogollon).

En el esquema de predicción gráfica post cemento (Anexo Va), se aprecia que el diseño ejecutado, resultó en la práctica la aplicación de algunos métodos preventivos descritos en el Cap. III del presente trabajo.

Los resultados de la cementación fueron satisfactorios observándose en el registro CBL-VDL (Anexo Vb) buena adherencia Casing-cemento y cemento-formación, en casi todo el pozo.

El pozo finalmente se completó exitosamente en la formación Mogollon (Anexo Vc), obteniéndose después de la estimulación hidráulica una producción inicial de gas de 2176 MPCD x 1/4" x SF x 1300 Psi.

POZO 6110 ALVAREZ OVEJA

Pozo exploratorio perforado hasta 7100 pies para evaluar el comportamiento productivo de las formaciones: Basal Salinas, San Cristóbal y Mogollon.

Las características del pozo son:

Profundidad	:	7090'
Temperatura	:	
Diámetro	:	9 1/2" (PF-4900')
		10" (4900'-3800')
		10 1/4" (3800'-3000')
		10 1/2" (3000'-1250')
		10 3/4" (1250'-400')
Entrada de gas	:	4174' (2236 psi), 4280' (2381 psi)
		4350' (2488 psi), 4446' (2543 psi)
		5020' (3002 psi), 5126' (3119 psi)
		5363' (3290 psi), 5697' (3555 psi)
		6605' (4190 psi), 6776' (4404 psi)
Grad. Desv.	:	1°@ 3000', 4°@ 5164' y 2°@ 7070'

Centralización : PF-6870' (99% -C/40')
 6870'-3790' (80% -C/80')
 3790'-2420' (No centraliz.)
 2420'-1220' (78% -C/120')
 1220'-900' (No centraliz.)
 900'-660' (96% -C/80')
 660'-Sup. (No centraliz.)

Casing Prod. : 5 1/2"

En la cementación se usaron 6 mezclas de cemento, cuyas composiciones y características fueron:

	<u>Mc I</u>	<u>Mc II</u>	<u>Mc III</u>	<u>Mc IV</u>	<u>Mc V</u>	<u>Mc VI</u>
Cmto. (sx)	261	170	105	370	310	375
Puzlna. (sx)	282	184	113	-	-	-
Benton. (%)	-	-	-	2	2	2
Red. Filt. (%)	0.35	0.35	0.35	0.4	0.52	0.9
Disper. (%)	-	-	-	0.4	0.3	-
Aceler. (%)	-	4.0	6.0	-	4.0	-
Antiesp. (gl/xs)	0.008	0.008	0.008	0.005	0.005	0.004
Densid. (Lb/gl)	13.1	13.1	13.1	14.7	14.7	15.6
μ_p (Cps)	16.6	15.1	18.1	40.7	55.7	51.2
Y_p (Lb/100P ²)	11.7	9.0	11.2	6.7	19.1	7.4
Agua Lib. (cc)	0.5	0.5	0.5	0.3	0.0	0.0
Filt. (cc/30min)	430	442	385	228	220	163
Bombeab (Hr:min)	5:00	4:25	3:45	2:55	1:43	1:30

Lodo acondicionado

Densidad : 12.5 Lb/gl

Kp : 24 Cps

Yp : 9 Lb/100P²

Para remover el lodo de perforación se circuló durante 4 horas y se usó 30 bls de lavador químico más 30 bls de espaciador delante de las lechadas de cemento.

El desplazamiento se hizo a 9.5 BPM para tener flujo turbulento en los fluidos removedores.

La cementación del pozo se diseñó utilizando la técnica predictiva de la "Variación de los tiempos de bombeabilidad de las lechadas de cemento" para controlar la entrada de gas registradas durante la perforación; para ello fue necesario el empleo de seis mezclas de cemento tal como se observa en el Anexo VIa.

Los resultados que se obtuvieron fueron bastante satisfactorios, observándose en el registro de cementación CBL-VDL (Anexo VIb) muy buena adherencia entre el casing-cemento y cemento-formación en casi todo el pozo, descartándose con ello la existencia de canalización de gas.

Este pozo exploratorio, actualmente se encuentra en proceso de completación.

CAPITULO V

EVALUACION ECONOMICA

Todas las técnicas preventivas para controlar el flujo de gas en el anular, desarrollado a partir de la Predicción Gráfica, a excepción de las lechadas de cemento modificado, no representa incrementos significativos en los costos de la cementación (Anexo VII), pues solo se requiere ligeras modificaciones en las propiedades físicas y químicas de las lechadas para disponer en forma efectiva de la presión anular necesaria para controlar la entrada de gas antes del fragüe del cemento.

Las lechadas de cemento modificado o impermeable, son técnicas nuevas que han demostrado ser eficientes para controlar la entrada de gas; sin embargo, la complejidad química de éstas lo hacen costosas, limitando su uso a casos especiales.

En los Anexos VIII y IX se puede apreciar la incidencia de la cementación, tanto en los costos de completación como en el desarrollo de reservas.

Los buenos resultados de cementación, obtenidos en el Noroeste con los métodos preventivos de la Predicción Gráfica, no solamente nos ha permitido ahorrar costosos gastos en reparaciones o cementaciones forzadas, sino que en muchos casos ha hecho posible una correcta y económica evaluación, tanto de pozos exploratorios como de desarrollo.

Por otra parte; tal vez lo más importante desde el punto de vista económico, es la disminución del riesgo de perder las reservas encontradas, ya sea por una deficiente estimulación del pozo y/o interconexión con zonas indeseables (agua/gas), como consecuencia del mal confinamiento de las formaciones productivas por el cemento del espacio anular.

En el Anexo X, se presenta en forma simple y objetiva la evaluación económica de este nuevo método de cementación donde puede apreciarse los grandes beneficios económicos que se logra con su correcta aplicación. ...///

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los campos del Noroeste Peruano, en su mayor parte están conformados por yacimientos de Gas en Solución y Gas Cap que contienen hidrocarburos gaseosos de bajo peso molecular, lo que constituye un serio problema de migración de gas durante los trabajos de cementación primaria.
2. La mayoría de las investigaciones experimentales sostienen que el gas no invade la matriz del cemento mientras que la presión poral de éste permanezca encima de la presión de formación.
3. La presión poral del cemento disminuye principalmente por la disminución del volumen interno de la lechada durante el proceso de hidratación química de ésta y a la pérdida de filtrado.
4. Las lechadas de cemento, durante la hidratación, pasan a través de un estado físico en el cual no se comportan ni como fluidos ni como sólidos. Durante este estado, las lechadas no transmiten completamente la presión hidrostática.
5. No hay duda que el primer paso hacia el control de la migración de gas, es una conveniente remoción del lodo

del perforación. Si esto no es logrado, cualquier técnica para prevenir el flujo gaseoso después de cementar no tendrá éxito.

6. La técnica de predicción gráfica, desarrollada en base a una explicación válida para el fenómeno de la migración del gas en el espacio anular (El Gradiente Hidrostático de una columna de cemento se revierte a un gradiente hidrostático igual al de su agua de mezcla, durante el proceso de hidratación y antes de que alcance el fragüe inicial, a partir del cual el cemento desarrolla una estructura suficiente para prevenir la intrusión del gas), permite anticipar al ingeniero de cementación el (los) lugar(res) donde existe la posibilidad de intrusión del gas después de cementar. Este método gráfico se usa además para seleccionar la mejor técnica preventiva para controlar la migración de gas en el anular.

7. El empleo del método de la predicción gráfica, y la correcta aplicación de algunas técnicas preventivas del flujo gaseoso, ha dado buenos resultados en las cementaciones primarias de pozos del Noroeste Peruano.

8. Las técnicas preventivas, a excepción de las lechadas de cements modificadas no incrementan mayormente los costos de una cementación convencional (<10%); Sin

embargo los resultados que se derivan de su correcta aplicación, sí, reducen significativamente los costos de completación y aseguran el desarrollo de las reservas encontradas.

9. Por las mejoras obtenidas en la cementación primaria de algunos pozos del Noroeste Peruano mediante el empleo de la predicción gráfica y algunas técnicas preventivas tratadas en el presente trabajo, se recomienda continuar con el método predictivo del flujo gaseoso y el desarrollo de las demás técnicas preventivas.

10. Considerando los gastos de completación y pérdidas de reservas que representan una deficiente cementación primaria en los pozos del Noroeste Peruano, se debe instaurar como norma la toma del registro caliper en todos los pozos que se perforen, a fin de optimizar los diseños de cementación mediante la correcta aplicación de las técnicas preventivas.

BIBLIOGRAFIA

Gas flow in cements - P.R. Cheung and Robert M. Beirute
SPE the Western Co. of North America.

Critical Design Parameters to Prevent Gas Invasion During
Cementing Operations- C.E. Hasnister, G.E. Shuster L.A.;
Woodriddle and M.J. Jones- Dowell Division Chemical
U.S.A. and A.G. Birch Dowell Schlumberger

Técnica efectiva para cementación primaria en pozos de
gas Hywel P. Evans . Dowell Schlumberger

Annular Gas Flow After Cementing- A look at practical
Dennis C. Levine , Eugene W. Thomas H.P. Bezner - Members
SPE - AIME, Exxon Company and Glen C. Tolle Texas A&M
University

Transition time of cement slurries between the fluid and
set states: Fred L. Sabin, John M. Tinsley and David L.
Sutton, Halliburton Service.

The relationship of thickening time, gel strength, and
compressive strengths of oilwell cements- Fred L. Sabins
and David L. Sutton , Halliburton Services.

Cementing Book : Cia Dowell Schlumberger

TABLAS, FIGURAS, ANEXOS

TABLA I

RESUMEN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

<u>Ensayo</u>	<u>Tipo Mezcla</u>	<u>Pres. Hidrost P 1 (psi)</u>	<u>Pres. Hidrost. P 2 (psi)</u>				<u>Grad Hidrost. (Lb/gal)</u>			
			<u>Tiempo (Hrs)</u>				<u>Tiempo (Hrs)</u>			
			<u>0</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>0</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>
A	Clase "H" 16.4 #/gl	15	24	20	18	10	14	8	5	0
B	Clase "H" 16.4 #/gl	150	159	156	153	142	14	9.6	5	0
C	Clase "H" 16.4 #/gl Sat. con sal	15	25	23	22	21	16	13	11	10
D	Clase "H" 16.4 #/gl Sat. con sal	150	159	157	156	155	14	11	9.6	8
E	Clase "H" 13.1 #/gl 8% Gel	15	23	21	19	19	13	10	6.4	6
F	Clase "H" 13.1 #/gl 8% Gel	150	158	156	151	130	13	10	1.6	0

TABLA II

COMPARACION DE LA PRESION ACTUAL EN EL ESPACIO ANULAR
VERSUS LA PRESION PREDICHA DESPUES DE CEMENTARSE

<u>Pozo</u>	<u>Desbalance Predicho (psi)</u>	<u>Presión real espacio anular (psi)</u>
A	152	133
B	2060	1955
C	571	500

ENSAYO DE LABORATORIO

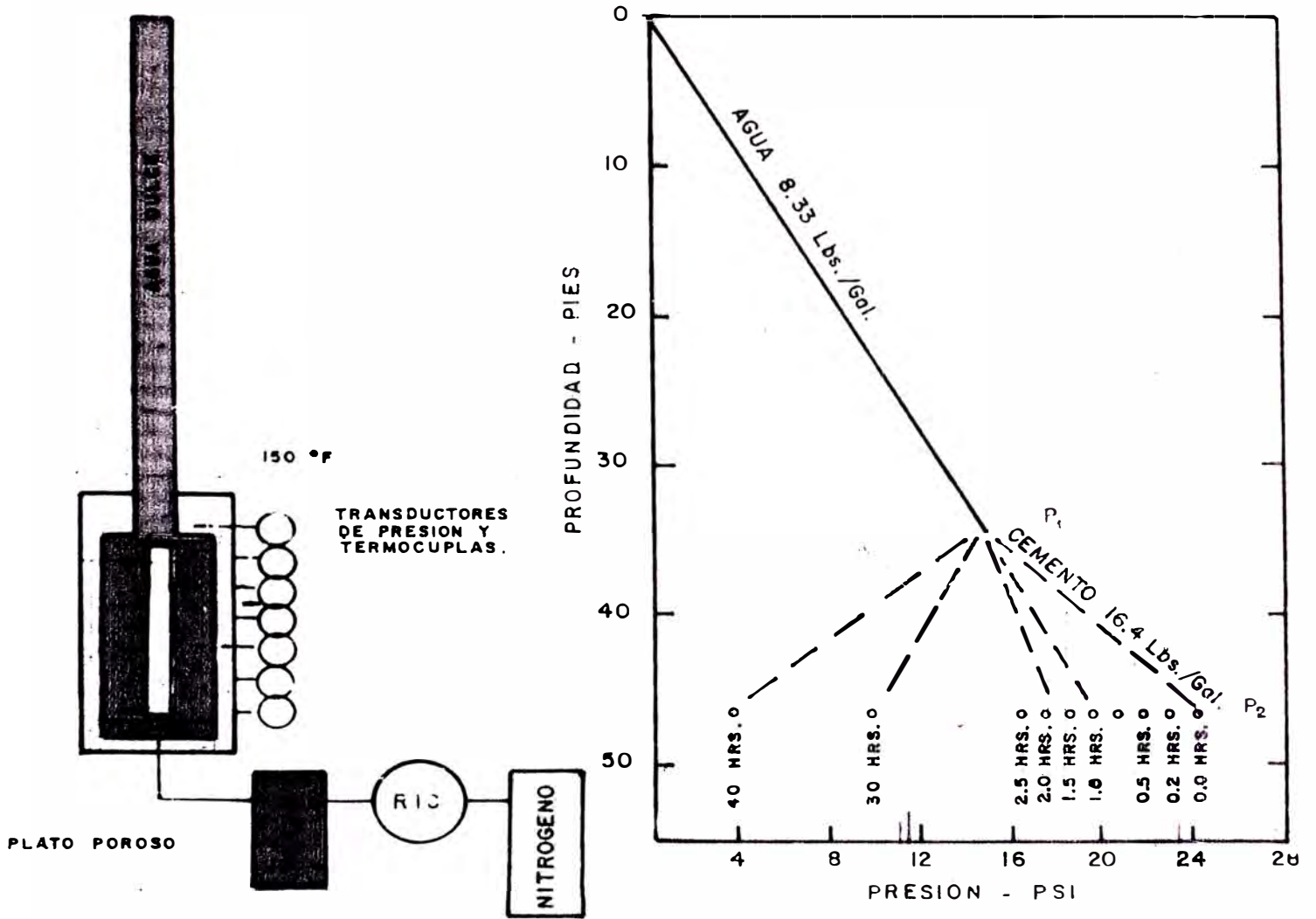


FIG. Nº 1 : APARATO DE ENSAYO.

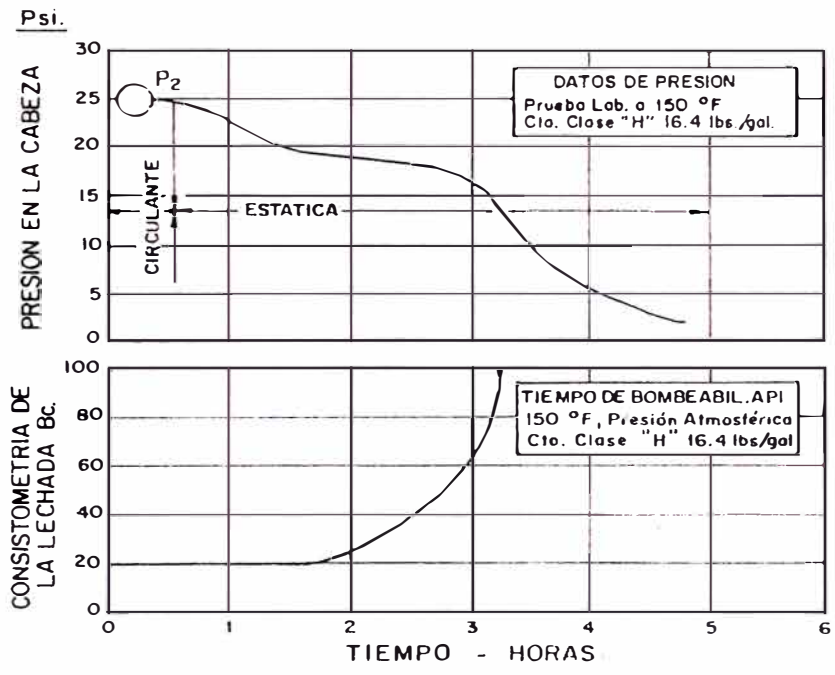


FIG. N° 2. - PRUEBA DE LABORATORIO DEL FLUJO ANULAR GASEOSO.

Hidratación del cemento y transmisión de presión

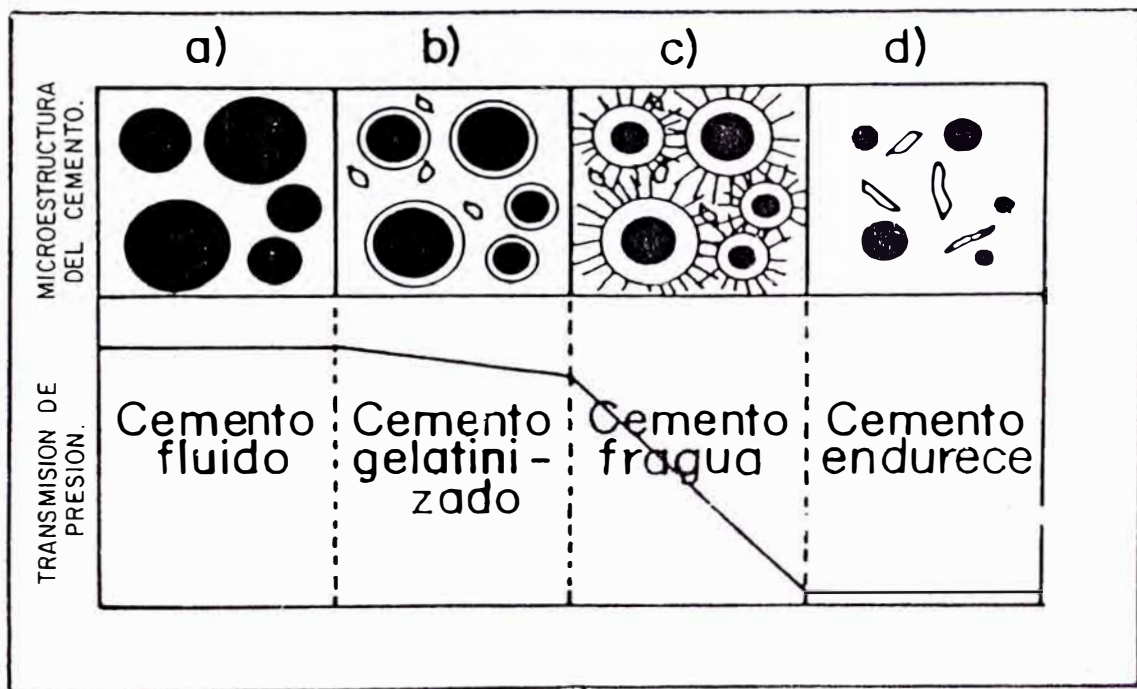
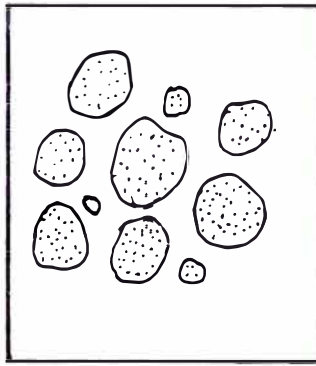
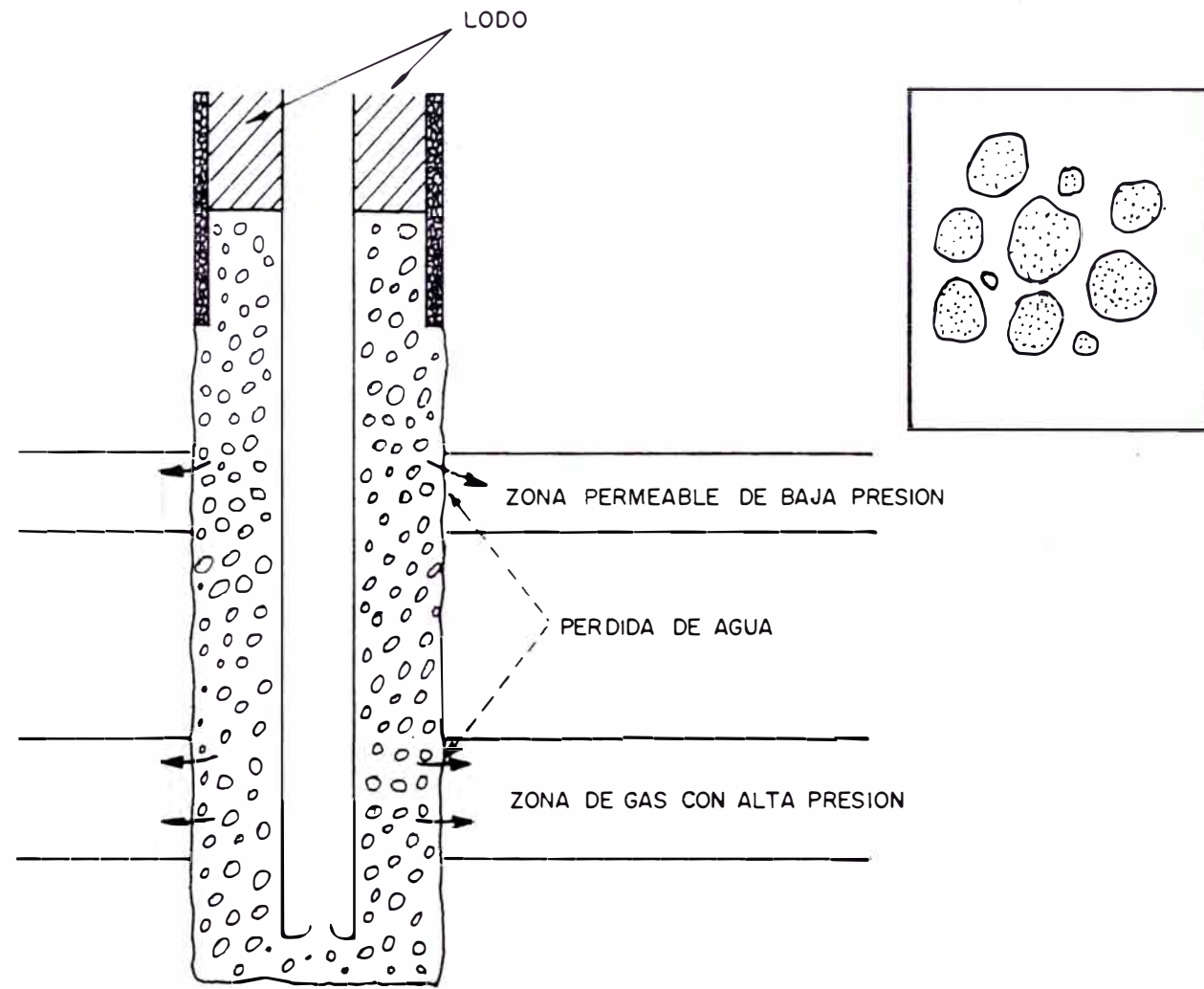


