

20
1985
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS DINAMICO DEL PISTON VIAJERO

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A

FELIPE DE JESUS LUCERO ARANDA

MEXICO, D. F.

1985



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

	PAGINA
INTRODUCCION	i
LISTA DE TABLAS	1
LISTA DE FIGURAS	4
I · CONCEPTOS FUNDAMENTALES	8
1 FUNCIONAMIENTO DEL PISTON VIAJERO	8
2 EQUIPO SUPERFICIAL	9
2.1 VALVULA MAESTRA	9
2.2 LUBRICADOR	11
2.3 RECEPTOR	11
2.4 VALVULA MOTORA	11
2.5 CONTROLES SUPERFICIALES	11
3 EQUIPO SUBSUPERFICIAL	12
3.1 TUBERIA DE PRODUCCION	13
3.2 ADITAMENTO RETENEDOR	13
3.3 VALVULA DE PIE	13
3.4 RESORTE AMORTIGUADOR	13
3.5 CLASIFICACION DEL PISTON VIAJERO	14
4 TIPOS DE INSTALACIONES	15
5 APLICACIONES, VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL PISTON VIAJERO	16
II ASPECTOS GENERALES DE LOS METODOS DE PREDICION DEL PISTON VIAJERO	18
III DESARROLLO EXPERIMENTAL	25
1 MEDICION DE PRESION	27

	PAGINA
2 MEDICION DE VELOCIDAD	28
3 MEDICION DE PRODUCCION Y RESBALAMIENTO DE LIQUIDO	28
4 PROCEDIMIENTO DE PRUEBA	28
5 EVALUACION DE DATOS	31
6 RESULTADOS	34
IV MODELO HIDRODINAMICO	39
1 ASCENSO DEL PISTON 'VIAJERO	39
2 ECUACIONES DE CONSERVACION	43
3 COMPORTAMIENTO EN LA PRIMERA ETAPA	44
4 GAS ABAJO DEL PISTON	44
5 PELICULA DE LIQUIDO	47
6 BACHE DE LIQUIDO	49
7 GAS POR ENCIMA DEL BACHE	50
8 COMPORTAMIENTO EN LA SEGUNDA ETAPA	52
V EVALUACION DE LAS PREDICCIONES HECHAS POR EL MODELO	55
1 VELOCIDAD DEL PISTON	56
2 RESBALAMIENTO DEL LIQUIDO	59
3 PERFIL DE PRESION PARA GAS EN T.P. CONTRA TIEMPO	63
4 COMPARACION CON OTROS MODELOS	66
NOMENCLATURA	71
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
BIBLIOGRAFIA	79
APENDICE A	81
APENDICE B	112
APENDICE C	115

INTRODUCCION

Entre los métodos artificiales de producción utilizados en la industria petrolera para incrementar la eficiencia de producción en los pozos, se encuentra el pistón viajero, el cual se emplea en pozos de aceite con alta relación gas-aceite, así como en pozos de gas en donde se removerán acumulaciones de líquidos y en el bombeo neumático intermitente, donde éste puede reducir el resbalamiento de líquido. Además, una ventaja importante del pistón viajero es su continua acción limpiadora de parafinas e incrustaciones en la pared de la tubería de producción.

El pistón viajero convencional permite aumentar la eficiencia en los pozos que emplean la energía natural del yacimiento, debido al uso de un pistón libre que viaja de arriba hacia abajo en el interior de la tubería de producción de manera cíclica. El ciclo del pistón se inicia con el cierre de la tubería de descarga, y la colocación del pistón en el fondo de la tubería de producción. La presión del gas se incrementa en la tubería de producción y en el espacio anular durante este período. Después de que la presión en el espacio anular alcanza el nivel deseado, se abre la tubería de descarga, creándose una diferencial de presión a través del pistón, iniciándose con esto la elevación del pistón y del bache de líquido. El gas que se ha acumulado en el espacio anular se expande (debido al decremento de la presión) dentro de la tubería de producción abajo del pistón, después de llegar a la superficie el pistón inicia su caída hacia el fondo de la tubería de producción preparándose para el siguiente ciclo.

Si la línea de descarga se cierra inmediatamente a la llegada del pistón a la superficie, solamente se producirá el líquido que se tenga arriba del pistón. El resto de líquido que se encuentra abajo de éste, en forma de película

la resbalará formando parte del siguiente bache. Si la línea de descarga permanece abierta después del arribo del pistón a la superficie se tendrá una reducción en la presión del gas en el espacio anular, obteniéndose una producción adicional de líquido, que se encuentra inicialmente abajo del pistón en forma de película.

El patrón de flujo del gas durante el ciclo de bombeo cambiará debido a la instalación del pistón viajero. El flujo de gas solo será posible por el espacio existente entre el pistón y la pared de la tubería de producción, este flujo de gas creará una burbuja en forma de bala que penetrará al bache de líquido. La función ideal del pistón es la de actuar de tal manera que permita la producción completa del bache de líquido.

Los objetivos de este estudio son, el de ampliar los conceptos sobre la dinámica del pistón viajero y el de presentar un modelo hidrodinámico que pueda simular el comportamiento dinámico del pistón durante su operación. Para lograr estos objetivos se presenta el procedimiento experimental desarrollado por Lavoslav Rosina⁷ para el estudio de los efectos que producen las diferentes variables involucradas, en la eficiencia del pistón viajero. Estas variables son presión y volumen en el espacio anular, distribución del líquido arriba y abajo del pistón, velocidad del pistón, orificio del pistón y geometría del espacio entre el pistón y la tubería de producción. Los datos obtenidos experimentalmente se utilizaron para evaluar el modelo hidrodinámico.