FIG. 3



PRESION HIDROSTATICA > ZONA DE GAS CON
 DEL FLUIDO INICIAL ALTA PRESION → NO PASO DE GAS

FIGURA 4

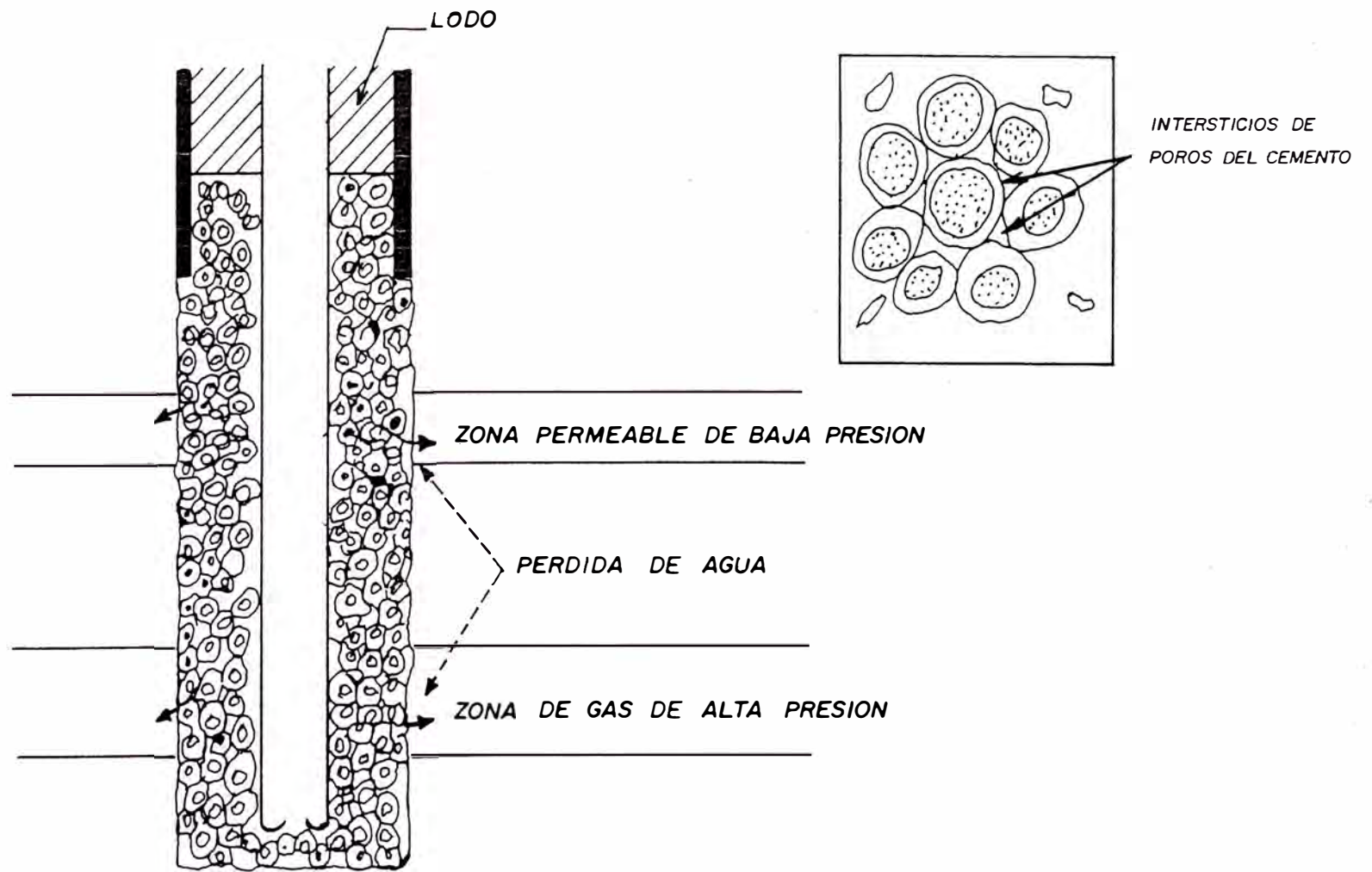
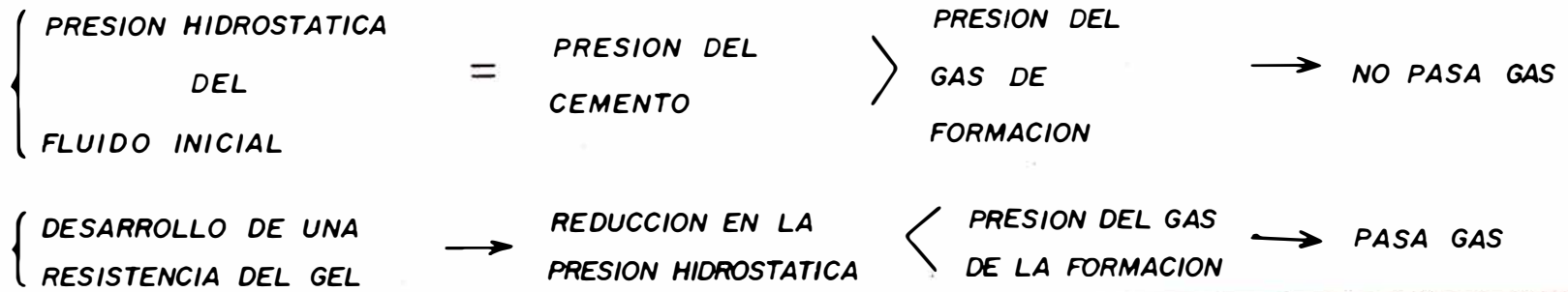
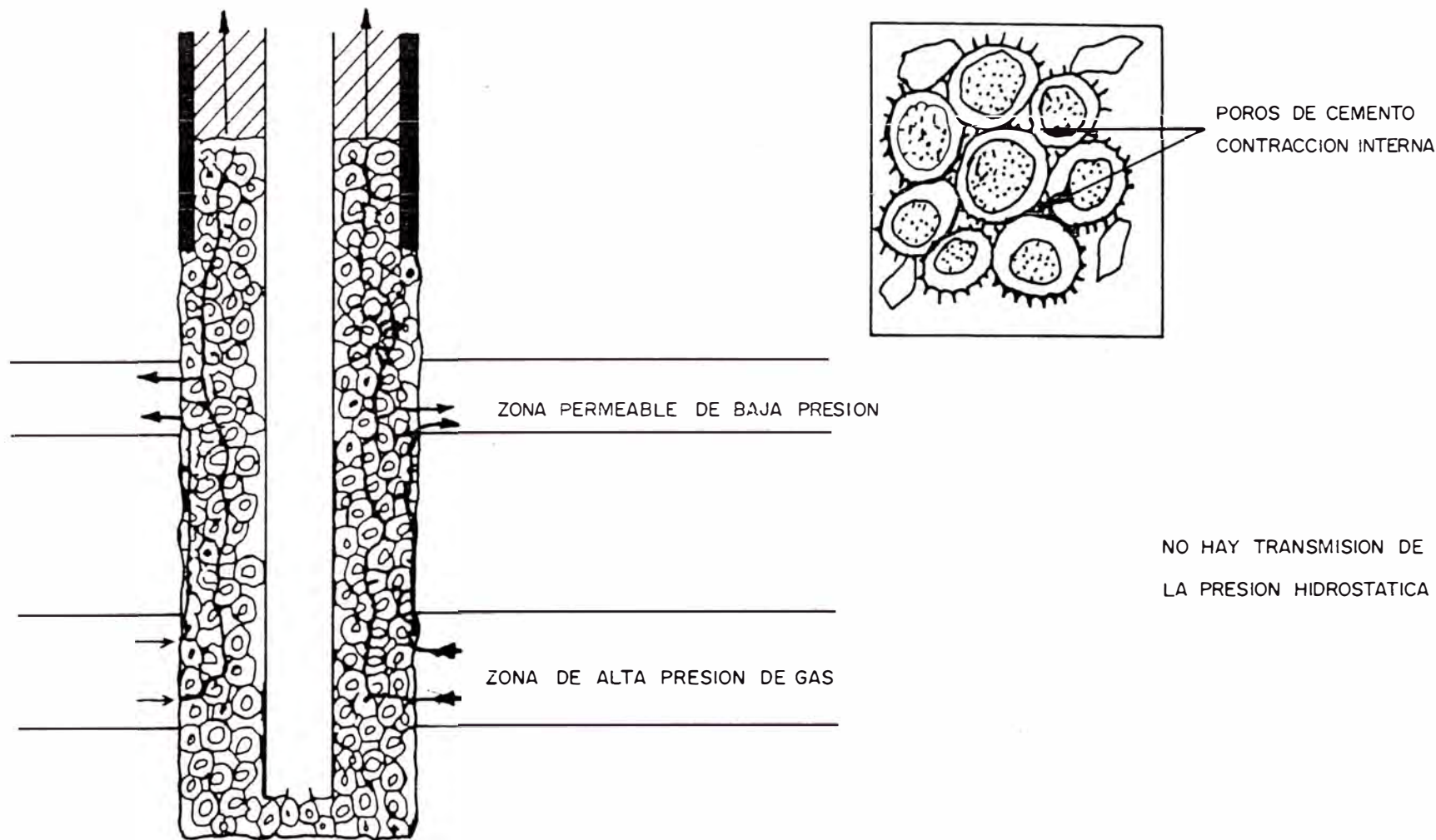
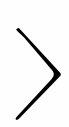


FIG. 5





PRESION HIDROSTATICA
DEL FLUIDO INICIAL



PRESION DEL POROS
DE CEMENTO



ZONA DE GAS CON
ALTA PRESION

FIGURA 6

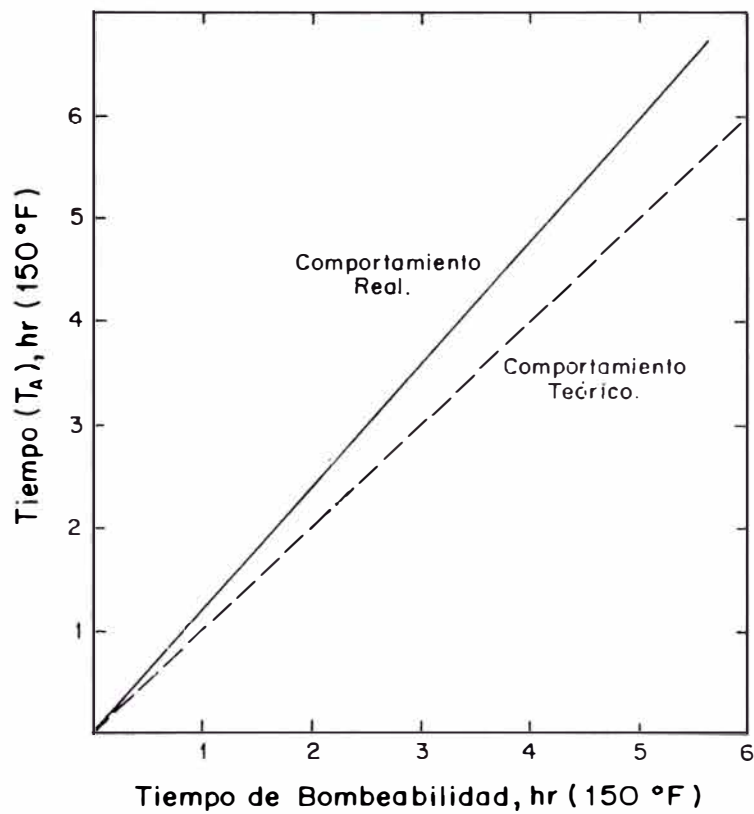


FIG. 7.- Relación entre el Tiempo de Bombeabilidad y el Tiempo en que la lechada pierde 5 % de su presión original.

PREDICCIÓN GRAFICA

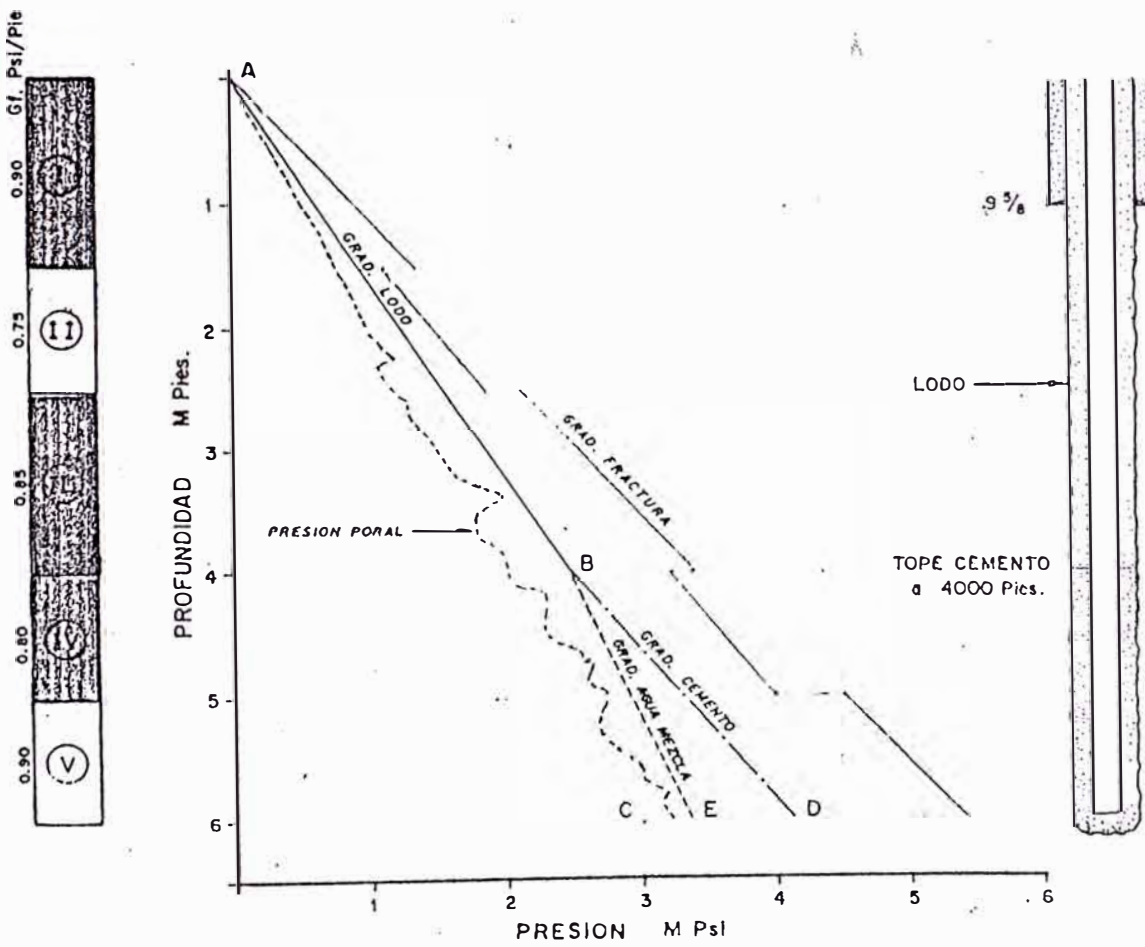


FIG. 8 : PRESION VS. PERFIL DE PROFUNDIDAD

1.- AJUSTE DE LA ALTURA DEL ANILLO DE CEMENTO

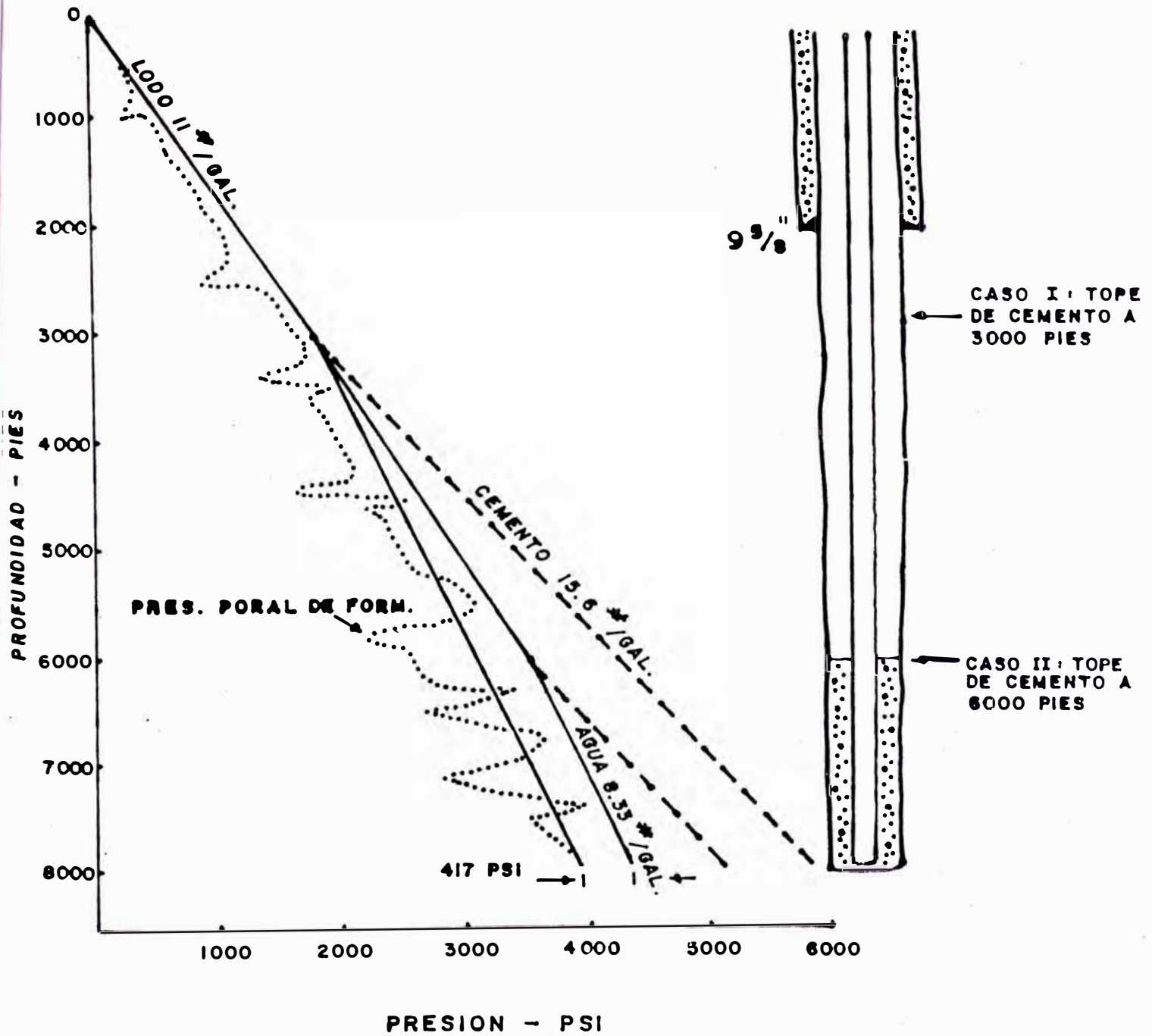


Fig. N° 9: COMPARACION DE AJUSTES DE ALTURA DE COLUMNA DE CEMENTO.

2.- VARIACION DE LOS TIEMPOS DE BOMBEABILIDAD DE LAS LECHADAS

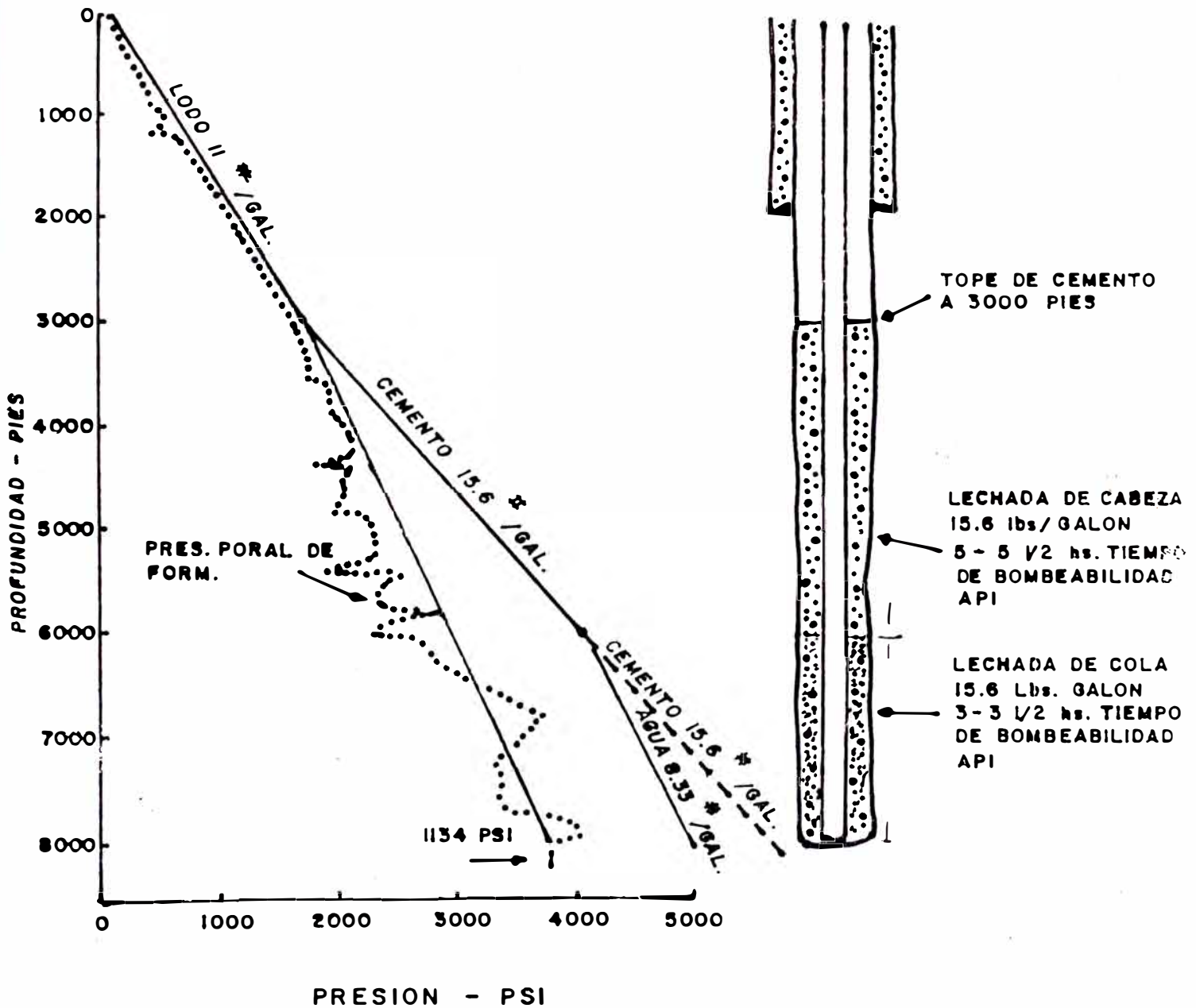


Fig. N° 10: CEMENTACION CON DOS MEZCLAS DE DIFERENTES TIEMPOS DE BOMBEABILIDAD.