LISTA DE TABLAS

TABLA		PAGINA
A1	Datos experimentales para bombeo neumático (descargando a presión atmosférica), carga de 13.12 pie, longitud de la T.R. 47.38 pie.	82
A2	Datos experimentales para el pistón viajero (descargando a presión atmosférica), pistón sólido No. 1, carga 13.12 pie, longitud de la T. R. 47.38 pie	83
A3	Datos experimentales para el pistón viajero (descargando a presión atmosférica), pistón sólido No. 2, carga 13.12 pie, longitud de la T. R. 47.38 pie	84
A4	Datos experimentales para el pistón viajero (descargando a presión atmosférica), pistón sólido No. 3, carga 13.12 pie, longitud de la T. R. 47.38 pie	85
A5	Datos experimentales para el pistón viajero (descargando a presión atmosférica), pistón No. 1 con orificio No. 1, carga 13.12 pie, longitud de la T. R. 47.38 pie	86
A6	Datos experimentales para el pistón viajero (descargando a presión atmosférica), pistón No. 1 con orificio No. 2, carga 13.12 pie, longitud de la T. R. 47.38 pie	87
A7	Datos experimentales para el pistón viajero (descargando a presión atmosférica), pistón No. 1 con orificio No. 3, carga 13.12 pie, longitud de la T. R. 47.38 pie	88

TABLA	PAGINA
A8 Datos experimentales para el pistón viajero (descargando a presión atmosférica), pistón sólido No. 1, carga 6.56 pie, longitud de la T. R. 47.38 pie.	89
A9 Datos experimentales para bombeo neumático (descargando a presión atmosférica), carga 6.56 pie, longitud de la - T. R. 47.38 pie.	90
A10 Datos experimentales para bombeo neumático (descargando a presión atmosférica), carga 9.84 pie, longitud de la - T. R. 47.38 pie	91
A11 Datos experimentales para bombeo neumático (descargando a presión atmosférica), pistón sólido No. 1, carga 9.84 pie, longitud de la T. R. 47.38 pie.	92
A12 Datos experimentales para el pistón viajero (pistón cerrado la línea de descarga), pistón sólido No. 1, carga - 13.12 pie, longitud de la T. R. 47.38 pie	93
A13 Datos experimentales para el pistón viajero (descargando a presión atmosférica), pistón sólido No. 1, carga 9.84 pie, longitud de la T. R. 22.79 pie	94
A14 Datos experimentales para el pistón viajero (pistón cerrado la línea de descarga), pistón sólido No. 1, carga 9.84 pie, longitud de la T. R. 22.79 pie.	95

TABLA	PAGINA
A15	Datos experimentales para el pistón viajero (descargando a presión atmosférica), pistón sólido No. 1, carga 9.84 pie, longitud de la T. R. 22.79 pie 96
A16	Datos experimentales para bombeo neumático (descargando a presión atmosférica), carga 13.12 pie, longitud de la T. R. 22.79 pie 97
A17	Datos experimentales para el pistón viajero (descargando a presión atmosférica), pistón sólido No. 1, carga 13.12 pie, longitud de la T. R. 22.79 pie. 98
A18	Datos experimentales para el pistón viajero (pistón cerrando la línea de descarga), pistón sólido No. 1, carga 13.12 pie, longitud de la T. R. 22.79 pie 99
A19	Datos experimentales para el pistón viajero (pistón cerrando la línea de descarga), pistón No. 1 con orificio No. 1, carga 13.12 pie, longitud de la T. R. 47.38 pie. 100
A20	Datos experimentales para el pistón viajero (descargando a presión atmosférica), pistón sólido No. 2, carga 13.12 pie, longitud de la T. R. 47.38 pie. 101
B1	Datos del pozo para la simulación 113
B2	Comparación de resultados obtenidos con diferentes modelos 114

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		PAGINA
1	Instalación convencional del pistón viajero	10
2	Volúmenes equivalentes de película de varios espesores que mojan el interior de tuberías de producción A.P.I. . .	22
3	Resultado de pruebas en un modelo de bombeo neumático in- termitente con varios tipos de pistones y sin pistón . . .	24
4	Diagrama esquemático de la instalación del pistón viajero . .	26
5	Resbalamiento de líquido como función del tiempo.	29
6	Registro típico de presión	32
7	Caídas de presión abajo del pistón	33
8	Registro del tiempo de viaje del pistón	35
9	Perfiles de velocidad del pistón	36
10	Modelo hidrodinámico para el ascenso del pistón - primera etapa	46
11	Modelo hidrodinámico para el ascenso del pistón - segunda etapa	53
12	Comparación entre las velocidades medidas y simuladas del - pistón sólido No. 1 en la prueba No. 117	57

FIGURA		PAGINA
13	Comparación entre las velocidades del pistón medidas y simuladas para el pistón No. 1 con orificio No. 1 en la prueba No. 157 y para el pistón sólido No. 2 en la prueba No. 168	58
14	Comparación entre el resbalamiento de líquido medido y el simulado empleando el pistón No. 1 sin orificio -- (tabla A12)	60
15	Comparación entre el resbalamiento de líquido medido y el simulado para el pistón No. 1 con orificio No. 1 -- (tabla A19)	61
16	Comparación entre el resbalamiento de líquido medido y simulado para el pistón No. 2 sin orificio (tabla A20)	62
17	Perfil de presión para gas en tubería de producción vs. - tiempo obtenido con el modelo, para el pistón sólido No. 1 Condiciones similares a la prueba No. 117	64
18	Perfil de presión para gas en tubería de producción vs. - tiempo obtenido con el modelo, para el pistón No. 1 con orificio No. 1, como en la prueba 157 y para el pistón sólido No. 2 como en la prueba 168	65
19	Perfil de velocidad del pistón simulado en un pozo de 7500 pies ($a = 1.01$, empleando la fb calculada por Hughmark)	68

FIGURA		PAGINA
20	Perfil de presión simulada para gas en T. P. vs. tiempo en un pozo de 7500 pies, PCI = 274.69 lb/pg ² abs. (a = 1.01, empleando la fb calculada por Hughmark) . . .	70
A1	Comparación de datos experimentales de resbalamiento de líquido para bombeo neumático y pistón viajero (pistón sólido No. 1) para una carga de 13.12 pie y una longitud de T. R. de 47.38 pie.	102
A2	Comparación de datos experimentales de resbalamiento de líquido para bombeo neumático y pistón viajero (pistón - sólido No. 1) para una carga de 9.84 pie y una longitud de T. R. de 47.38 pie	103
A3	Comparación de datos experimentales de resbalamiento de líquido para bombeo neumático y pistón viajero (pistón sólido No. 1) para una carga de 6.526 pie y una longitud de T. R. de 47.38	104
A4	Comparación de datos experimentales de resbalamiento de líquido para bombeo neumático y pistón viajero (pistón sólido No. 1) para una carga de 13.12 pie y una longitud de T. R. de 22.79 pie.	105
A5	Comparación de datos experimentales de resbalamiento de líquido para bombeo neumático y pistón viajero (pistón No. 1, orificio No. 1) para una carga de 13.12 pie y una longitud de T. R. de 47.38 pie	106

FIGURA		PAGINA
A6	Comparación de datos experimentales de resbalamiento de líquido para bombeo neumático y pistón viajero (pistón sólido No. 2) para una carga de 13.12 pie y una longitud de T. R. de 47.38 pie.	107
A7	Efecto del volumen del espacio anular en el resbalamiento de líquido del bombeo neumático y del pistón viajero .	108
A8	Efecto de la distribución del líquido en el resbalamiento de líquido en el pistón viajero (pistón sólido No. 1) .	109
A9	Efecto del diámetro del orificio en el resbalamiento de líquido en el pistón viajero (pistón No. 1 orificios No. 1, 2 y 3)	110
A10	Efecto del espacio existente entre el pistón y la pared de la tubería de producción en el resbalamiento de líquido en el pistón viajero (pistón sólido No. 1, 2 y 3). . . .	111

CAPITULO I

CONCEPTOS FUNDAMENTALES ^{*1}

1. FUNCIONAMIENTO DEL PISTÓN VIAJERO

El pistón viajero es un método artificial de producción, que emplea un pistón libre, el cual viaja en el interior de la tubería de producción de una manera cíclica.

Uno de los sistemas de producción más eficientes en la recuperación de aceite, incluye al pistón de expansión con control de ciclos. Los segmentos de expansión hacen contacto continuo contra las paredes internas de la tubería de producción, lográndose un sello efectivo entre el gas inyectado y el líquido (bache) a elevar. Una vez alcanzada la superficie (pistón-bache), una válvula en el pistón es abierta mecánicamente, permitiendo al pistón descender a través del gas y el aceite que se encuentran en el fondo de la tubería de producción. Cuando el pistón llega al extremo inferior de la tubería, la válvula

*1 Referencia al final.

vula cerrará mecánicamente, para que el gas inyectado a cierta presión pueda elevar el pistón hacia la superficie con una nueva carga de aceite.

El pistón inicia el viaje ascendente, cuando la válvula motora en la tubería de descarga es abierta por el control de ciclo, generalmente después que la presión en la tubería de revestimiento se ha incrementado. La válvula motora en la tubería de descarga generalmente es cerrada por la llegada del pistón a la superficie.

Cuando los pozos no liberan suficiente gas de formación para operar el pistón, deberá circularse gas de inyección. En una instalación convencional no se coloca empacador en la tubería de revestimiento, y la presión ejercida por la columna de gas liberado en el espacio anular es utilizada para controlar los ciclos del pistón. Sin embargo, los ciclos pueden controlarse por la presión en la tubería de producción o empleando controles de tiempo en la superficie.

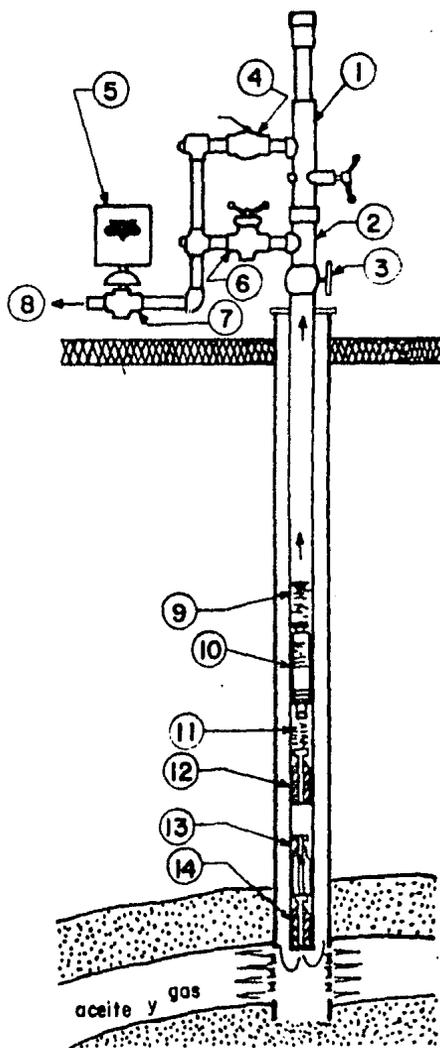
2. EQUIPO SUPERFICIAL.