3.- APLICACION DE PRESION SUPERFICIAL EN EL ESPACIO ANULAR CEMENTADO

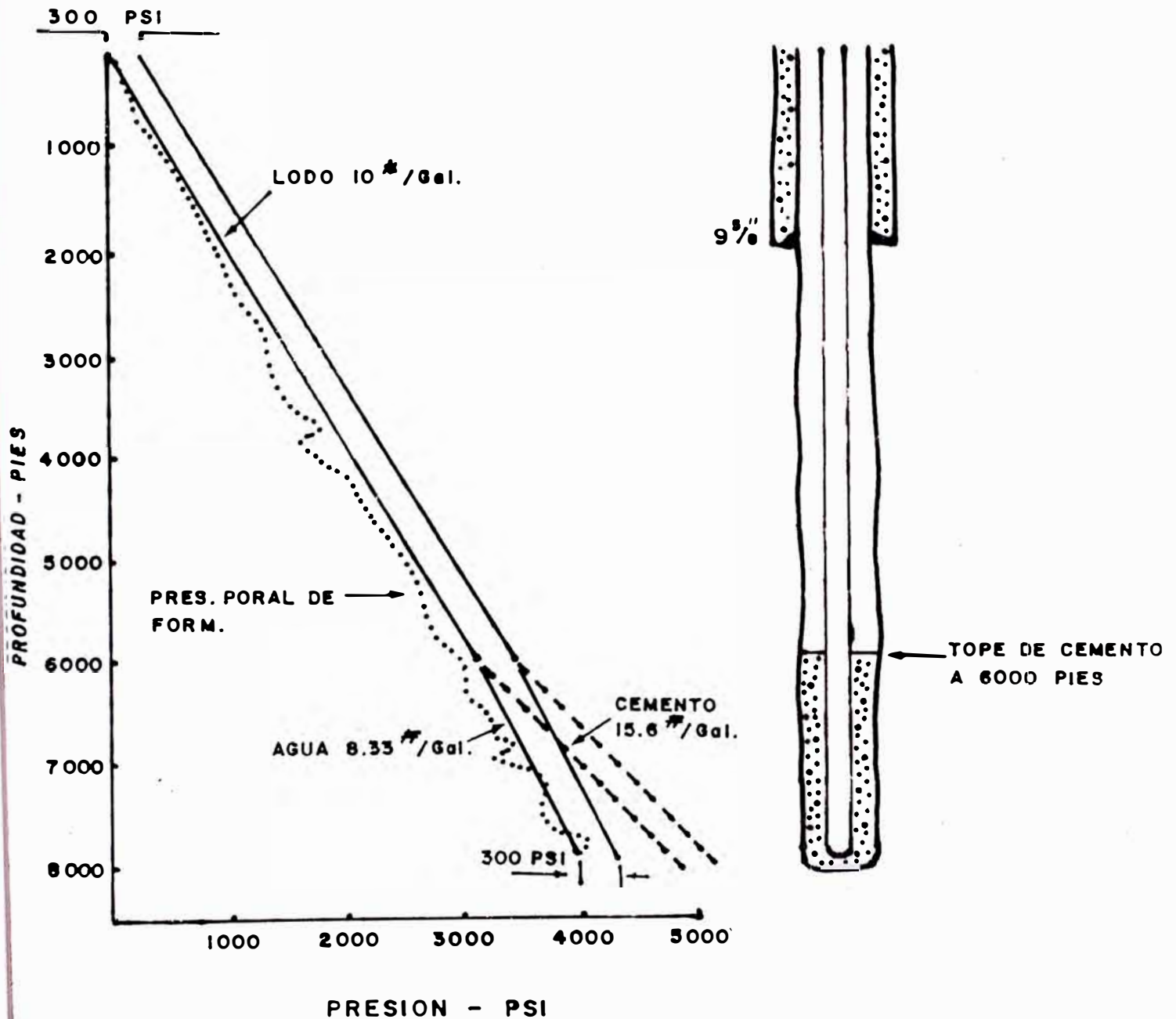


Fig. N° 11: APLICACION DE PRESION EN SUPERFICIE INMEDIATAMENTE DESPUES DE CEMENTAR.

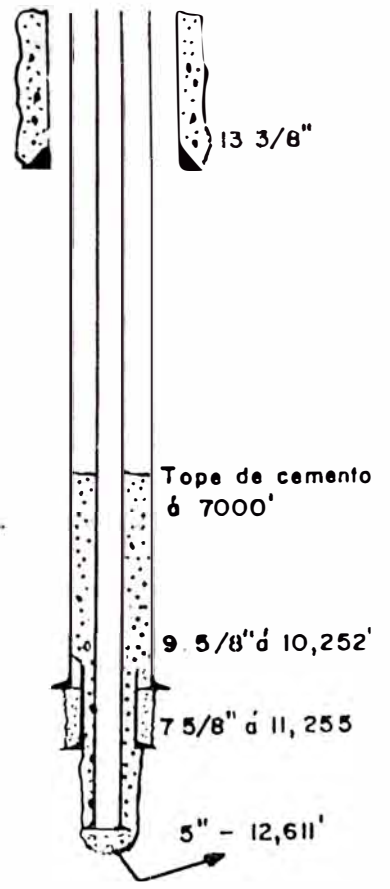
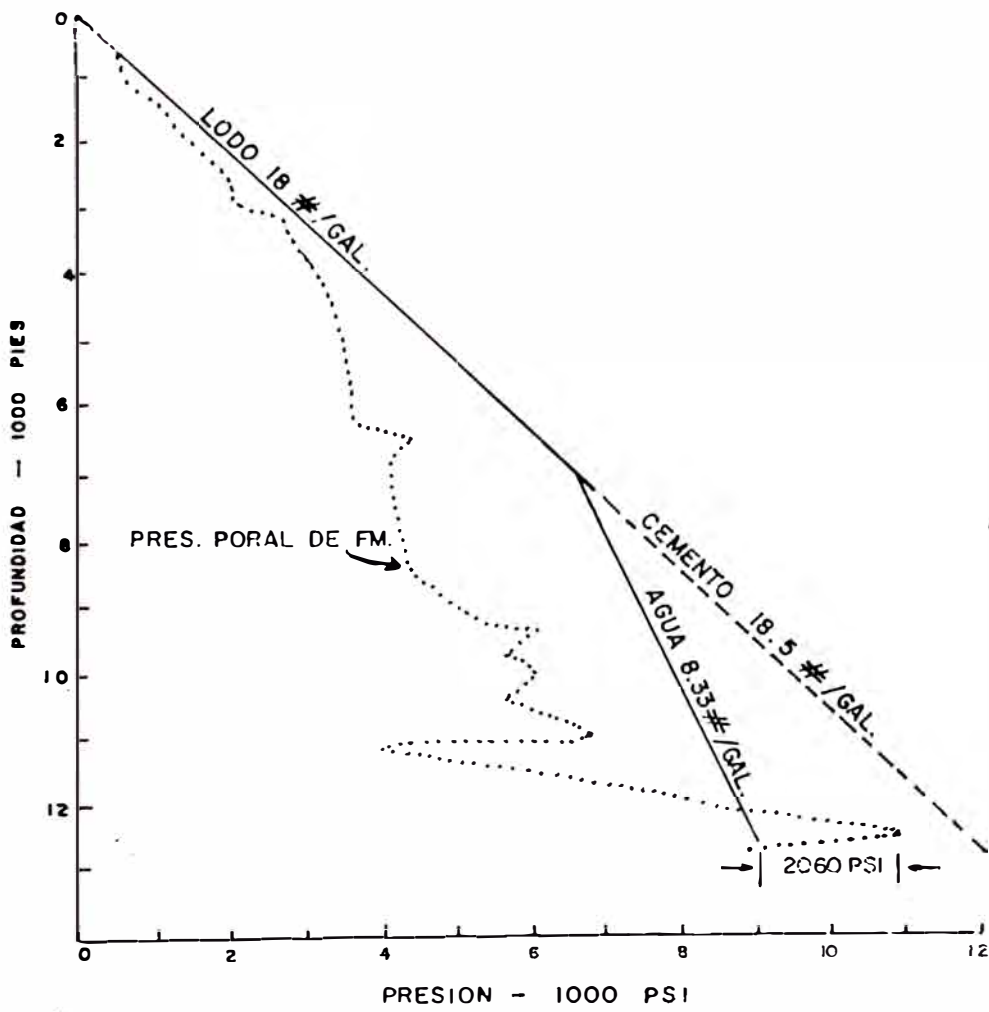


FIG. Nº 12.- PRESION VS. PERFIL DE PROFUNDIDAD.

4.- INCREMENTO DE LA DENSIDAD DEL LODO EN EL ANULAR

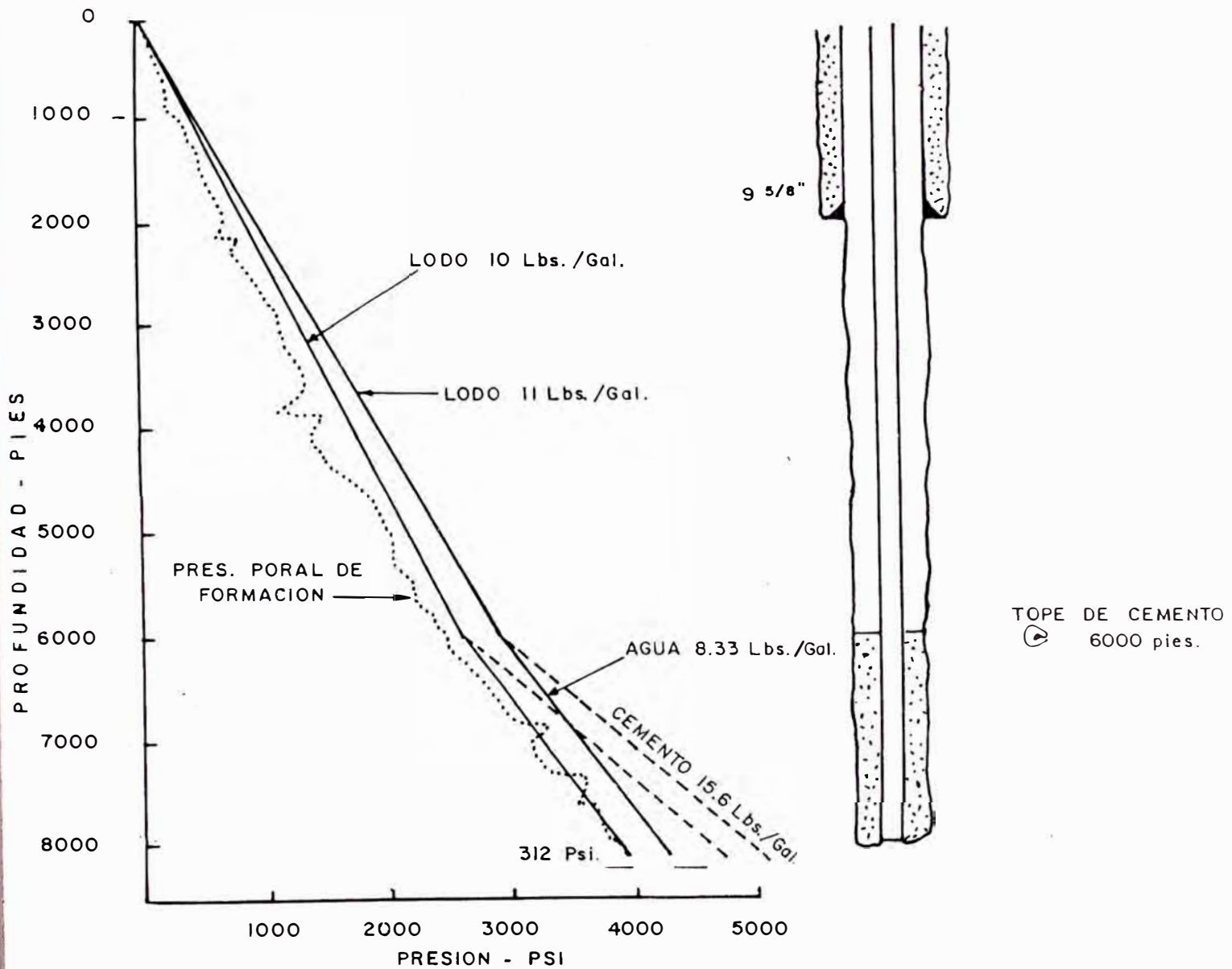


FIG. Nº 13 : INCREMENTO DE LA DENSIDAD DEL LODO EN EL ESPACIO ANULAR ANTES DE CEMENTAR.

5 - CEMENTACION EN ETAPAS MULTIPLES

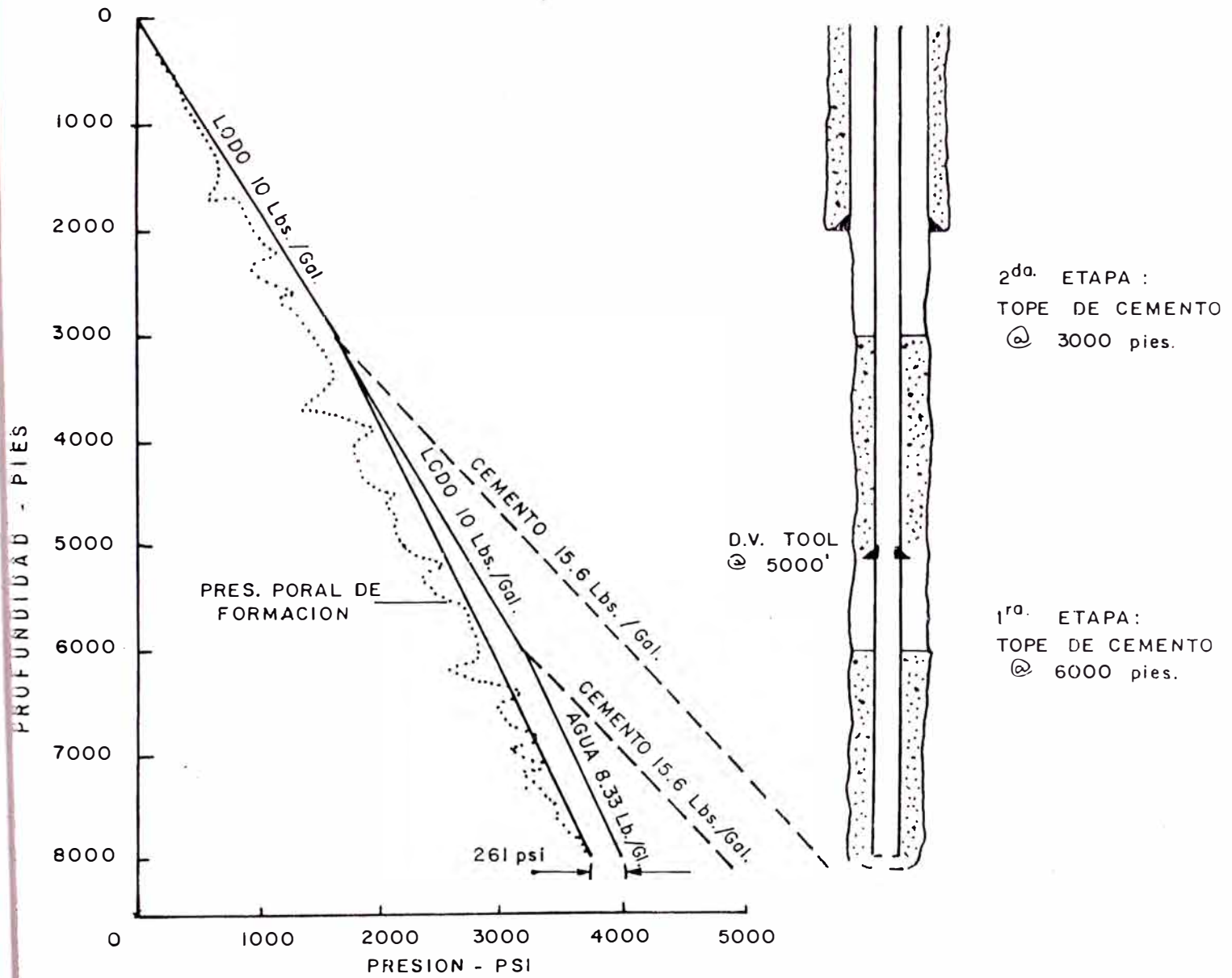


FIG. Nº 14.- CEMENTACION EN MULTIPLES ETAPAS.

6.-INCREMENTO DE LA DENSIDAD DEL AGUA DE MEZCLA DE LA LECHADA DE CEMENTO

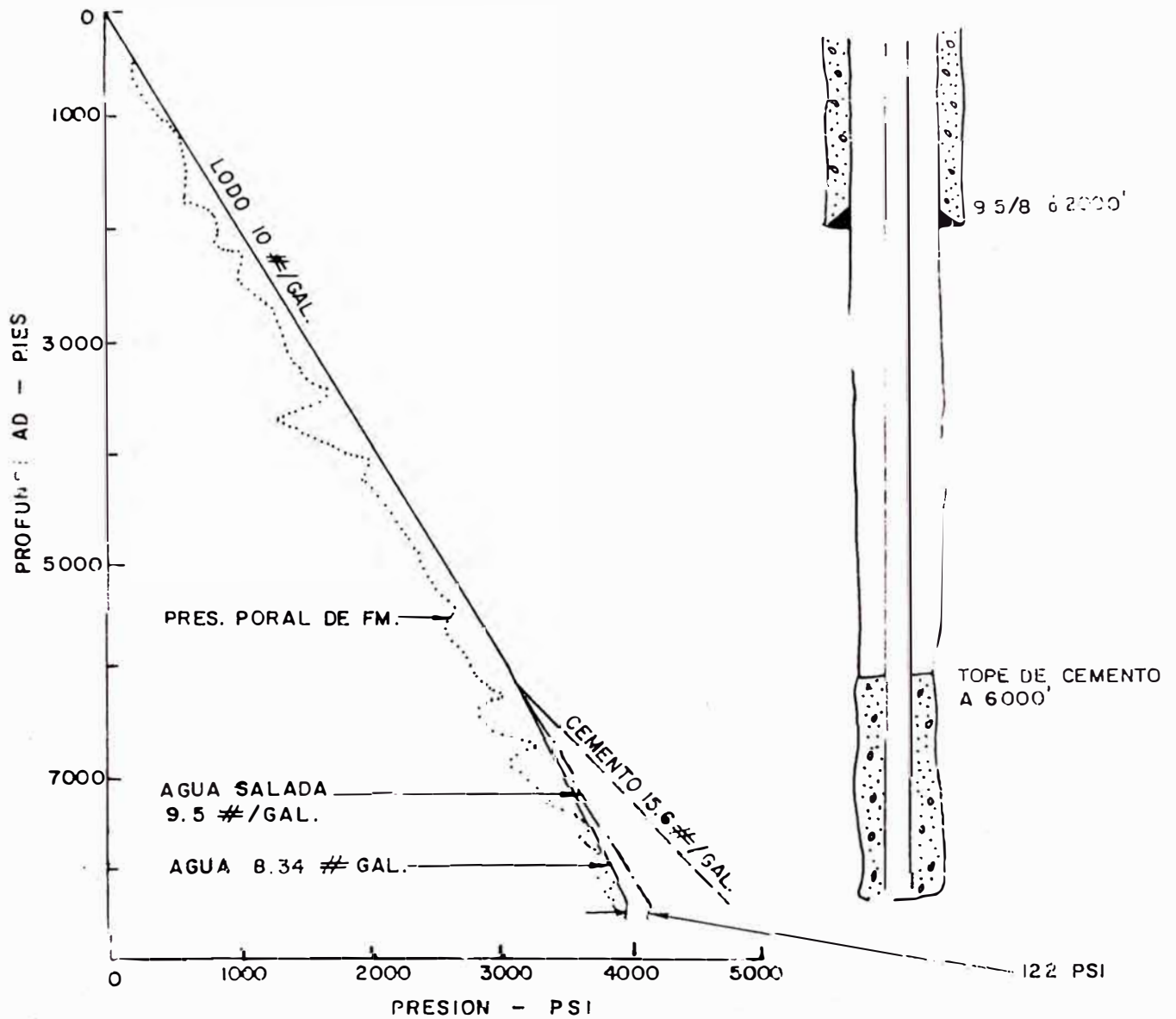


FIG. 15.- LECHADA SATURADA EN SAL VS. LECHADA CON AGUA DULCE.

7.- LECHADAS DE CEMENTO MODIFICADO

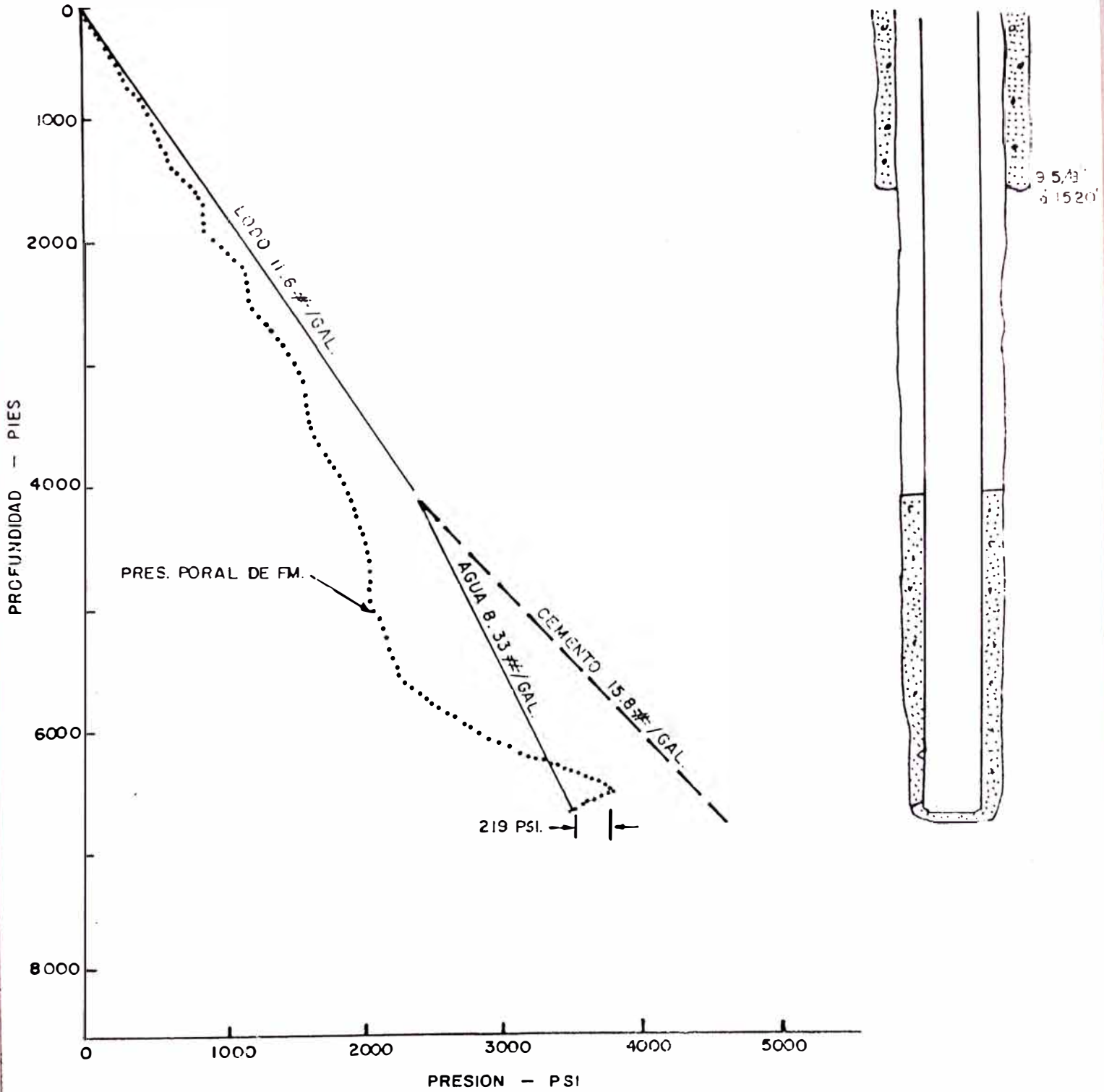


FIG. 16.- LECHADA DE CEMENTO MODIFICADO.