La Fig. 1 muestra una instalación convencional del pistón viajero. Dependiendo de las condiciones del pozo, pueden realizarse algunas variaciones, tanto para el equipo superficial como para el equipo subsuperficial.

2.1. VALVULA MAESTRA.

La válvula maestra deberá tener una área de paso del mismo diámetro del área de la tubería de producción, con el objeto de permitir el movimiento ascendente y descendente del pistón.

El pistón llegará al lubricador, permitiendo su revisión continua.



- 1- LUBRICADOR
- 2- TEE DE PRODUCCION
- 3- VALVULA MAESTRA
- 4- VALVULA DE TAPON
- 5- CONTROL ELECTRONICO DIGITAL
- 6- VALVULA
- 7- VALVULA MOTORA
- 8- A LA TUBERIA DE DESCARGA O SISTEMA DE BAJA PRESION
- 9- BACHE DE LIQUIDO
- 10- PISTON VIAJERO
- 11- RESORTE AMORTIGUADOR
- 12- ADITAMENTO RETENEDOR RECUPERABLE
- 13- VALVULA DE PIE RECUPERABLE
- 14- ADITAMENTO RETENEDOR RECUPERABLE

FIG. 1-INSTALACION CONVENCIONAL
DEL PISTON VIAJERO.

En caso de que el pistón se encuentre en malas condiciones, se procederá a repararlo o sustituirlo por otro en buenas condiciones, preferentemente de las mismas características, para que no se afecte el diseño original.

2.2. LUBRICADOR.

El lubricador es una parte esencial en cualquier instalación del pistón viajero. Las partes con que cuenta el lubricador son: tapón, resorte amortiguador, contacto inicial del pistón con el lubricador y área de flujo.

2.3. RECEPTOR.

El receptor es usado para detener al pistón en el lubricador y facilitar su inspección o desmontaje.

Cuando es necesario verificar las condiciones físicas de un pistón, se requiere depressionar la instalación superficial; lo cual es logrado con una válvula de desfogue instalada debajo del lubricador.

2.4. VALVULA MOTORA.

La válvula motora es colocada en la tubería de descarga, la principal función de este dispositivo es permitir el paso del fluido o suspenderlo, dependiendo de las condiciones de operación que se establezcan.

Para activar el funcionamiento de la válvula motora se emplea una fuerza de gas exterior. Los diseños más recientes contemplan un diseño de control electrónico digital.

2.5. CONTROLES SUPERFICIALES.

Los controles superficiales se agrupan en tres categorías, que deter-

minan el ciclo de la válvula motora. Las categorías consideradas son las siguientes:

1) Control de Tiempo. Este tipo de control contiene un reloj de cuerda mecánica acoplado a un disco que regula el tiempo accionado por un sistema neumático. Este dispositivo permite programar intervalos de tiempo en el disco, para mandar o bloquear las señales a la válvula motora.

2) Control de Presión. Este control acciona la válvula motora ante la presencia de una diferencial de presión. Normalmente para la aplicación del pistón, el pozo abrirá cuando la presión en el espacio anular ha alcanzado un valor establecido, y cerrará cuando la presión se reduce al valor determinado previamente. Puede ser accionado por otras señales neumáticas; tales como cerrar automáticamente a la llegada del pistón a la superficie.

3) Control Electrónico. Este nuevo control consta de un circuito sólido para regular el tiempo y está adaptado a una celda de batería "D". Este sistema utiliza un aparato electrónico que opera una válvula reguladora para abrir o cerrar el pozo a un determinado tiempo con buena precisión. Adicionalmente responde a señales de sensores exteriores que envían variaciones de presión, nivel de líquido o el arribo del pistón a la superficie.

3. EQUIPO SUBSUPERFICIAL.

La instalación del equipo subsuperficial en el pozo, consiste básicamente de un aditamento retenedor y un resorte; su función es proveer un amortiguador de golpes, cuando el pistón cae al fondo. Las combinaciones dependerán del tipo de tubería de producción y de los mecanismos de conexión del pozo.

3.1. TUBERIA DE PRODUCCION.

La tubería de producción deberá calibrarse antes de introducir el - equipo subsuperficial. No solo para prevenir los doblamientos o aplastamientos de la tubería de producción, sino para una satisfactoria instalación.

Por lo general la sarta de producción no tiene empacador. El pistón viajero con empacador es empleado en casos aislados.

3.2. ADITAMENTO RETENEDOR.

Cuando la sarta de producción no está equipada con un niple de asiento, puede usarse el aditamento retenedor para colocar el resorte amortiguador y la válvula de pie. Para evitar que el pistón caiga en seco cuando llega al fondo de la tubería de producción, un aditamento retenedor individual deberá emplearse para colocar la válvula de pie, independientemente del resorte amortiguador.

3.3. VALVULA DE PIE

La válvula de pie se emplea cuando la presión del gas de inyección es mayor que la presión de bombeo estándar, cuenta con un cuello pescante adherido para recuperarse con equipo de línea de acero.

3.4. RESORTE AMORTIGUADOR.

Es una parte esencial en la instalación del pistón ya que previene los excesivos golpes sobre el pistón cuando va descendiendo al fondo del pozo, especialmente si éste no tiene líquido en la tubería de producción.

3.5. CLASIFICACION DEL PISTON VIAJERO.

En la Industria Petrolera existen básicamente cinco tipos de pistones, que trabajan bajo el mismo principio. Las variaciones que presentan son la eficiencia de sello, peso y arreglo del desviador de flujo.

A continuación se presenta la clasificación y descripción de los pistones:

1) Pistón con Sello Turbulento. Consta de una serie de canales cor tantes unidos a una barra sólida. El sello se efectúa por el movimiento rápido del gas por estos canales, generando una turbulencia dentro de cada canal, provocando una caída de presión en el movimiento del pistón.