SEPARACION DE AGUA LIBRE

EL AGUA LIBRE DE LA LECHADA SUBIRA AL LADO SUPERIOR DEL POZO
EL AGUA FORMARA UN CANAL CONTINUO EJERCIENDO SOLAMENTE UNA
PRESION HIDROSTATICA IGUAL A LA DEL AGUA
ESTO PUEDE RESULTAR EN EL FLUJO DE GAS

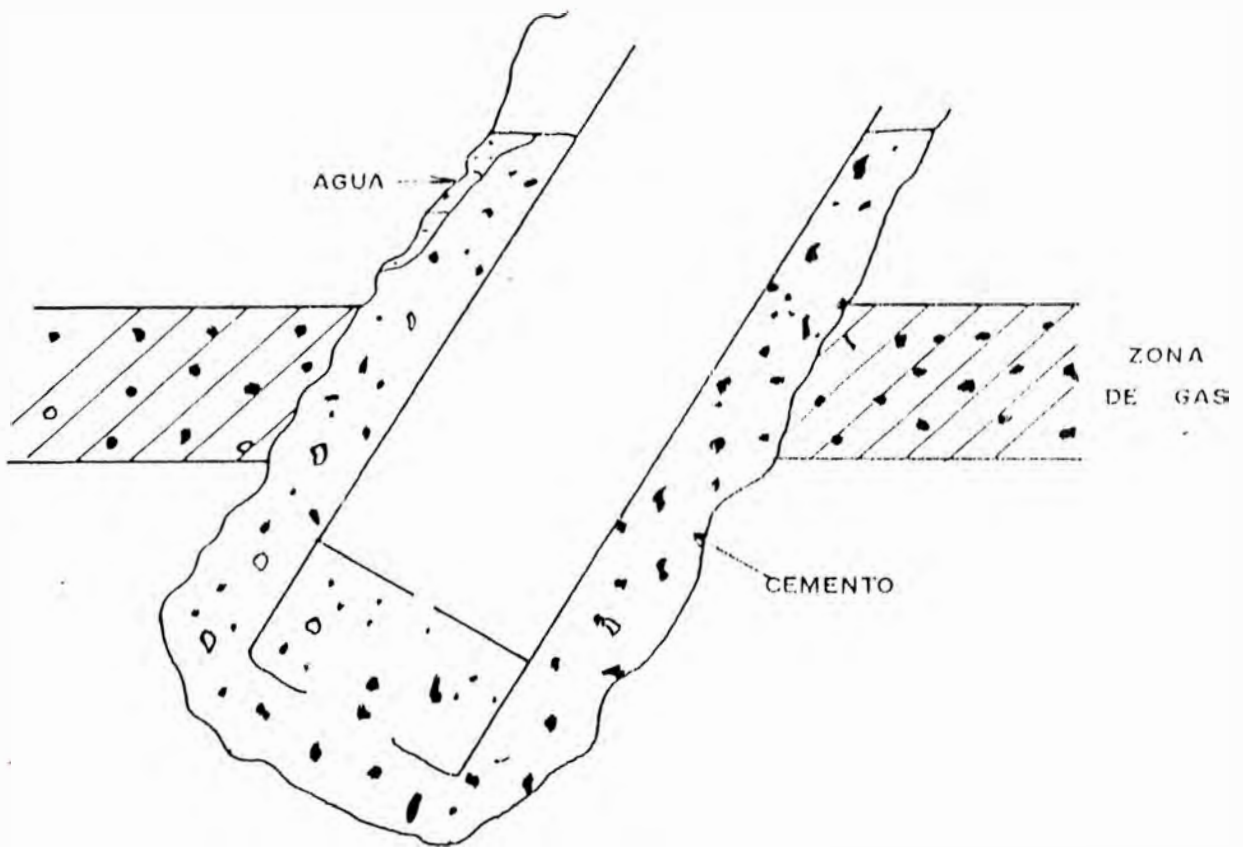


FIGURA 17

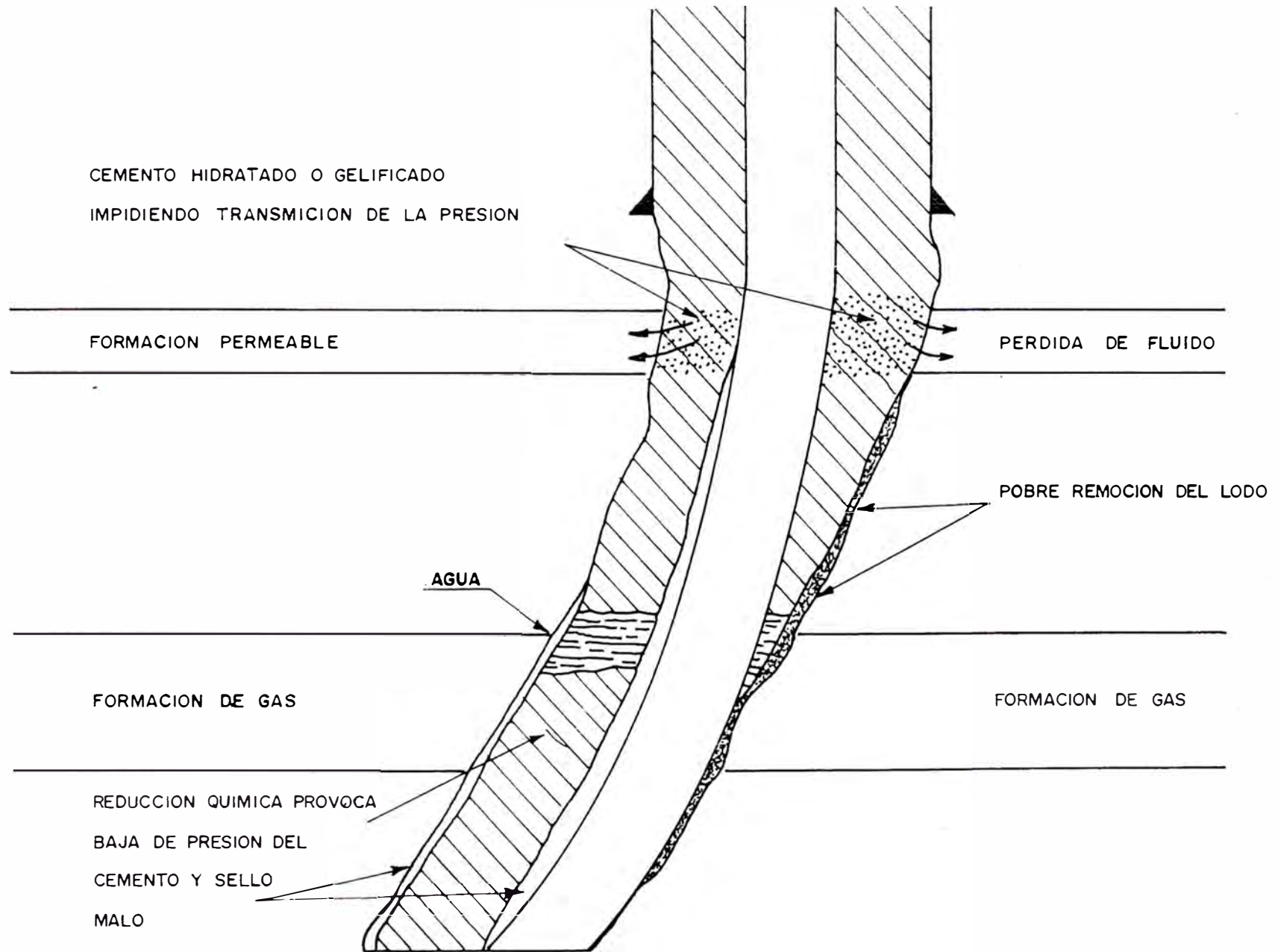


FIGURA 18

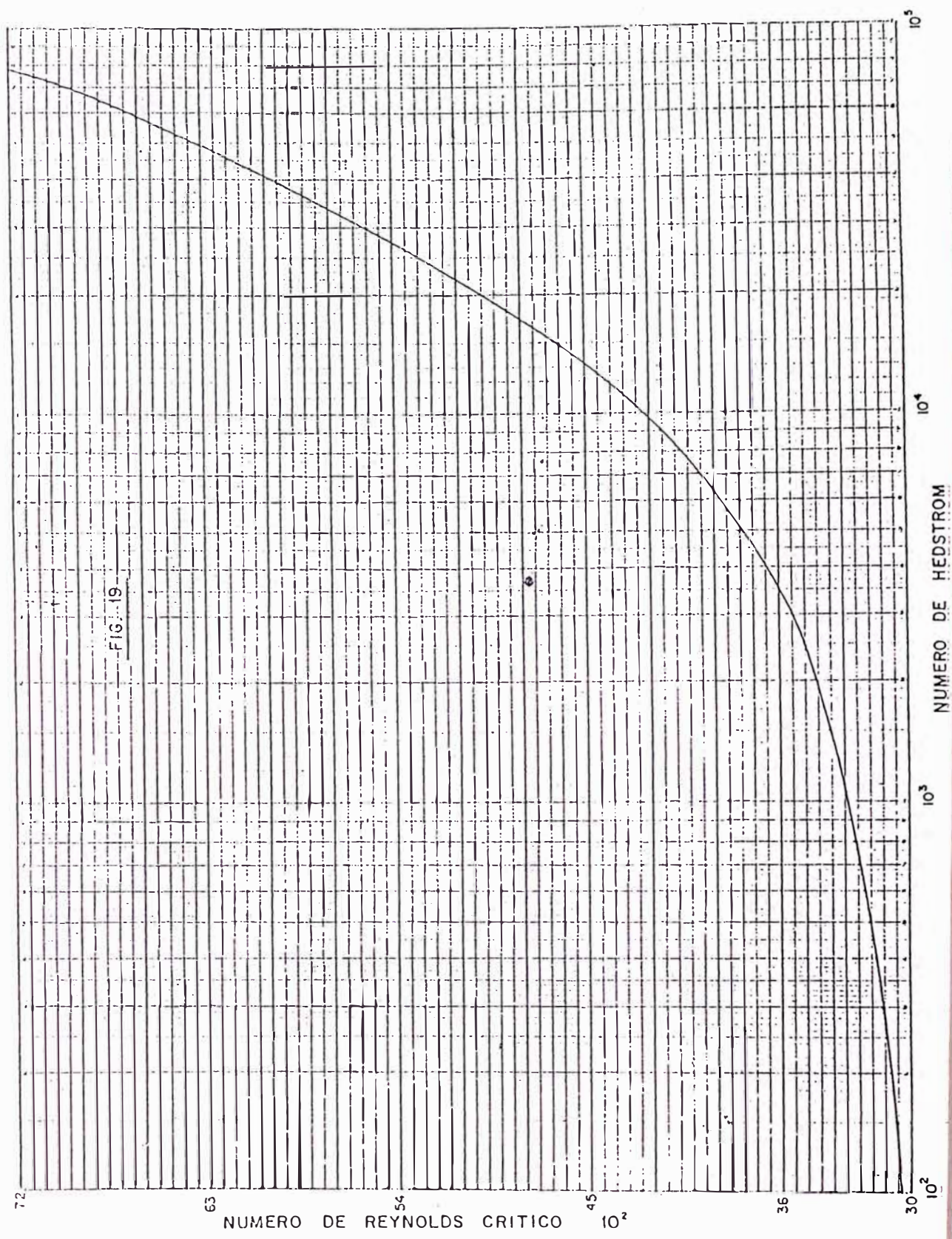


FIG. 19

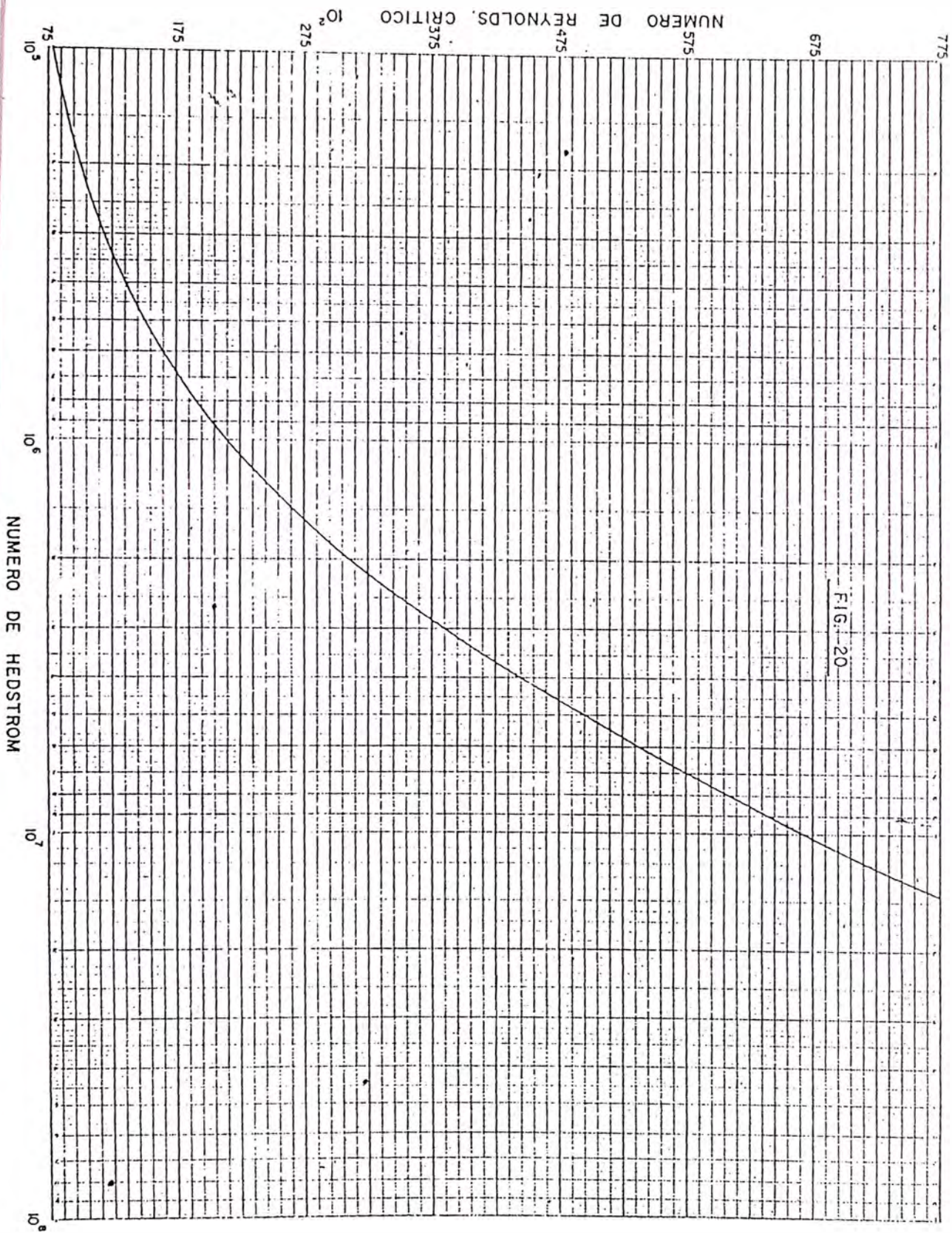


FIG. 20

FACTOR DE FRICCION

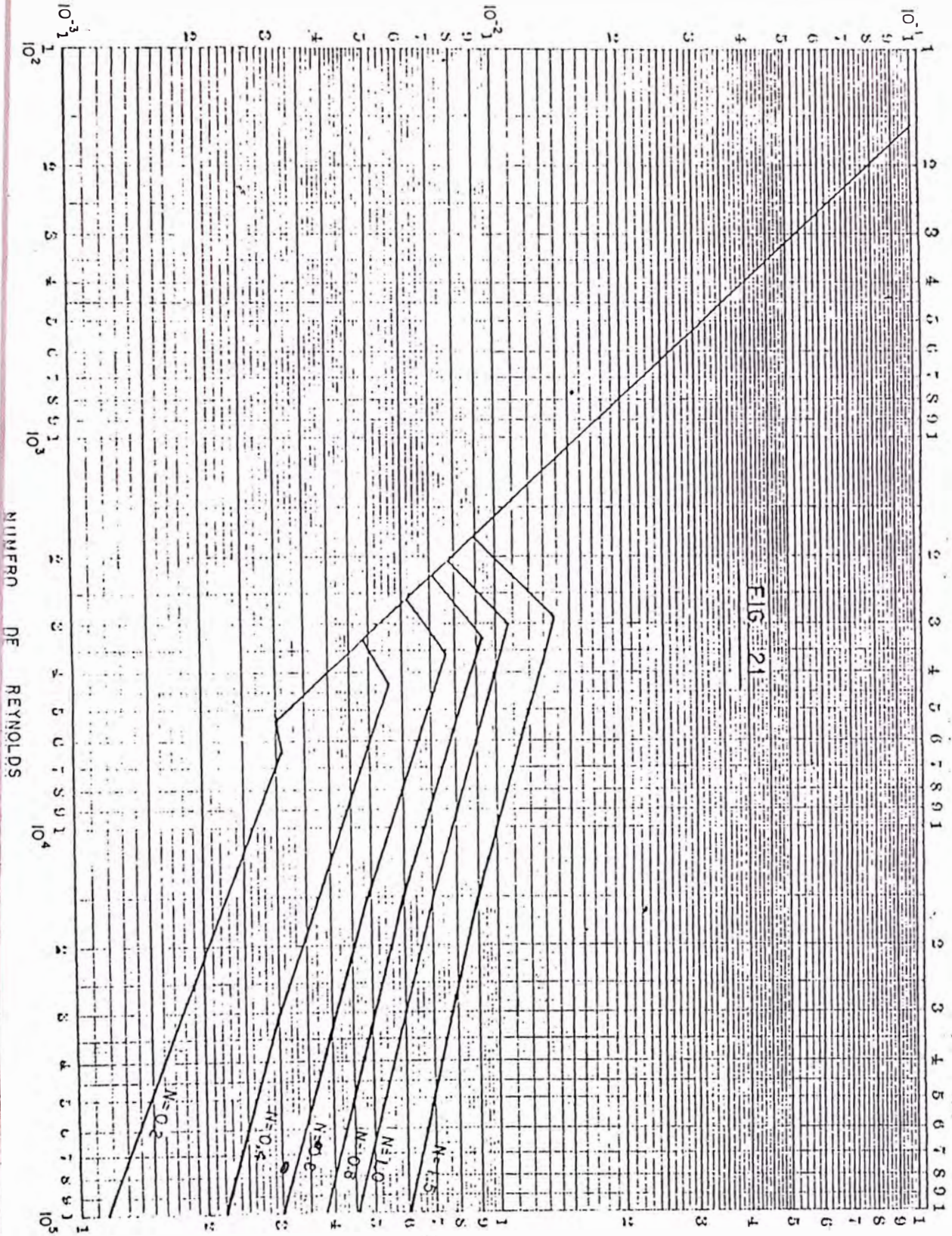


FIG. 21

NUMERO DE REYNOLDS

FLUIDO PLASTICO DE BINGHAM

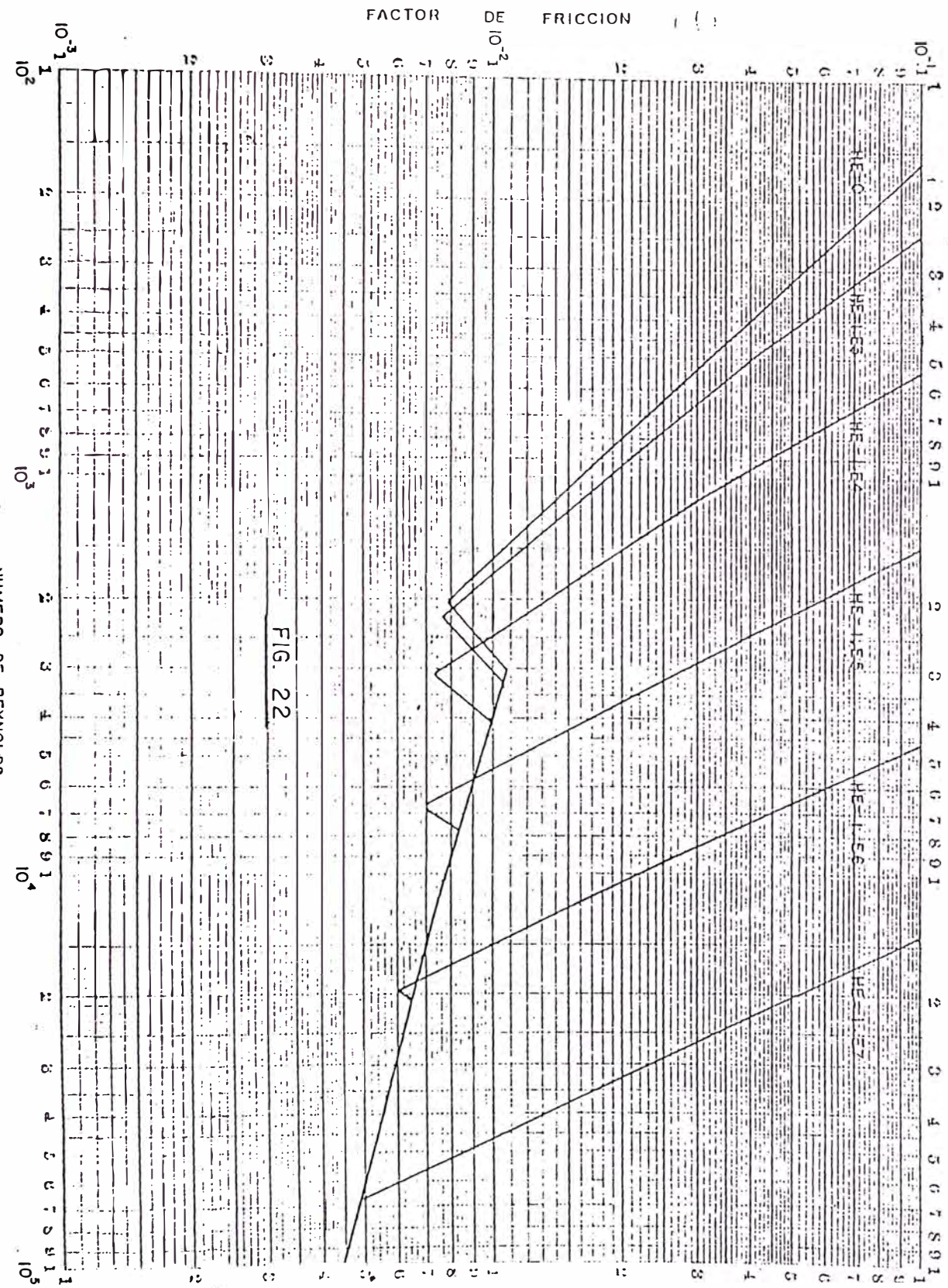


FIG. 22

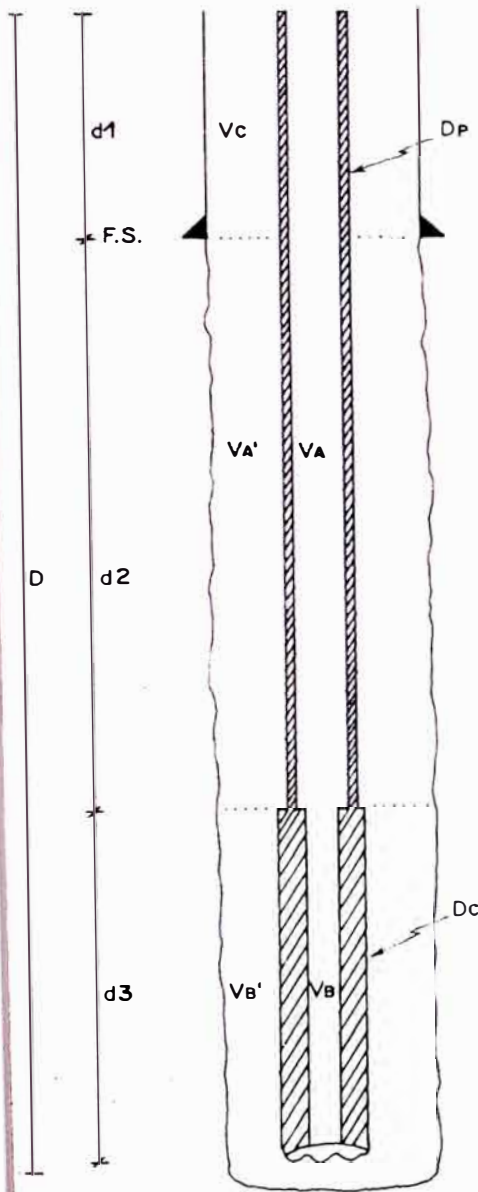
NUMERO DE REYNOLDS

ANEXO A

CALCULO DEL DIAMETRO EQUIVALENTE DEL HUECO

PRUEBA DEL ARROZ

MEDIR EL TIEMPO DE VIAJE DEL ARROZ
DESDE LA ENTRADA HASTA LA SALIDA DEL
POZO



$$V_P = V_A + V_B + V_{A'} + V_{B'} + V_C$$

V_P = Volumen de lodo en el pozo

$$t = \frac{V_P}{Q} \quad \begin{array}{l} V = \text{Volumen} \\ Q = \text{Rate de bombeo} \\ t = \text{tiempo} \end{array}$$

$$t_A = \frac{V_A}{Q}, t_B = \frac{V_B}{Q}, t_{A'} = \frac{V_{A'}}{Q}, t_{B'} = \frac{V_{B'}}{Q}, t_C = \frac{V_C}{Q}$$

$$t = t_A + t_B + t_{A'} + t_{B'} + t_C$$

$$t = \sum_A t \quad t = \text{tiempo de prueba}$$

$$V_P = t \times Q \quad \text{--- (I)}$$

$$V_{FS} = \text{Cap} \times d_1 \quad \text{--- (II)}$$

V_{FS} = Volumen de los forros de Superficie

$$V_H = V_P + D_{DP} + D_{DC} - V_{FS} \quad \text{--- (III)}$$

$$D_{DP} = D_{SP} \times d_2$$

D_{SP} = Desplazamiento Unit. DP }
" " " } Tablas
" " " } DC

$$D_{DC} = D_{SC} \times d_3$$

D_{SC} = " " " DC

$$D = d_1 + d_2 + d_3$$

V_H = Volumen del hueco abierto

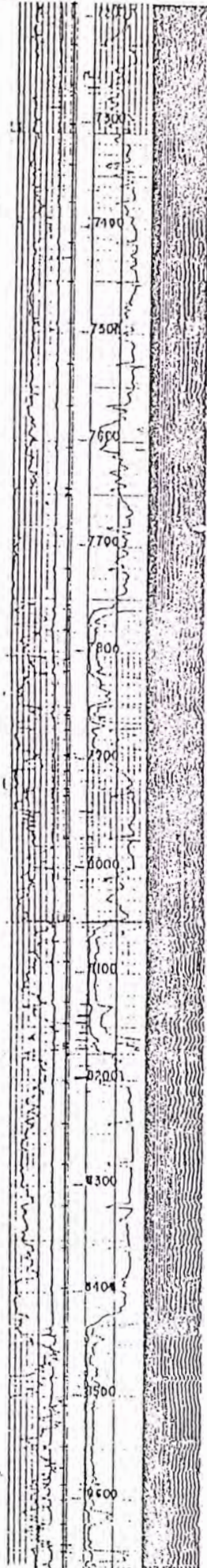
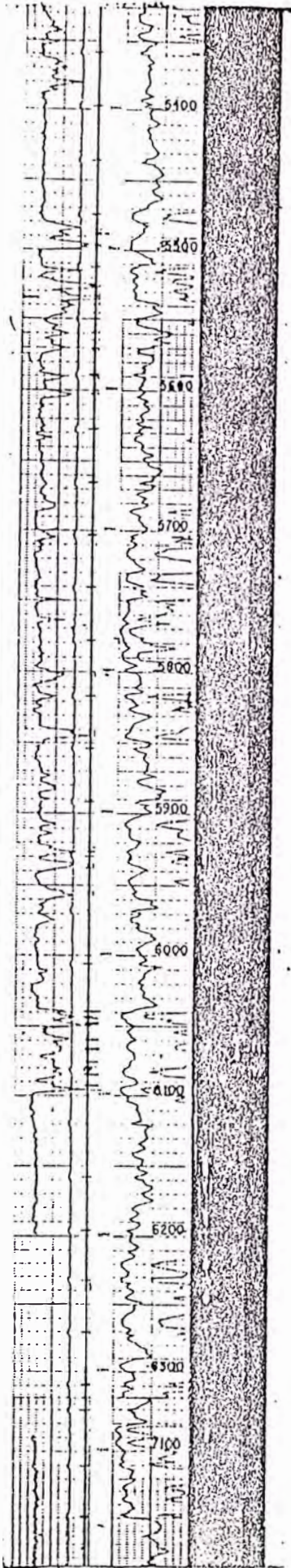
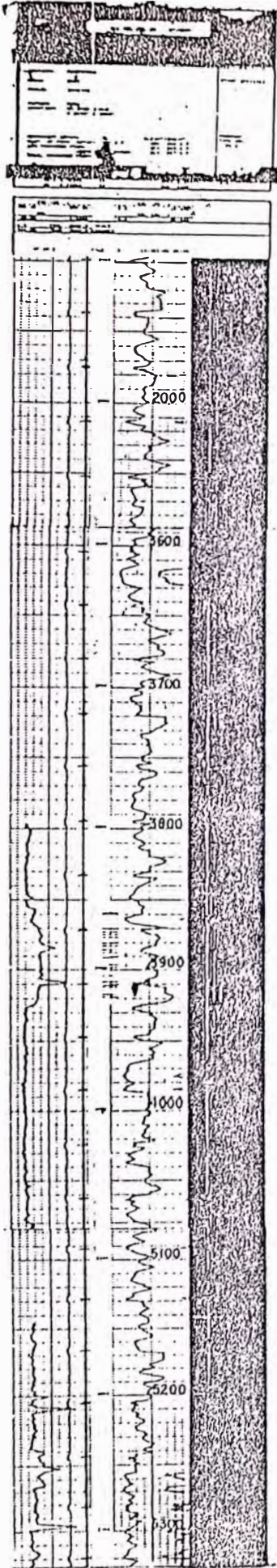
$$V_{eq} = \frac{V_H}{D - d_1} \quad \text{--- (IV)}$$

V_{uh} = Volumen unitario del hueco Blo/pie

D_{eq} = Se busca en tablas con el V_{uh}

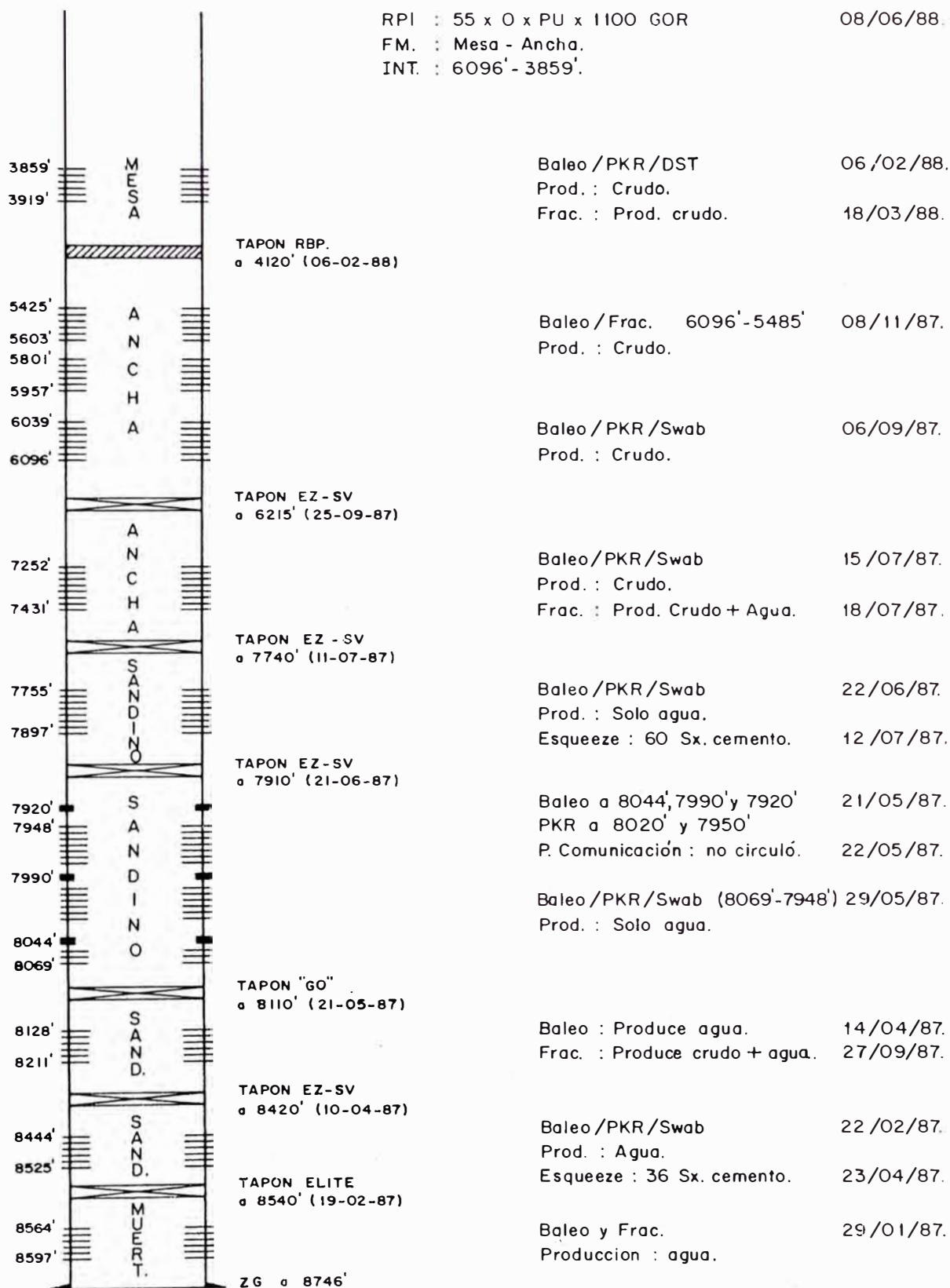
ANEXO Ia

Registro CBL -VDL POZO 3020 "SANDINO"



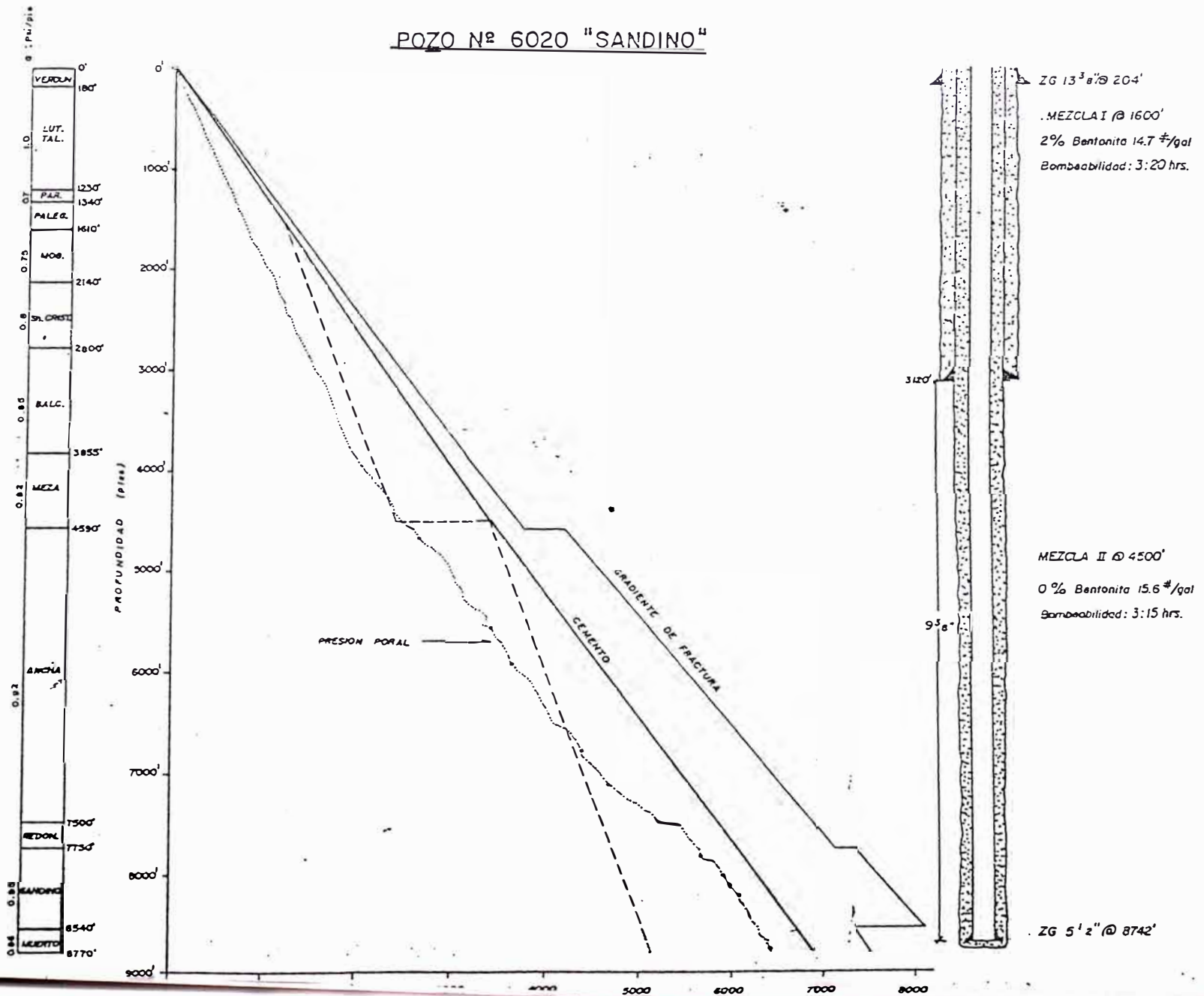
ANEXO Ib

COMPLETACION POZO 6020 "SANDINO"



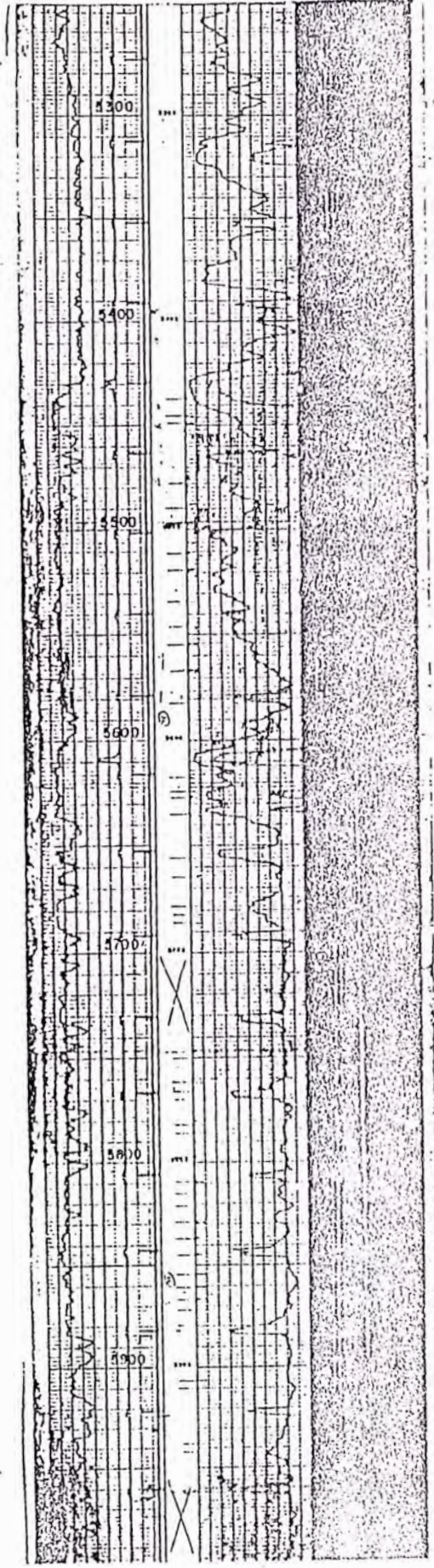
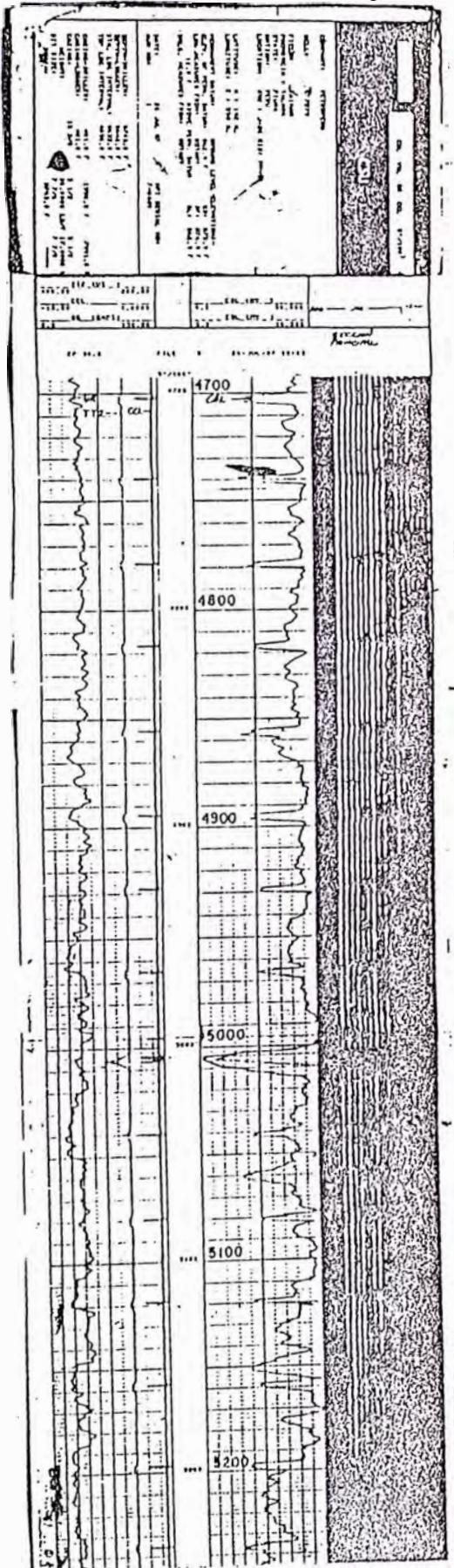
PREDICCIÓN GRAFICA POST CEMENTO

POZO N° 6020 "SANDINO"

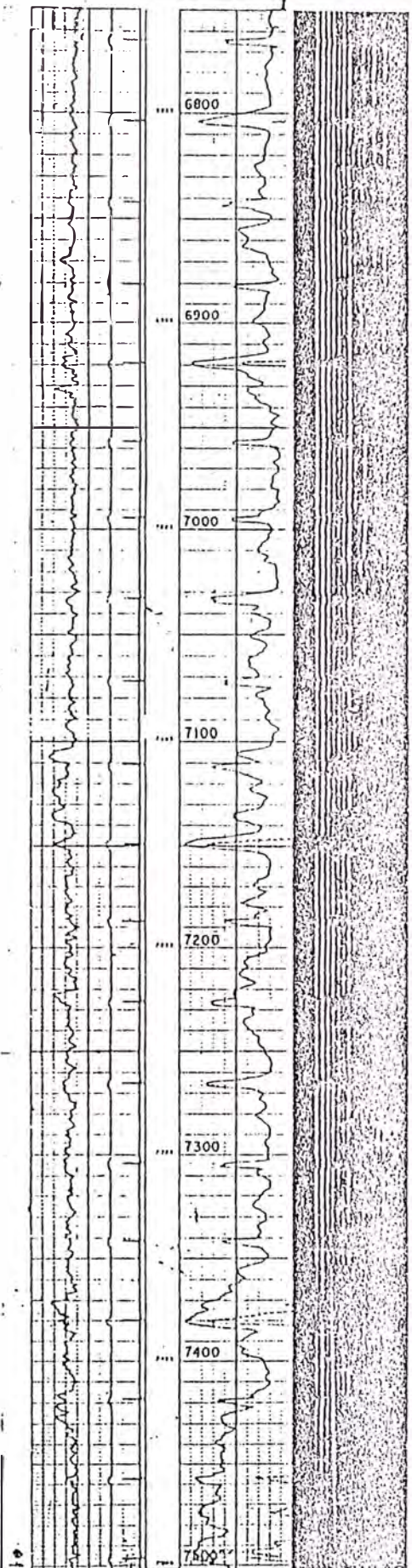
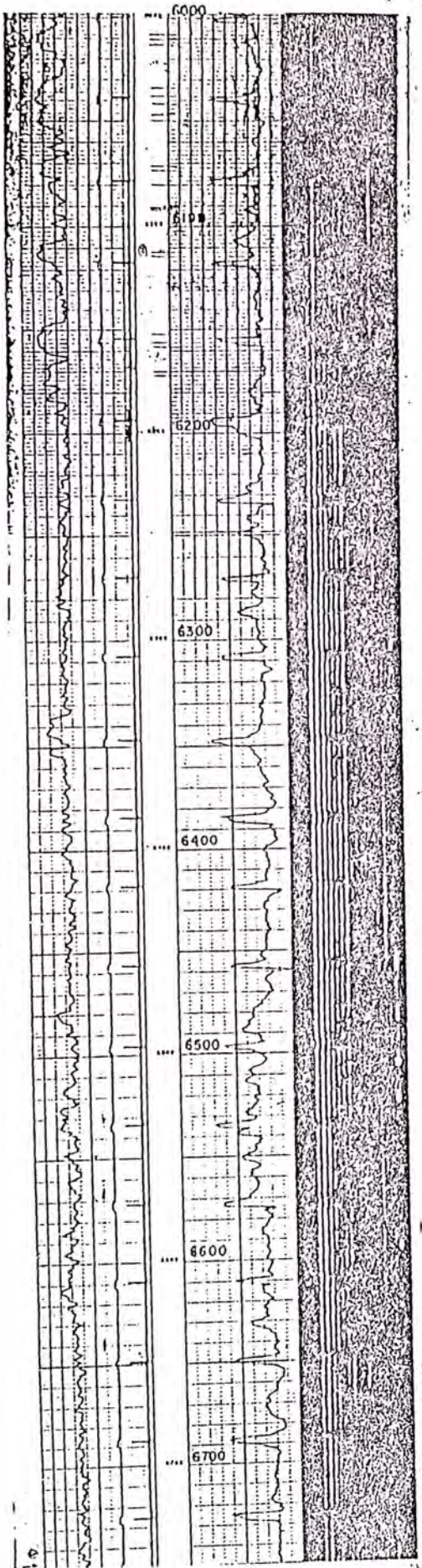