2) Pistón Tipo Lavadora. Este pistón contiene una serie de anillos ligeramente menores al diámetro de la tubería de producción. El sello se efectúa por el movimiento del gas, los anillos de este dispositivo son presionados contra la pared de la tubería de producción por resortes excéntricos. Este pistón efectúa un sello turbulento similar al descrito en el inciso anterior.

3) Pistón Tipo Brocha. Este tipo extraño de pistón utiliza una bro cha como elemento sellante, puede contar con un desviador de flujo integral o prescindir de él.

4) Pistón con hojas de expansión. El diseño de este pistón contem pla resortes que sujetan hojas, las cuales sellan con el diámetro interior de la tubería de producción. Las hojas pueden regularse para lograr un mejor sello contra la tubería de producción.

5) Pistón con Segmentos Retractables. Este tipo de pistón contempla una serie de resortes que sujetan unos paquetes de acero, se adaptan y sellan al diámetro interior de la tubería de producción.

4. TIPOS DE INSTALACIONES.

Las instalaciones del pistón viajero pueden clasificarse en tres grupos. Estos grupos no se diferencian entre pozos de gas o pozos de aceite, únicamente si la cantidad de gas liberado por la formación es:

- a) Excesiva
- b) Adecuada
- c) Insuficiente para elevar el líquido a la superficie

La primera y segunda categoría utilizan la energía del gas de formación para recuperar el líquido producido. La tercera categoría deberá suministrar un volumen de gas adicional por el espacio anular para recuperar el líquido producido.

Con respecto a las condiciones mecánicas del pozo, se pueden considerar las siguientes instalaciones.

- a) Bombeo neumático intermitente con pistón viajero
- b) Pistón viajero con empacador
- c) Pistón viajero convencional sin empacador

Bombeo neumático intermitente con pistón viajero. Este tipo de instalación está diseñada para mejorar la recuperación de los líquidos, eliminando o reduciendo el resbalamiento de líquido.

El tipo de pozo, más adecuado para esta instalación, es el que pre-

senta un alto índice de productividad ($> 0.5 \text{ bl/día/lb/ppq}^2$) y baja presión de fondo fluyendo del pozo (Columna hidrostática del orden del 30 ó 40% en relación con la profundidad del pozo).

De acuerdo a reportes de campo² se ha observado que el empleo del pistón viajero en pozos de bombeo neumático intermitente, ha beneficiado la recuperación de aceite en un 15% y una reducción en el gas inyectado del 30%; por tal motivo se sugiere el uso continuo del pistón viajero en este tipo de instalaciones.

Pistón viajero con empacador. Estas instalaciones son comunes cuando se tienen altas relaciones gas-líquido.

Generalmente un contador de ciclos es usado, para el control automático del pistón viajero en pozos de gas. No obstante, el pistón podrá operarse manualmente, especialmente si no se requieren más de dos ciclos por día.

Pistón viajero convencional sin empacador. Esta instalación generalmente se emplea cuando el pozo proporciona toda la energía (gas), aunque algunos sistemas utilizan una fuente de gas adicional para complementar esta energía.

5. APLICACIONES, VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL PISTON VIAJERO.

Las aplicaciones del pistón viajero son las siguientes:

- 1) Eliminación de líquidos acumulados en pozos de gas.
- 2) Limpieza de parafinas e hidratos en la tubería de producción.
- 3) Incremento de la eficiencia de los pozos con instalaciones de bombeo neumático intermitente.

Algunas ventajas de este sistema son: bajo costo inicial, bajo mantenimiento y en algunas ocasiones no es necesaria una fuente de energía externa.

La principal ventaja de instalar el pistón viajero para producir un pozo, es el económico. Una instalación de pistón viajero costará aproximadamente un 10% de lo que costaría una unidad de bombeo para realizar el mismo trabajo. Adicionalmente el pistón viajero no consume energía eléctrica.

Otros factores que se deben considerar son las condiciones mecánicas de la tubería de producción y el diámetro del cabezal. La tubería de producción deberá ser del mismo diámetro desde la superficie hasta el fondo del pozo.

CAPITULO II

ASPECTOS GENERALES DE LOS METODOS DE PREDICCIÓN DEL PISTON VIAJERO

En 1965, Foss y Gaul³ publicaron un estudio sobre el comportamiento del pistón viajero basándose en pruebas efectuadas a 100 pozos en el campo Ventura Avenue. Después de que ellos desarrollaron una correlación entre los cálculos teóricos y datos reales de campo, este procedimiento (curvas) ha sido considerado como el método tradicional para el diseño del pistón viajero. Las curvas de Foss y Gaul fueron generadas en base a un modelo matemático el cual simplemente suma las fuerzas en el pistón a condiciones superficiales. Estos autores consideraron que la presión mínima en el espacio anular para elevar el bache podría ser igual a la suma de la caída de presión por fricción del gas en la tubería de producción, más la presión necesaria para elevar el peso del pistón, más la presión requerida para elevar el peso del bache de líquido, más la caída de presión debida a la fricción del bache, más la contrapresión en la superficie de la tubería de producción. Foss y Gaul desprecian cuatro factores: fricción del pistón, peso de la columna de gas, la fricción en el espacio anular (tubería de revestimiento-tubería de producción) y, la diferencial de

presión causada por la entrada de fluido debajo del pistón. En su análisis, ellos consideran una velocidad constante de ascenso del pistón de 1000 pie/min, y una velocidad descendente de 2000 pie/min a través del gas, y 172 pie/min a través de líquido. Ellos incluyeron el resbalamiento de gas que pasa por el pistón, multiplicando el volumen de gas necesario para la elevación por un factor de 1.15. Con el empleo de las curvas, es posible determinar el volumen de gas elevado y la presión en el espacio anular requerida para un amplio rango de condiciones para diferentes tamaños de tuberías de producción.