ANEXO 11a

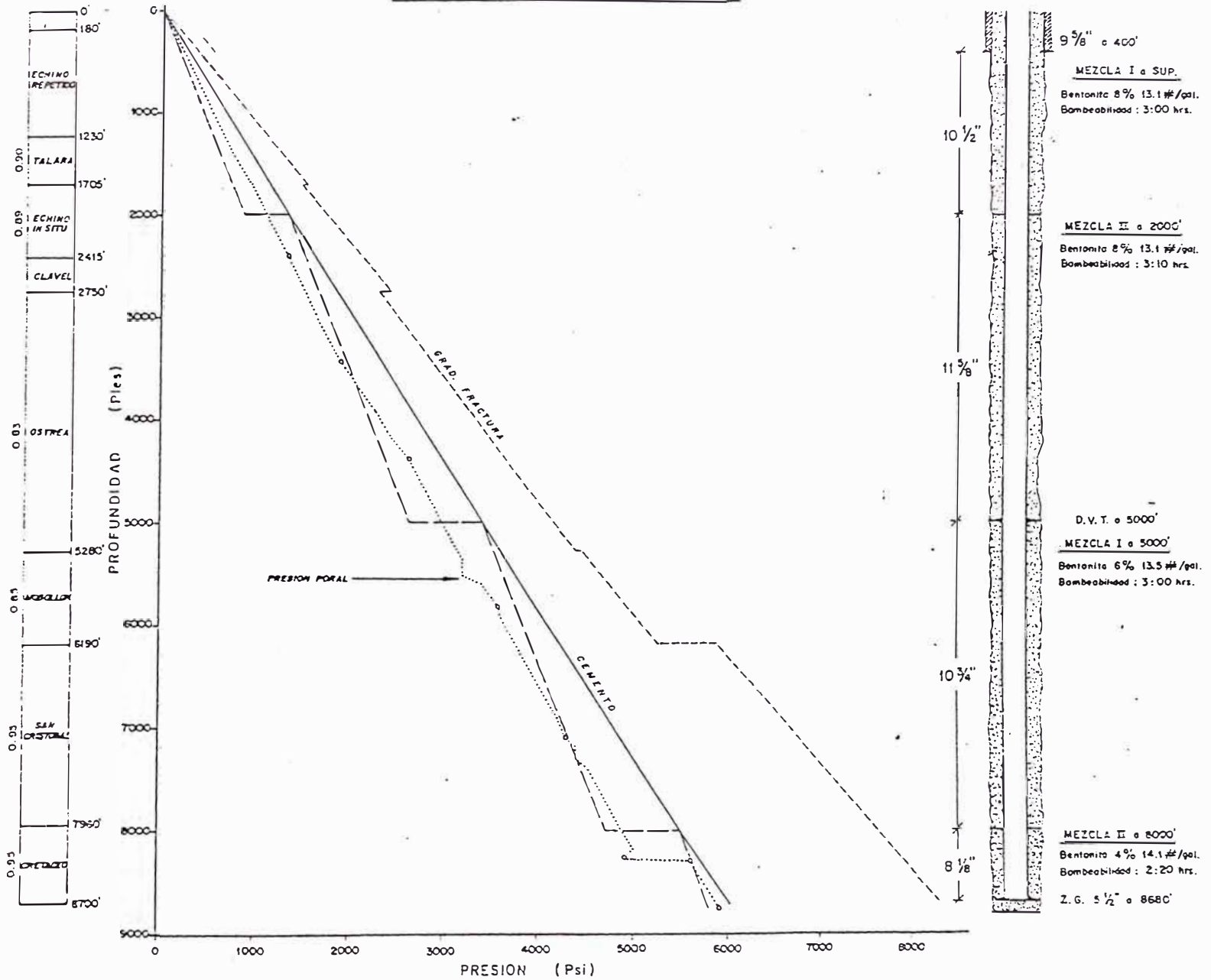
REGISTRO CBL -VDL POZO 7279 "TAIMAN"



ANEXO IIa'

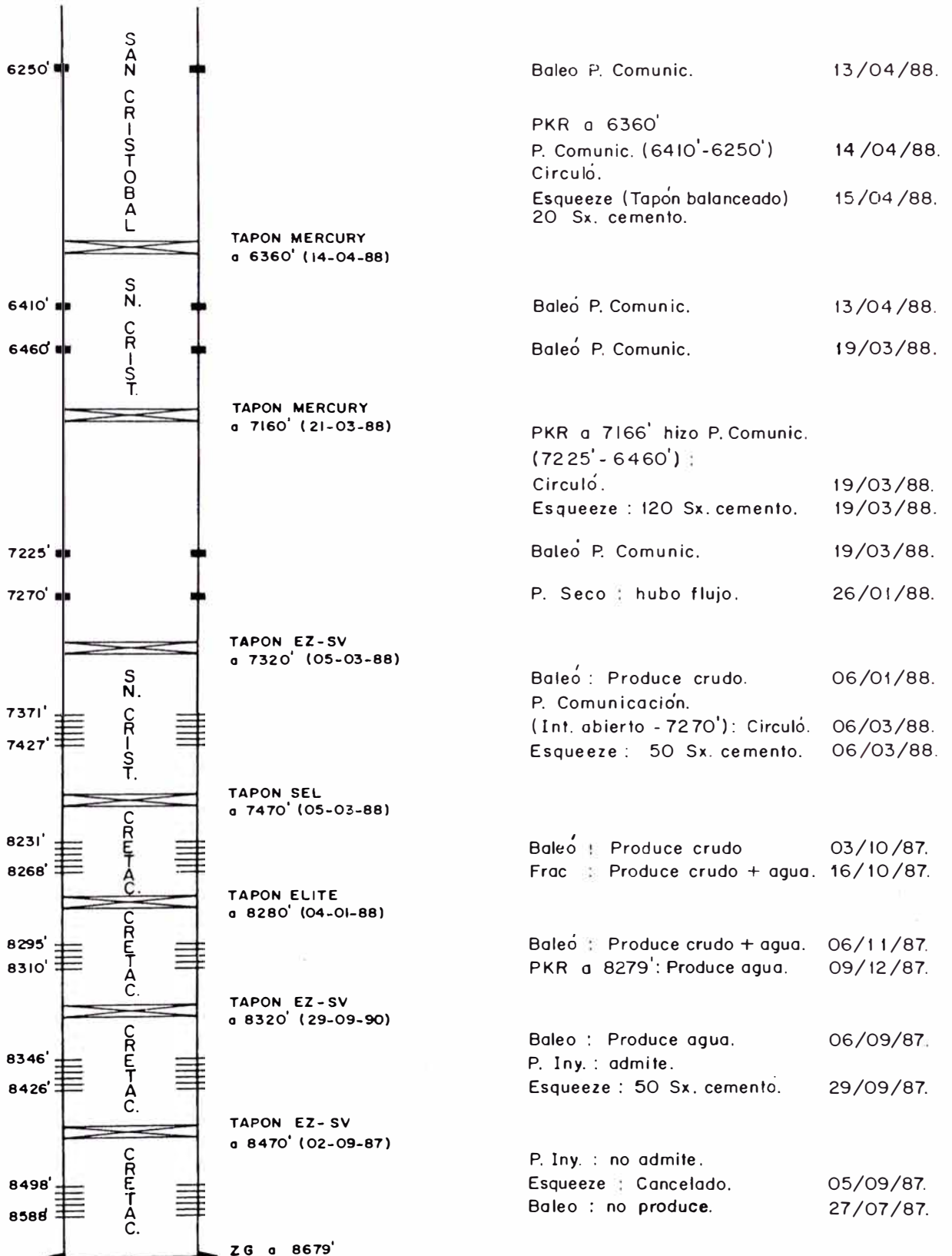


ANEXO I Ib
PREDICCIÓN GRAFICA POST CEMENTO
POZO N° 7279 "TAIMAN"



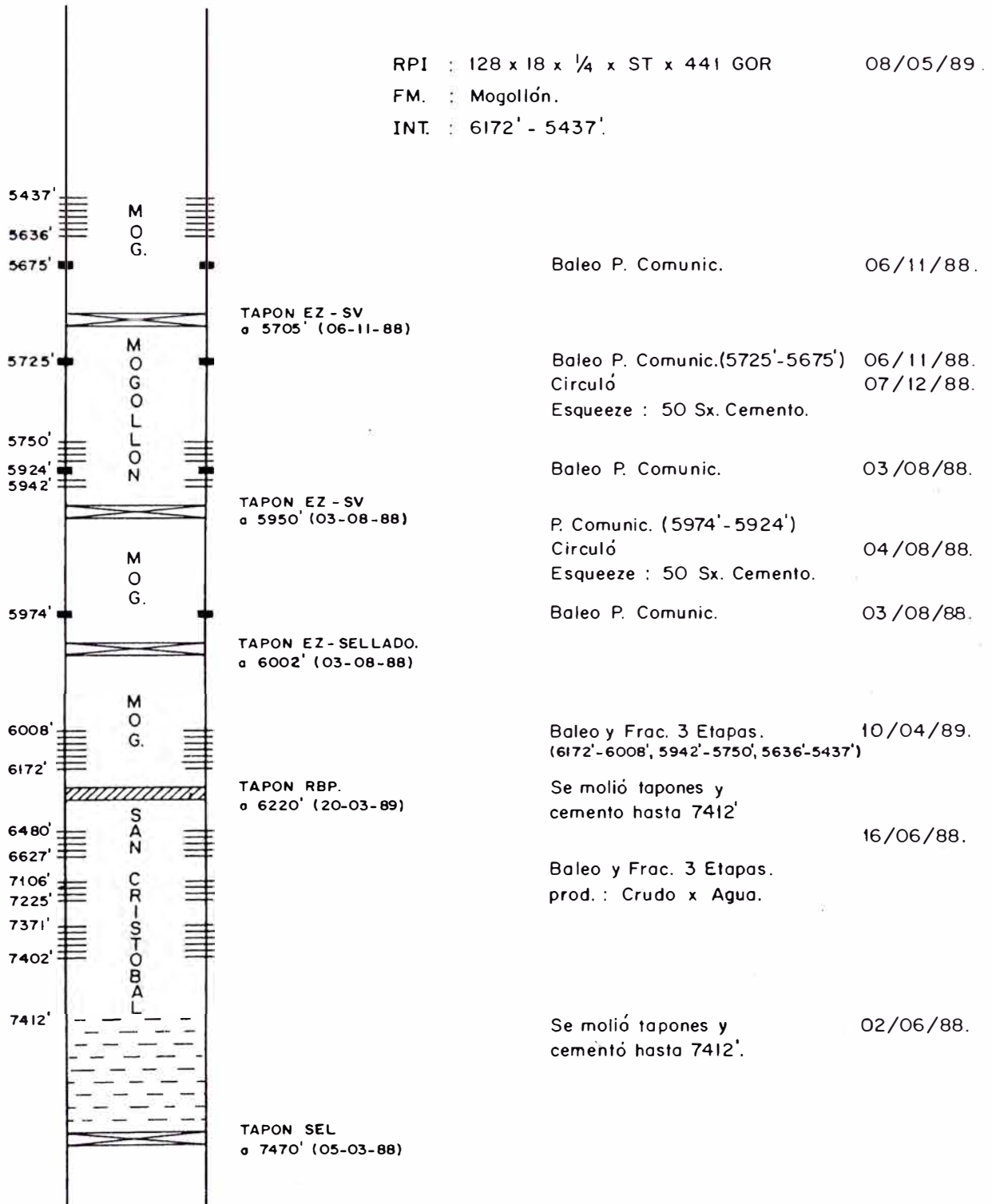
ANEXO IIc

COMPLETACION POZO 7279 "TAIMAN"



ANEXO IIc'

COMPLETACION POZO 7279 "TAIMAN".

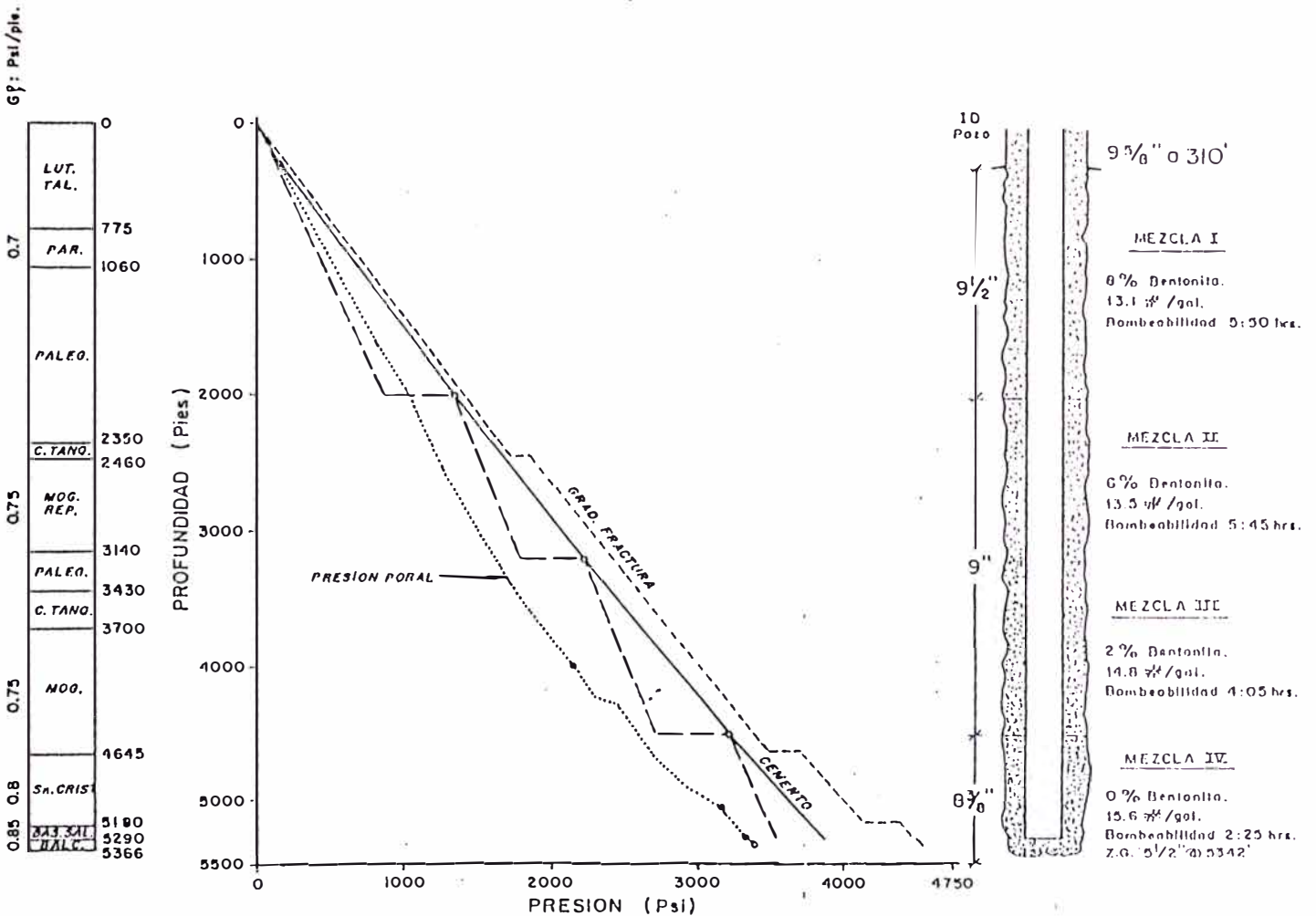


ANEXO III a

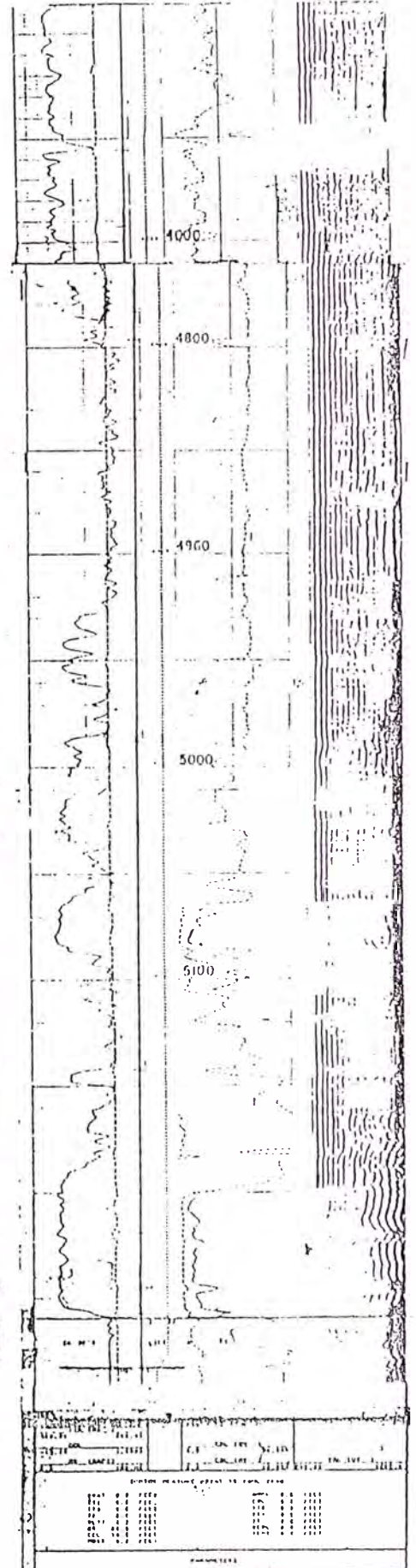
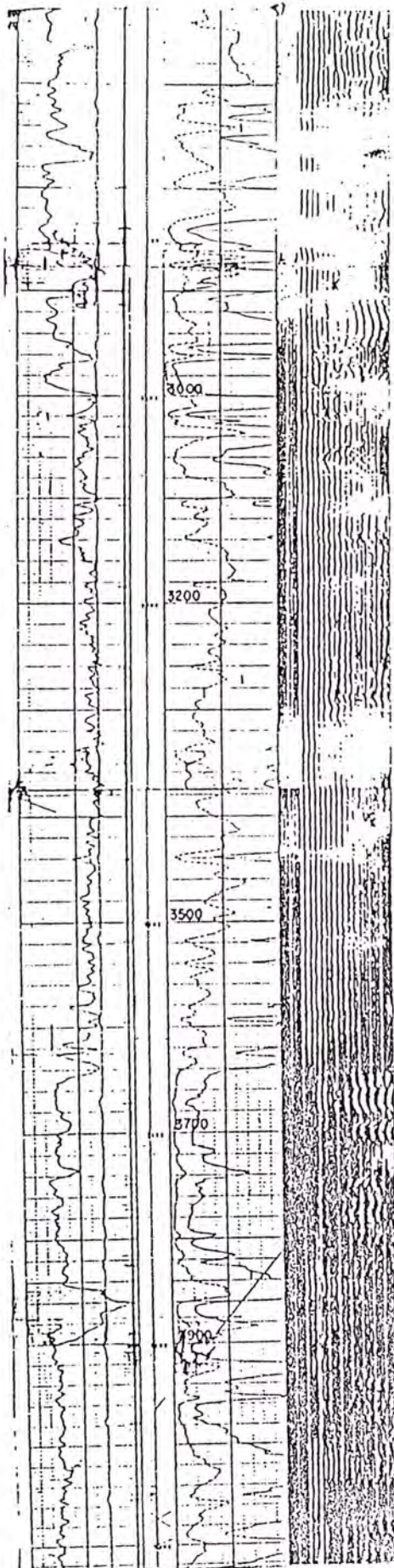
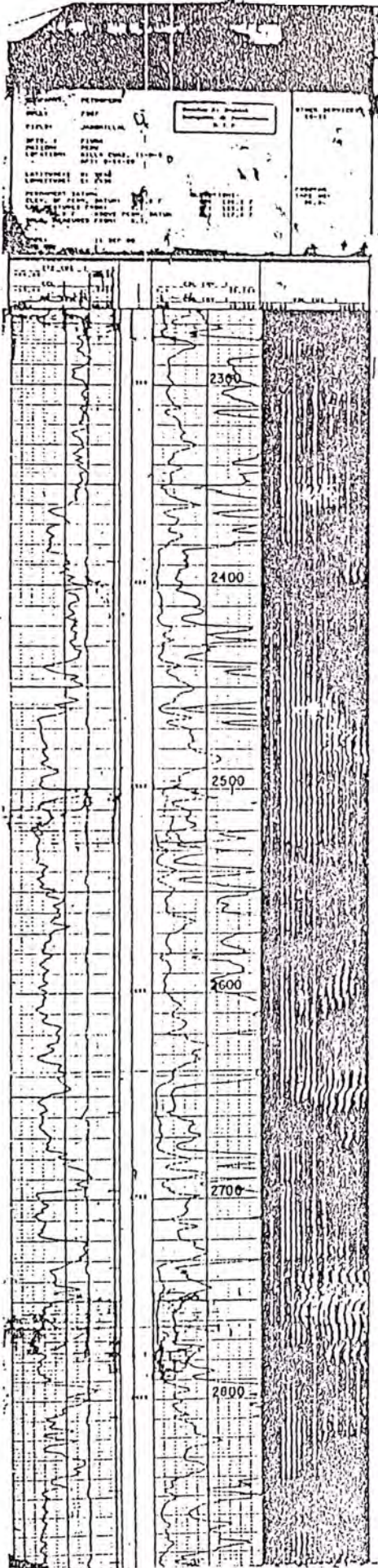
PREDICCIÓN GRAFICA

POZO N° 7357 "JABONILLAL"

PROGRAMA ESTIMADO



ANEXO III b
REGISTRO CBL-VDL POZO 7357 "JABONILLAL"



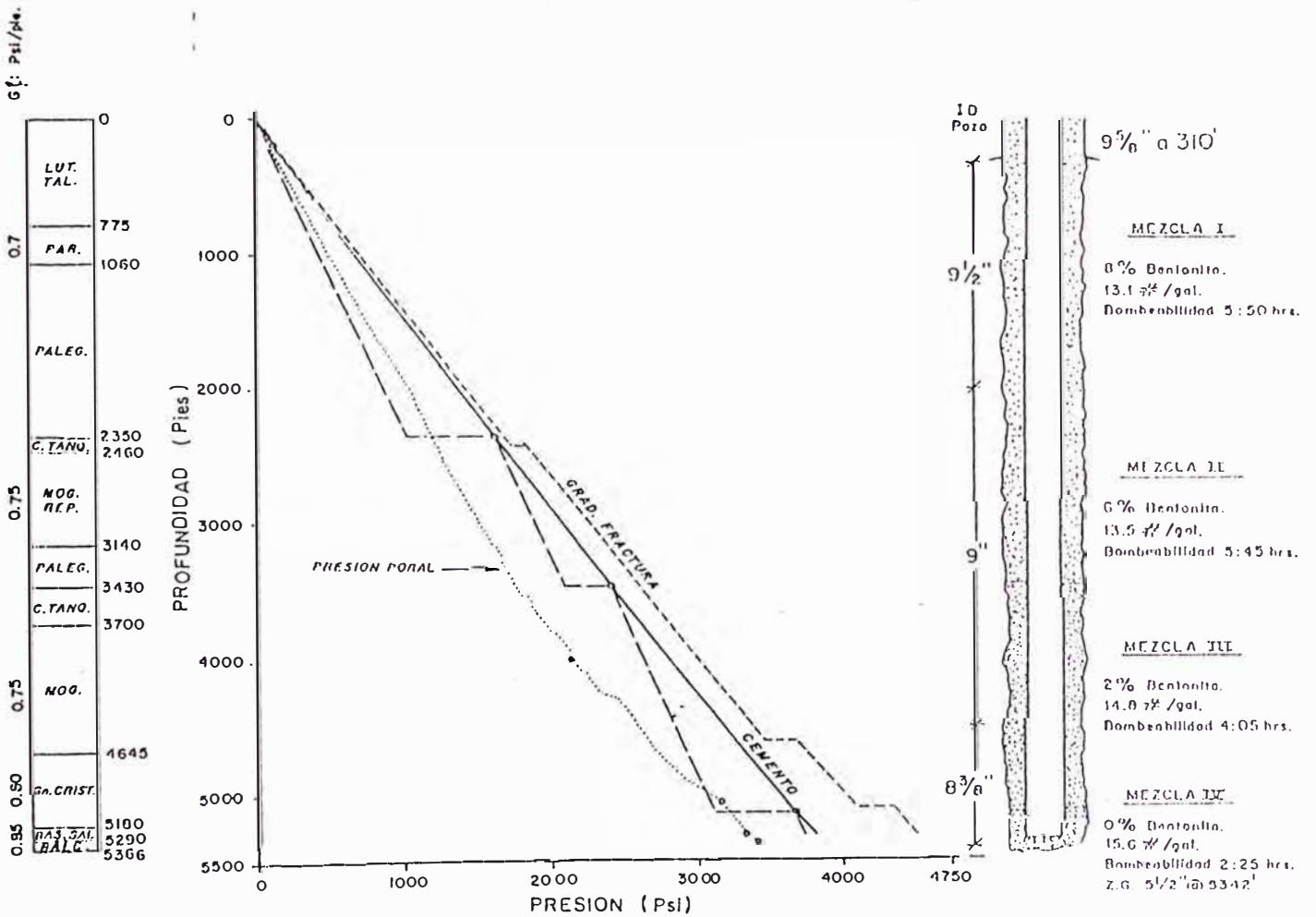
WELL INFORMATION		DATE		TIME	
POZO	7357	...	...	...	...
NOMBRE	JABONILLAL	...	...	...	...
LOCALIDAD	...	...	...	...	...
...