Usando el método de Foss y Gaul, Hacksma⁴ describió en 1972 el efecto del volumen de gas disponible en el comportamiento del pistón viajero. El conjunto el comportamiento del pistón viajero con el yacimiento a través del uso de la curva de IPR. Hacksma analizó el comportamiento del pistón viajero en pozos con una disponibilidad de gas deficiente, óptima y excesiva por cada bache de líquido.

Abercrombie¹ difiere de Foss y Gaul únicamente por el cambio de la velocidad descendente del pistón a través del gas. El estableció que 1000 pie/min es un valor más realista para la velocidad descendente del pistón que 2000 pie/min y empleando esta nueva velocidad descendente realizó su trabajo, basándose en el trabajo efectuado por Foss y Gaul. Adicionalmente, dió una descripción detallada del equipo del pistón viajero.

En 1981, Lea⁵ presentó un modelo dinámico del pistón viajero. Este análisis incluyó el cálculo de la variación de la presión en el espacio anular, posición, velocidad y aceleración durante el ascenso del pistón. El modelo matemático se basó en un balance de momentos tanto en el bache como en el pistón, bajo la consideración que ambos se mueven con la misma velocidad y acele-

ración. El estableció que la masa del pistón y el bache, multiplicada por la aceleración es igual a la diferencial de presión a través del pistón y el bache, menos el peso total del pistón y el bache, y la fricción del bache. En su ecuación, las presiones antes y después del pistón fueron ajustadas por el peso de la columna de gas y por la fricción.

El modelo de Lea no considera la fuga de gas que pasa por el pistón cuando el pistón y el bache ascienden, aunque éste implícitamente utilice el factor de 1.15 introducido por Foss y Gaul para considerar el resbalamiento del gas. Lea no consideró la diferencial de presión, causada por la entrada de fluido por debajo del pistón. También no consideró el efecto de la producción de gas durante el tiempo de ascenso del pistón, la presión superficial de la tubería de producción es considerada constante e igual a la del separador o la línea de descarga.

Empleando este modelo, Lea calculó los perfiles de velocidad del pistón, en base a ellos encontró que los requerimientos de gas para elevar el pistón son 16% menores a los calculados por Foss y Gaul utilizando una velocidad constante de ascenso del pistón. Lea concluyó que el resbalamiento de líquido decrece al incrementarse la velocidad, debido al aumento de la presión en el espacio anular. Esto no es muy recomendable, sin embargo, al incrementar la contra presión en la formación se reducirá el resbalamiento de líquido. Debido a esto, la principal preocupación de Lea fue el cálculo de la velocidad superficial mínima para tener una producción óptima considerando el resbalamiento del líquido aportado por el yacimiento.

Si bien el modelo de Lea es dinámico, en comparación al de Foss y Gaul, éste considera todavía una velocidad y aceleración común para el pistón

y el bache de líquido, a pesar de que en la realidad esto no ocurre, debido al resbalamiento de líquido.

En 1981, White⁶ presentó el modelo del pistón viajero para un pozo con bombeo neumático intermitente, basándose en la similitud dinámica entre el bombeo neumático intermitente y el pistón viajero. Para el bombeo neumático intermitente, él estableció la siguiente relación entre el resbalamiento de líquido, profundidad del pozo, velocidad del bache y la velocidad relativa de burbuja.

$$\text{Resbalamiento de líquido} = \frac{\text{Profundidad del pozo}}{1 + \frac{\text{Velocidad del bache}}{\text{Velocidad relativa de burbuja}}}$$

El resbalamiento de líquido es una función de la relación de dos velocidades. Si ambas velocidades son iguales, el resbalamiento de líquido es cero. En este modelo del pistón viajero, basado en un balance de momentos en el bache, White consideró ambas velocidades constantes e iguales, así como el término de pérdidas de aceleración fuera de la ecuación. Así, el modelo incluye los términos de fricción, gravitacional y diferencial de presión. Aunque tal modelo podría predecir un resbalamiento de líquido nulo, en su estudio experimental lo observó casi constante, y con un valor alto, al cual denominó "humedad residual" de la tubería de producción (Fig. 2).

Para explicar lo anterior, White consideró que el resbalamiento de líquido es reducido por el paso de gas en el espacio anular entre el pistón y la pared de la tubería de producción. Este gas entonces creará una burbuja encima del pistón. Aunque esta burbuja penetre en el bache, el líquido que