ANEXO IIIc

PREDICCIÓN GRAFICA

POZO N° 7357 "JABONILLAL"

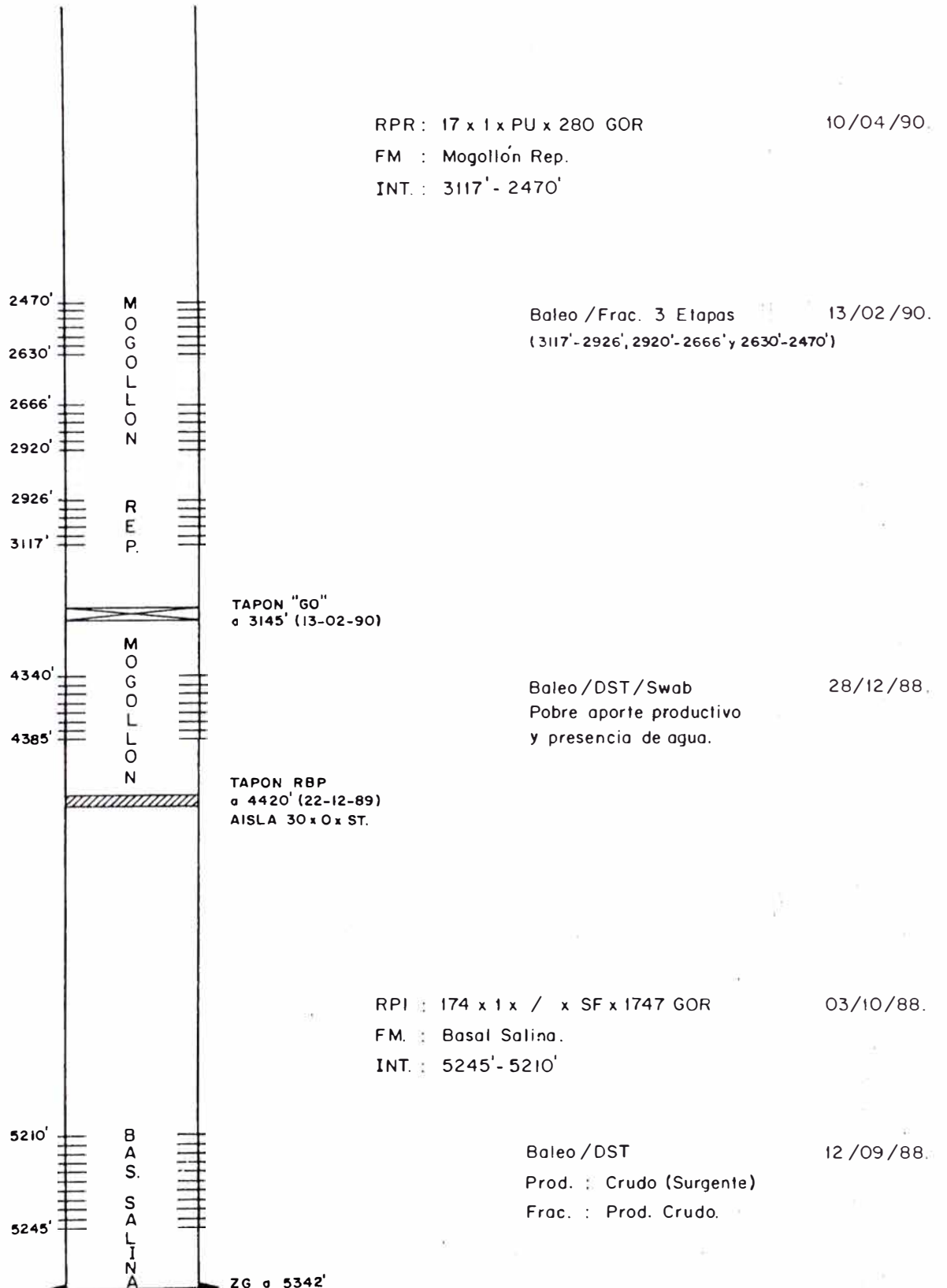
DESPUES DE LA CEMENTACION



ANEXO III d

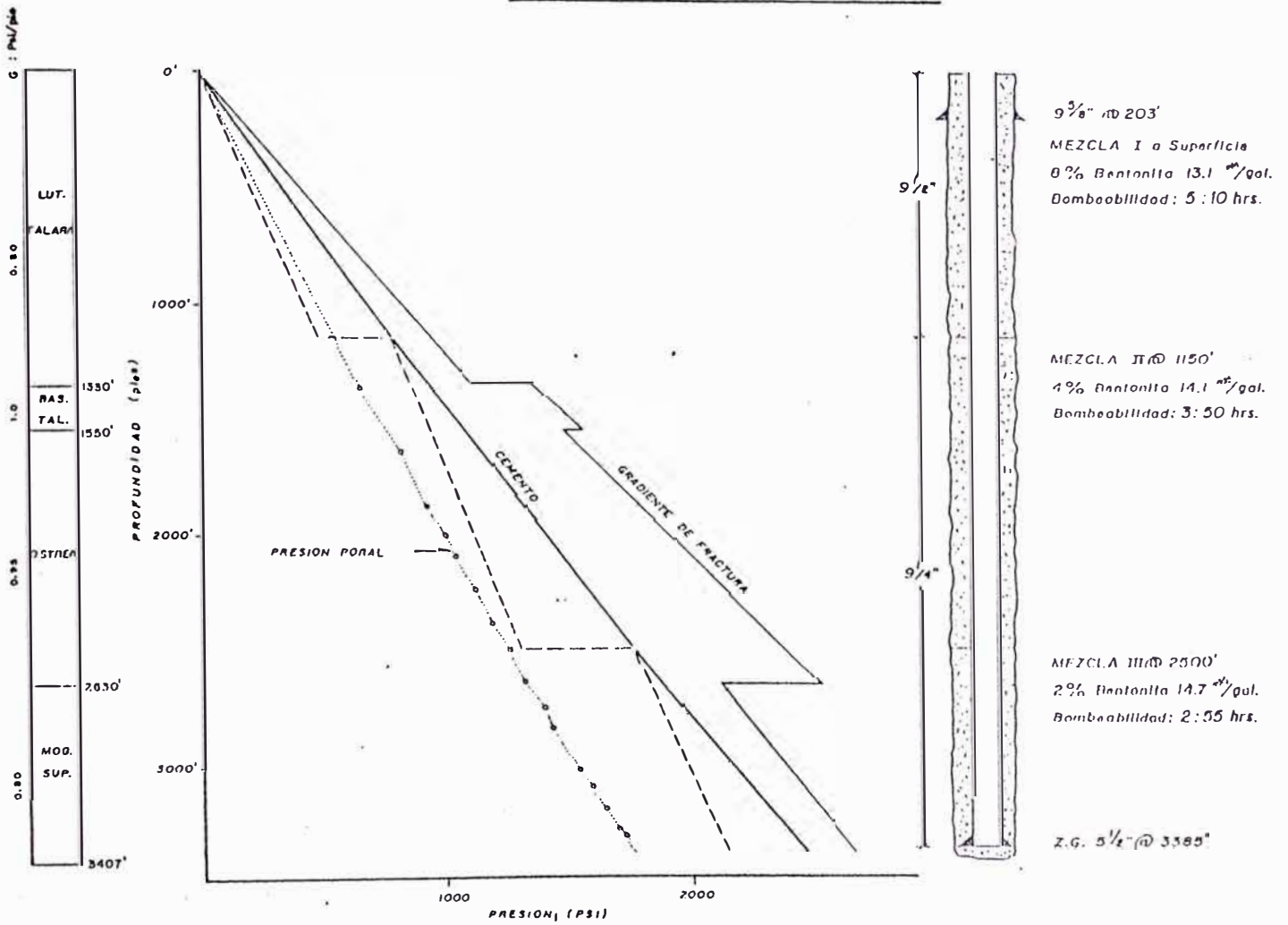
COMPLETACION/REACONDICIONAMIENTO POZO :

7357 "JABONILLAL"

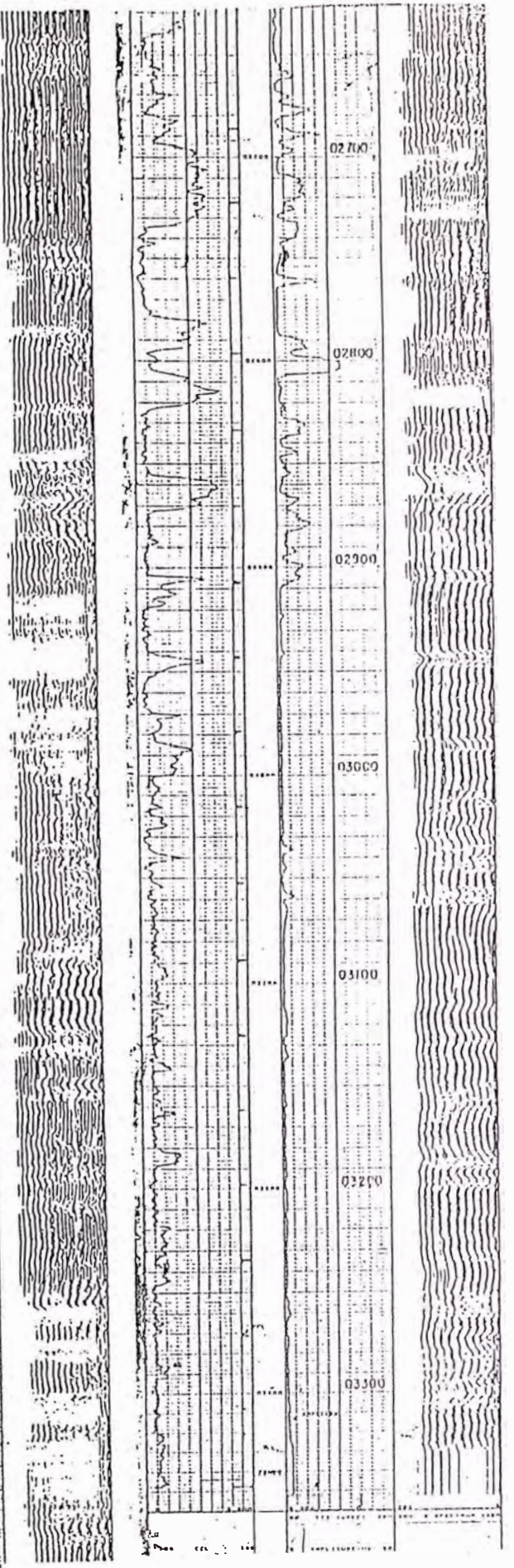
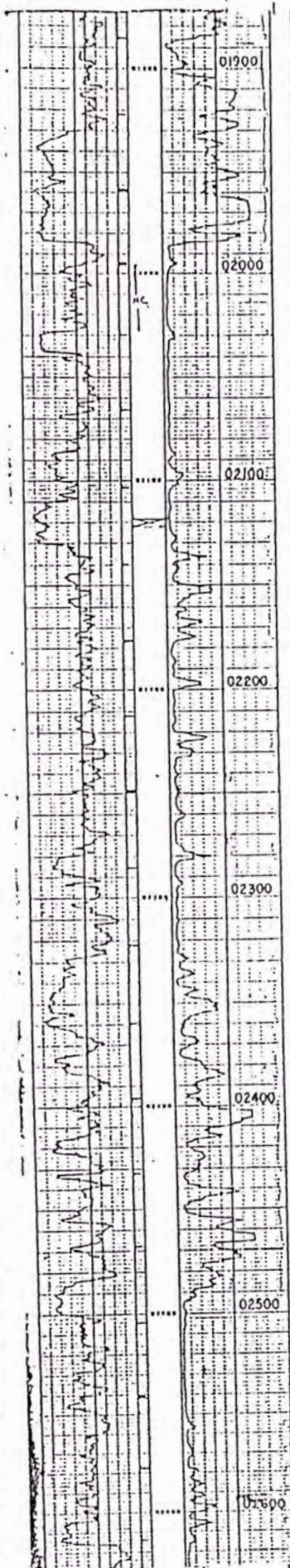
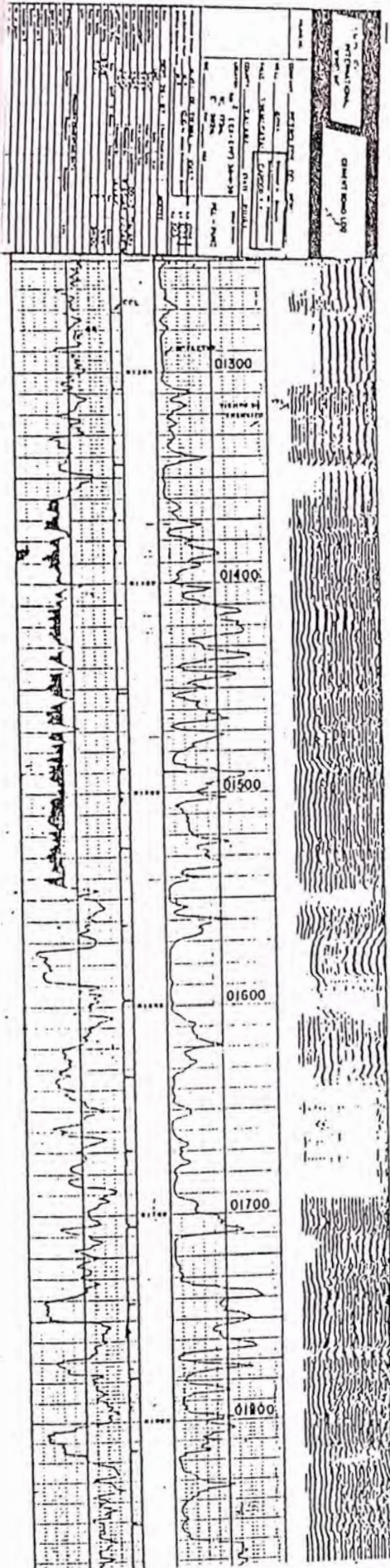


ANEXO IVa
PREDICCIÓN GRAFICA

POZO N° 6035 "HUALTACAL"

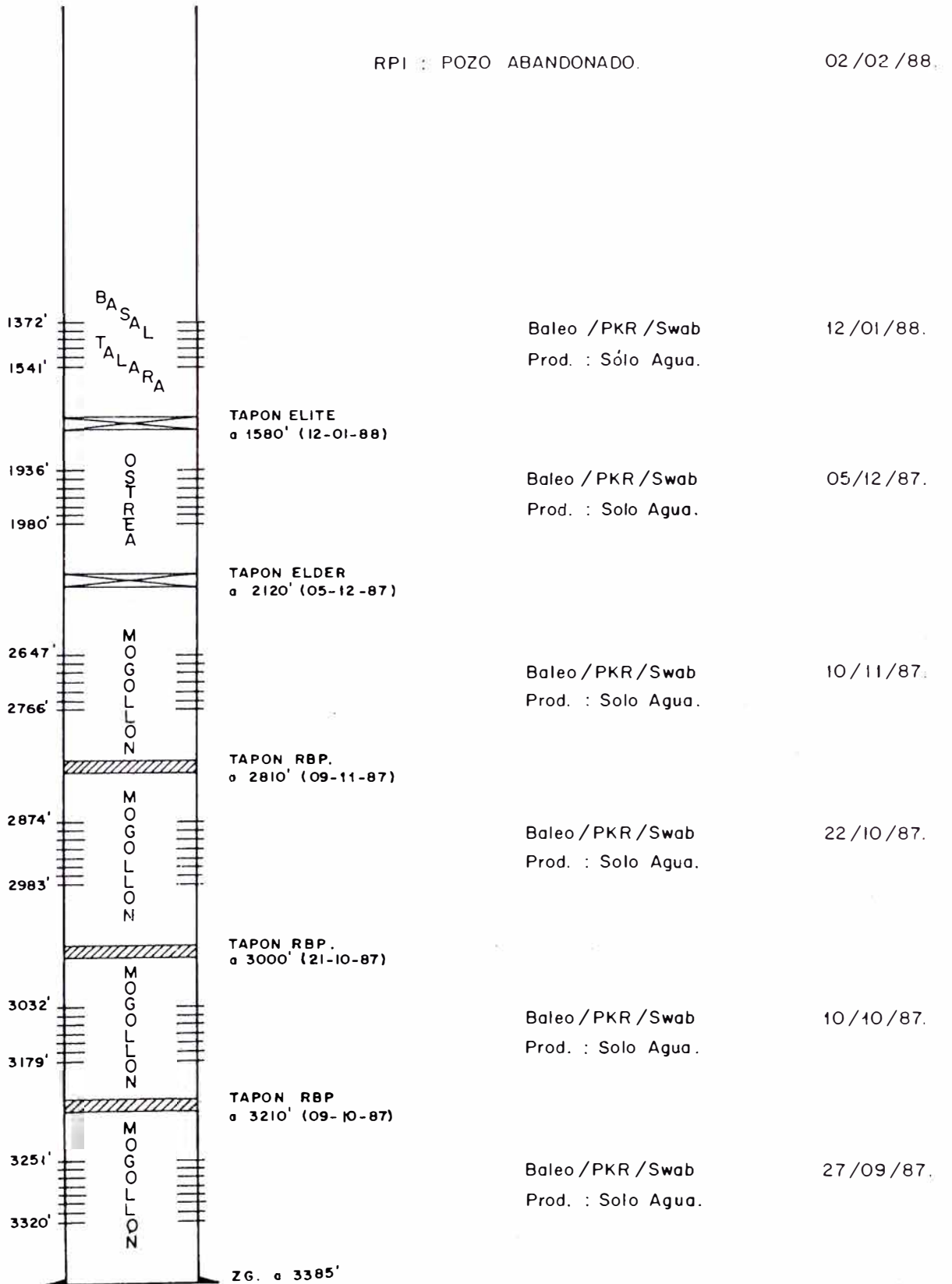


ANEXO IV b
REGISTRO CBL-VDL POZO 6035 "HUALTACAL"



ANEXO IV c

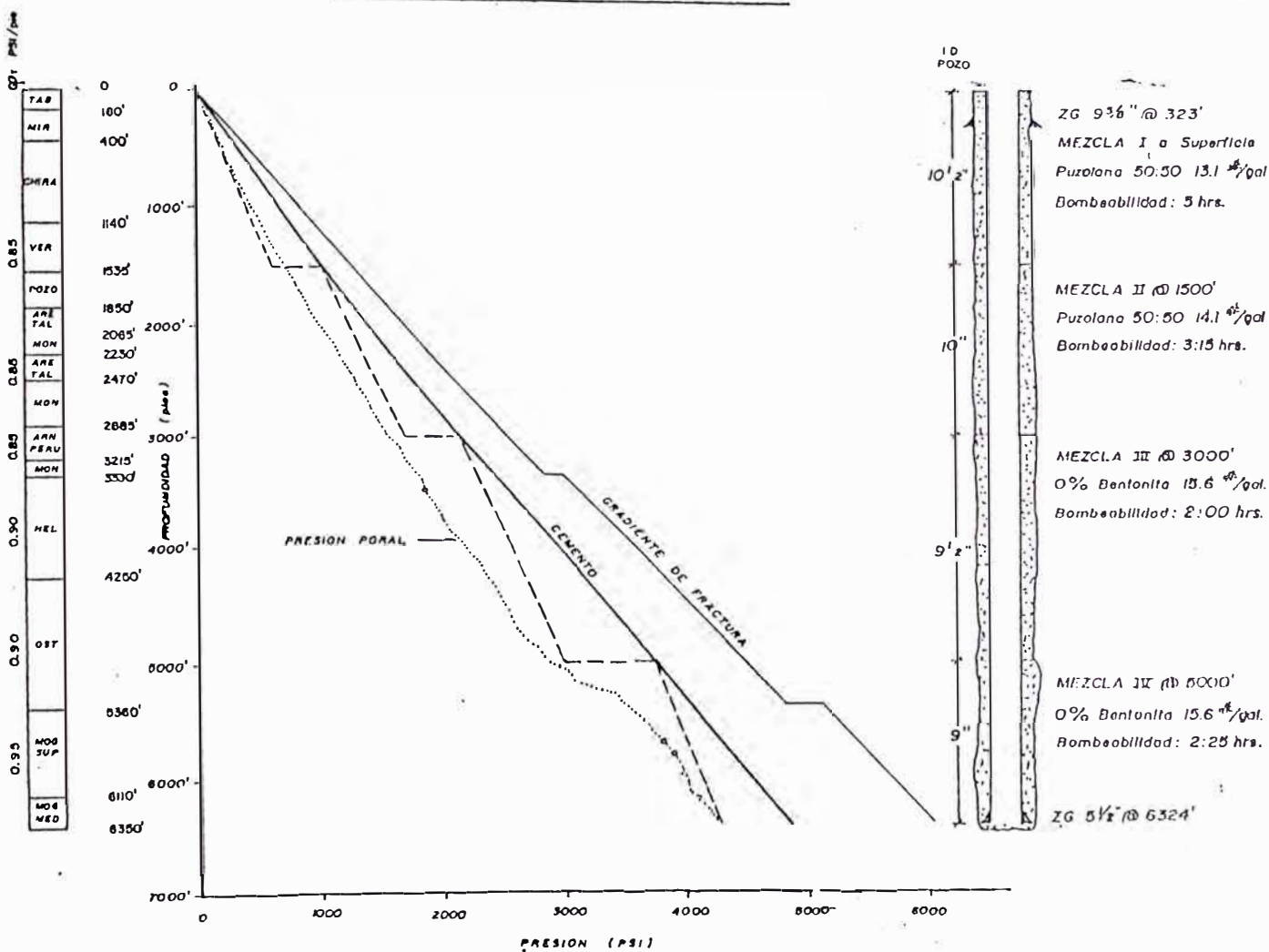
COMPLETACION POZO 6035 "HUALTACAL"