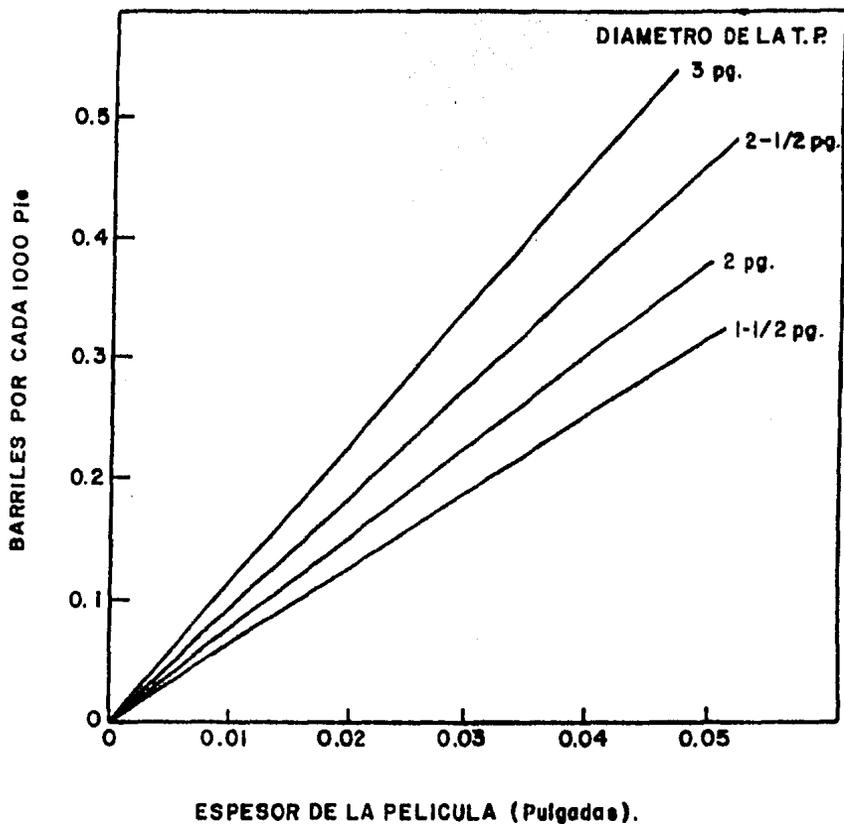
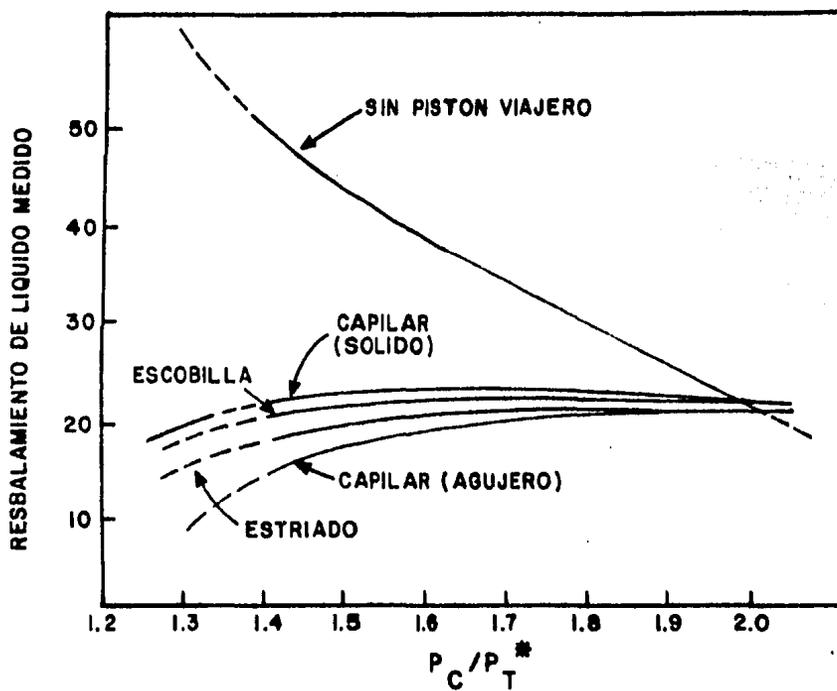


FIG. 2 - VOLUMENES EQUIVALENTES DE PELICULA DE VARIOS ESPESORES QUE MOJAN EL INTERIOR DE TUBERIAS DE PRODUCCION A.P.I.

desciende abajo de la burbuja no sufrirá pérdidas tan grandes como el que se encuentra encima del pistón.

El modelo realizado por White no considera todos los aspectos relacionados a la dinámica del pistón viajero. Es interesante observar los resultados experimentales obtenidos en el bombeo neumático intermitente con y sin pistón viajero (Fig. 3). Es de esperarse que el pistón aumente la eficiencia del bombeo en zonas con baja presión en el espacio anular. White encontró que si se perfora un orificio en el centro del pistón sólido se mejorará la eficiencia de bombeo. De lo anterior él concluyó que el pistón viajero trabajará mejor cuando descargue dentro de un patrón de flujo con burbujas dispersas, al cual denominó fase mixta; además estableció claramente que el concepto tradicional del pistón como un movimiento separado entre el bache de líquido en la parte superior y el del gas en la parte inferior no es correcto ni conveniente.