ANEXO V a

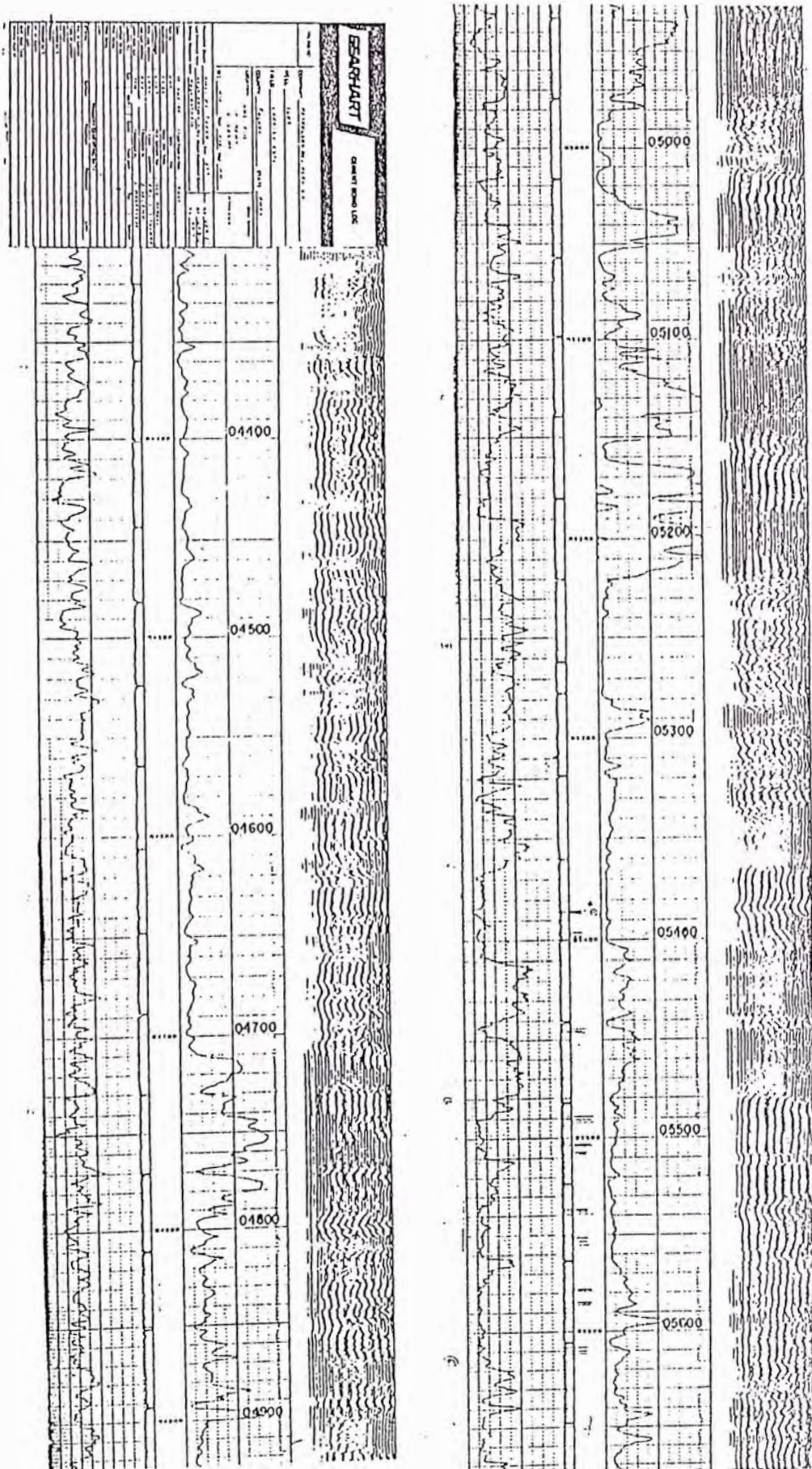
PREDICCIÓN GRAFICA POST CEMENTO

POZO N° 7609 CARRIZO ESTE

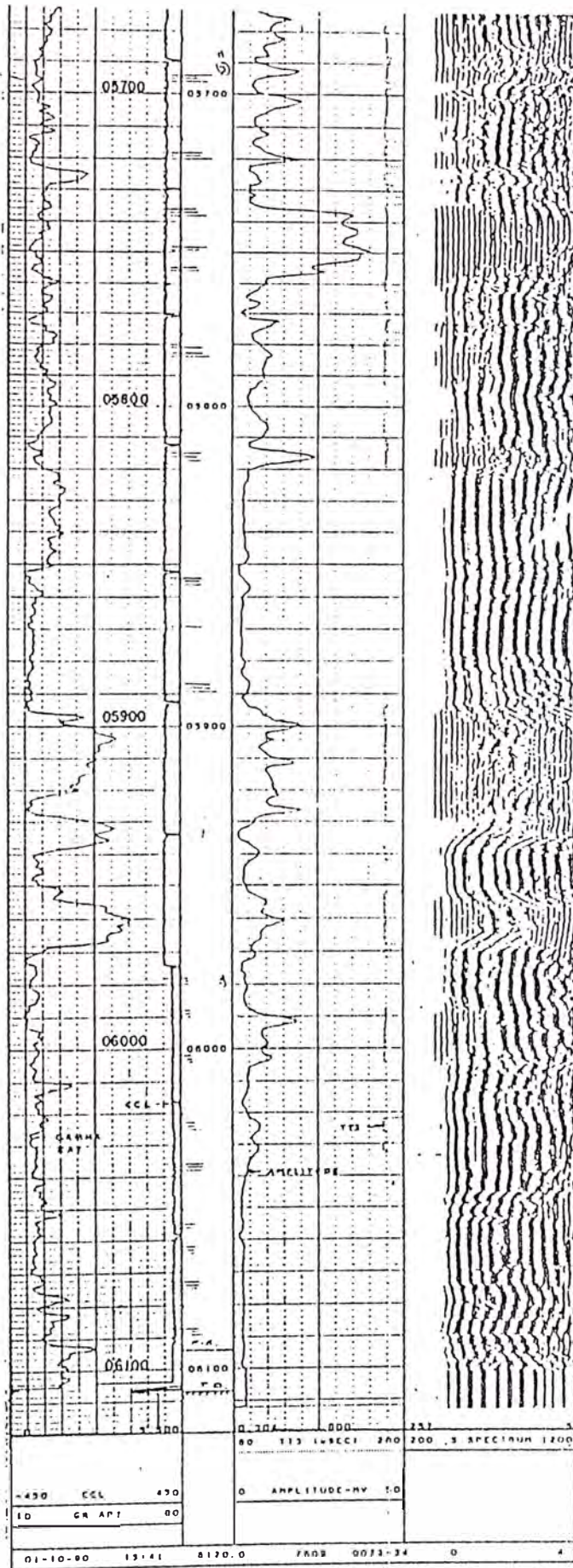


ANEXO V b

REGISTRO CBL-VDL POZO 7609 "CARRIZO"

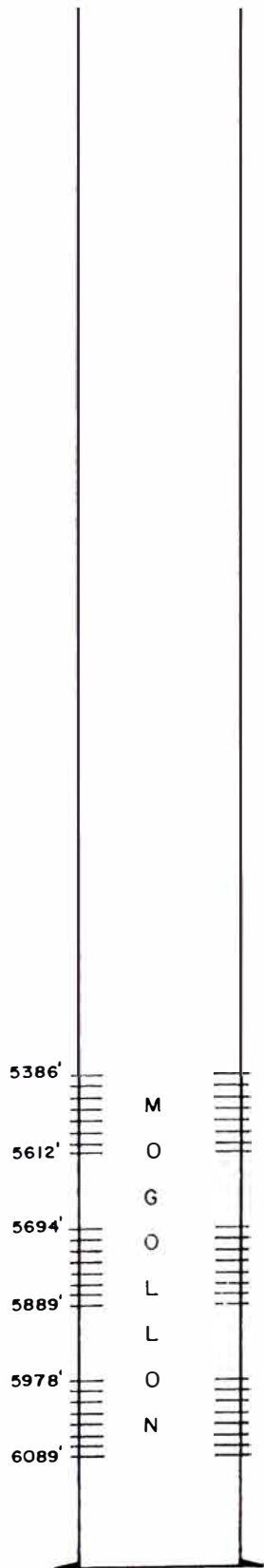


ANEXO V B



ANEXO Vc

COMPLETACION POZO 7609 "CARRIZO"



RPI : 2176 MPCD Gas x 1/4 x SF

31/01/90.

FM. : Mogollón.

INT. : 6089' - 5386'.

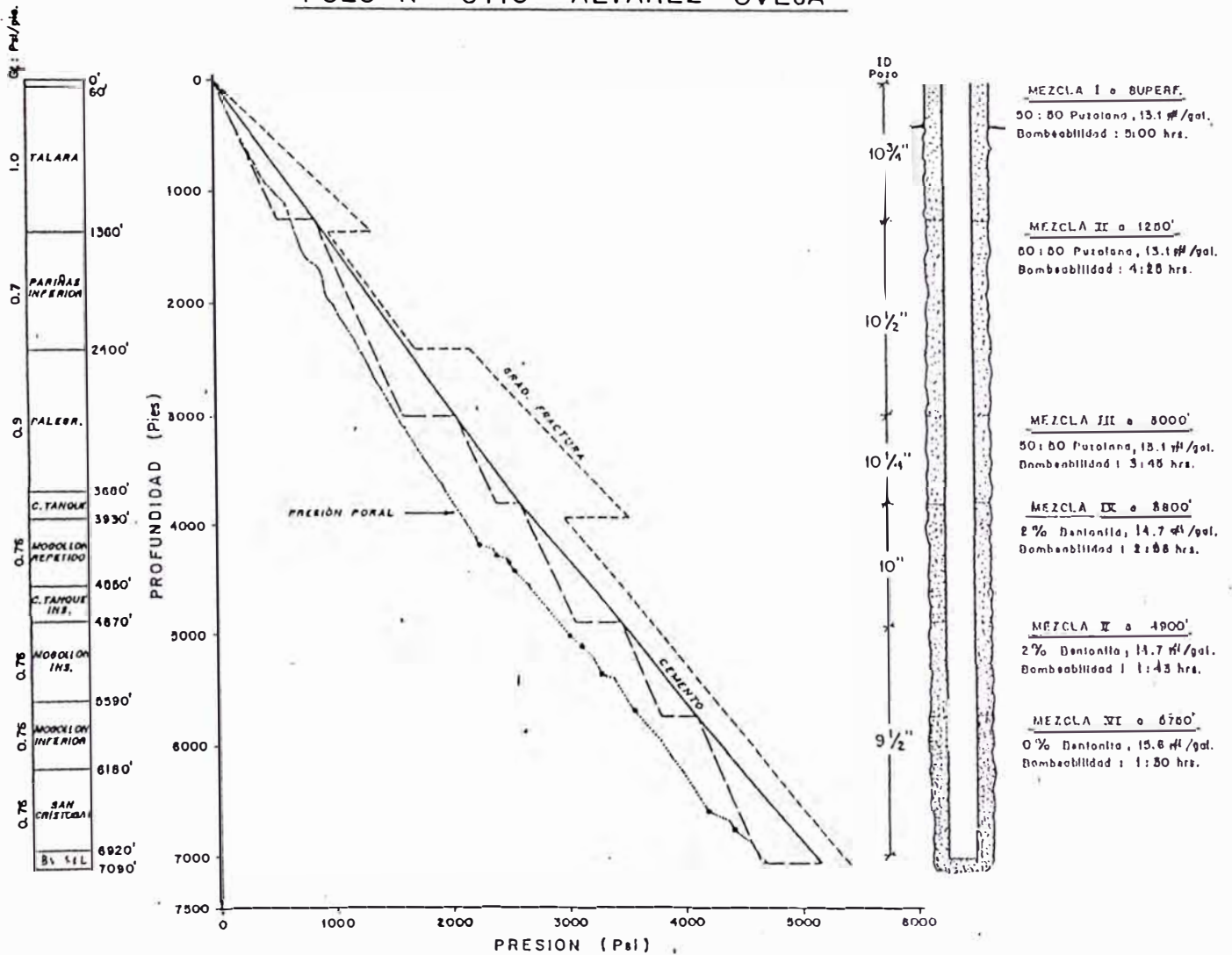
Baleo / Frac. 3 Etapas.

17/01/90.

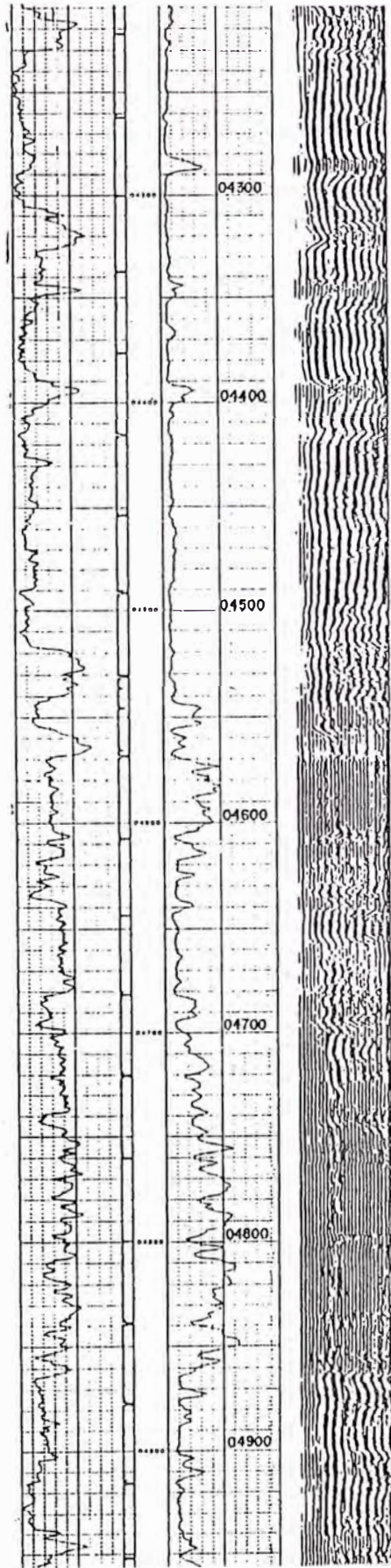
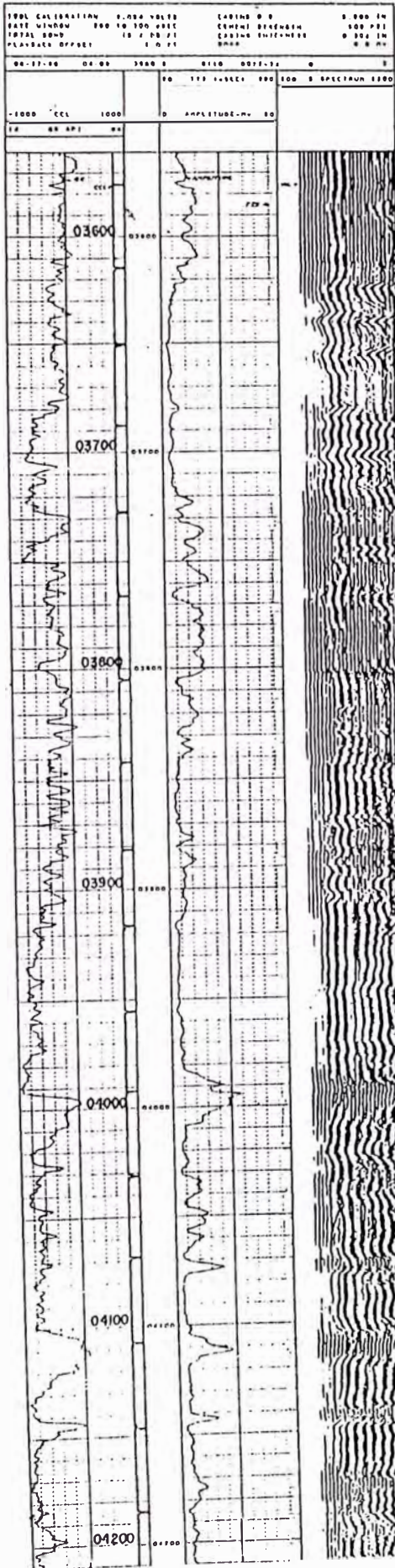
(6089'-5978', 5889'-5694' y 5612'-5386')

ZG a 6324!

ANEXO VI a
PREDICION GRAFICA
POZO N° 6110 "ALVAREZ OVEJA"



ANEXO VI b



ANEXO VII

COSTOS DE CEMENTACION

U.S.\$

POZO	CEMENTACION CONVENCIONAL RELLENO DEL HUECO				CEMENTACION EFECTUADA				PREDICCIÓN GRAFICA (CONTROL FLUJO GASEOSO)				INCREMENTO %
	CEMENTO	ADITIVOS	SERVICIO	TOTAL	CEMENTO	ADITIVOS	SERVICIO	TOTAL	CEMENTO	ADITIVOS	SERVICIO	TOTAL	
6020 SANDINO	10995	11134	9020	31149	10995	*	9020	55425	10995	23890	9020	43905	40.95
7279 TAIMAN	13050	18740	12286	44076	13050	*	12286	59559	13050	19870	12286	45206	2.56
7357 JABONILLAL	4582	11495	6997	23074	4582	11957	6997	23536	4582	11957	6997	23536	2.00
6035 HUALTACAL	3405	3382	9200	15987	3405	3740	9200	16345	3405	3740	9200	16345	2.24
7609 CARRIZO	8240	15375	10047	33662	8240	**	10047	47107	8240	28820	10047	47107	39.94
6110 ALV. OVEJA	10128	18200	11536	39864	10128	20473	11536	42137	10128	20473	11536	42137	5.70

* Se empleó lechada de cemento modificado para controlar el flujo gaseoso, sin basarse en el método grafico.

** Se empleó lechada de cemento modificado para controlar el flujo gaseoso, sin basarse en el método grafico. Diseño empleado coincidió con método preventivo de predicción grafica.

ANEXO VIII

COSTOS DE COMPLETACION

U. S. \$.

POZO	ESTIMADO	R E A L			COMENTARIOS
		COMPLETACION NORMAL	CON REPARACIONES	% INCREMENTO	
6020 SANDINO	220.00	258.40	298.40	15.50	
7279 TAIMAN	98.00	110.00	204.90	86.30	Mayor incidencia en SDP por squeezes, tapones y pesca.
7357 JABONILLAL	110.40	85.10	-	-	En el estimado se considero 3 etapas en exceso, en los objetivos secundarios
6035 HUALTACAL	136.70	20.60	-	-	El estimado considera baleo y fracturamiento. En la completacion no fue necesario el fracturamiento En el estimado se considero 3 etapas
7609 CARRIZO	71.60	122.05	-	-	En la estimulacion se uso un fluido especifico para pozos de gas, no considerado en el estimado.
6110 ALV. OVEJA	POZO EN COMPLETACION				

ANEXO IX

DESARROLLO DE RESERVAS

M BIs.

POZO	OBJETIVO PRIMARIO			OBJETIVO SECUNDARIO			COMENTARIOS
	ESTIMADAS	ENCONTRADAS	POR DESARROLL.	ESTIMADAS	ENCONTRADAS	POR DESARROLL.	
6020 SANDINO	120	60	55	—	—	—	Pozo Exploratorio, FMS. Muerto y Sandino Saturados de agua
7279 TAIMAN	40	10	0	65	65	50	FMS. Cretaceo (10MBIs.) y San Cristobal (15MBIs.), abandonado por mal cemento.
7357 JABONILLAL	20	20	20	25	20	20	FM. Mogollón In situ sin reservas (Est. 5MBIs.)
6035 HUALTACAL	30	0	0	25	0	0	Pozo Exploratorio, todas las formaciones saturadas con agua.
7609 CARRIZO	2 MMMP.C. (gas)	2M.M.M.P.C. (gas)	2M.M.M.P.C. (gas)	15	15	15	Objetivo secundario todavia sin completar, por producción de objetivo primario.
6110 ALV. OVEJA	POZO EN COMPLETACION						

ANEXO X

EVALUACION ECONOMICA DE LA PREDICCION GRAFICA

POZO	METODO CONVENCIONAL					PREDICCION GRAFICA					DIFERENCIA (MUS\$)	TIEMPO DE COMPLET. (DIAS)
	CEMENT. (MUS\$)	COMPLET. (MUS\$)	RESERVAS PERDIDAS (MBIs.)	RESERVAS PERDIDAS (MUS\$)	TOTAL (MUS\$)	CEMENT. (MUS\$)	COMPLET. (MUS\$)	RESERVAS PERDIDAS (MBIs.)	RESERVAS PERDIDAS (MUS\$)	TOTAL (MUS\$)		
6020 SANDINO	31.15	298.4	5.0	100.00	429.55	43.91	258.4	-	-	302.31	127.24	495
7279 TAIMAN	44.08	204.90	25.0	500.00	748.98	45.21	110.0	-	-	155.21	593.77	651
7357 JABONILLAL	23.07	*105.10	-	-	128.17	23.54	85.1	-	-	108.64	19.53	21
6035 HUALTACAL	15.99	*40.60	-	-	56.59	16.35	20.6	-	-	36.95	19.64	128
7609 CARRIZO	33.66	*142.05	-	-	175.71	47.11	122.05	-	-	169.19	6.55	14
6110 ALV. OVEJA	39.86	POZO EN COMPLETACION				42.14	POZO EN COMPLETACION					

* Considera el costo de la minima reparaci3n requerida para no perder reservas de petroleo

Reparaci3n minima : Dos squeezes.

Costo squeeze : Aprox. 10 M.U.S. \$

Costo 1 Bl. crudo : 20 U.S. \$