* NOMENCLATURA AL FINAL

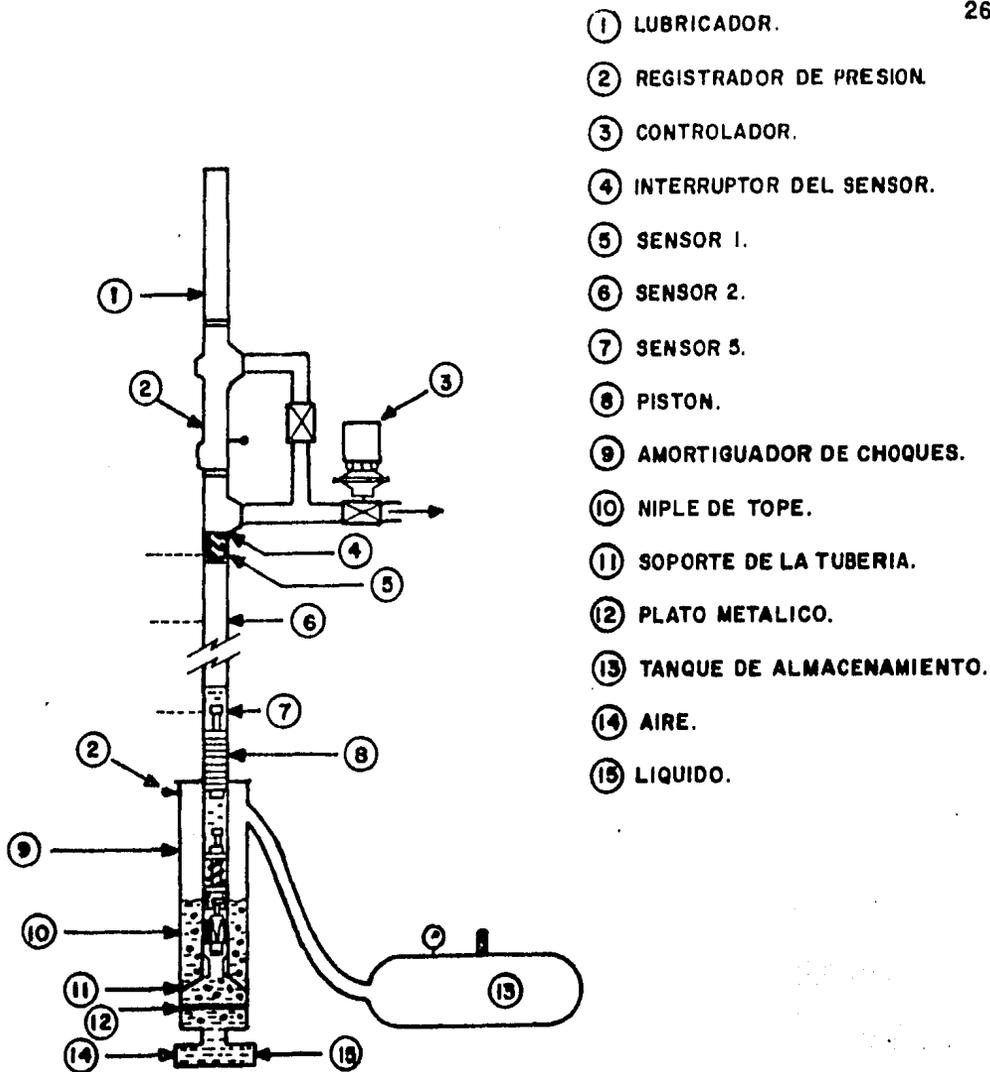
FIG. 3 — RESULTADO DE PRUEBAS EN UN MODELO DE BOMBEO NEUMÁTICO INTERMITENTE CON VARIOS TIPOS DE PISTONES Y SIN PISTÓN.

CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Lavoslav Rosina⁷ desarrolló una instalación experimental para simular la operación del pistón viajero convencional. Un diagrama esquemático de la instalación es mostrada en la Fig. 4.

La instalación consiste de una tubería transparente PVC de 60 pies de altura con un diámetro interior de 1 pg. que simula la tubería de producción. Para representar la tubería de revestimiento se cuenta con otra tubería transparente PVC con un diámetro interior de 3 pg. la cual se encuentra en el fondo de la tubería de producción, con una altura de 20 pies. Se dispone de un tanque de almacenamiento de gas, el cual se utiliza para simular diferentes volúmenes en el espacio anular. El agua y el aire se suministran a través de líneas individuales y son mezcladas en una tee. Antes de que la mezcla entre al espacio anular, pasa a través de un plato metálico poroso que simula las caídas de presión en la cara de la arena de la formación productora. En el



- ① LUBRICADOR.
- ② REGISTRADOR DE PRESION.
- ③ CONTROLADOR.
- ④ INTERRUPTOR DEL SENSOR.
- ⑤ SENSOR 1.
- ⑥ SENSOR 2.
- ⑦ SENSOR 3.
- ⑧ PISTON.
- ⑨ AMORTIGUADOR DE CHOQUES.
- ⑩ NIPLE DE TOPE.
- ⑪ SOPORTE DE LA TUBERIA.
- ⑫ PLATO METALICO.
- ⑬ TANQUE DE ALMACENAMIENTO.
- ⑭ AIRE.
- ⑮ LIQUIDO.

FIG.4 - DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LA INSTALACION DEL PISTON VIAJERO.

fondo de la tubería de producción se tiene un resorte que amortigua el impacto debido a la caída del pistón.

En la parte superior de la instalación se tiene un cabezal, el cual incluye un lubricador y dos líneas de flujo con una válvula de control. El lubricador cuenta con un resorte para resistir la fuerza de ascenso del pistón, así como de un receptor, para recibir al pistón en el lubricador, para una fácil inspección o sustitución de éste. Las dos líneas de flujo son colocadas de tal manera que una este encima del pistón retenido y la otra abajo de él. Estas permiten desalojar rápidamente el fluido remanente si continúa el deprimamiento después de que el pistón ha llegado a la superficie. La válvula en la línea de descarga podrá ser controlada manualmente o automáticamente con el arribo del pistón.

El control automático empleado, se encuentra cerca del interruptor del sensor muy próximo al extremo de la tubería de plástico, que se encuentra justamente abajo de la cabeza del múltiple del pozo.

1. MEDICION DE PRESION.

Las presiones se midieron en la tubería de producción y en el cabezal de la tubería de revestimiento. Los registradores de presión (modelo Validyne DP 15) se instalaron en el múltiple, que se encuentra en el cabezal del pozo y en el cabezal de la tubería de revestimiento. Un pequeño separador fue instalado en ambos cabezales para prevenir la entrada de agua en las líneas de presión, evitando así errores en las mediciones. Las señales provenientes de los registradores se procesaron por un detector (Validyne modelo DP 15). Las salidas del detector fueron provistas de filtros y la información se grabó en

unidades de cinta (Hewlett Packard de dos canales). Un manómetro de Bourdon de alta precisión se instaló en el cabezal de la tubería de revestimiento con el objeto de calibrar los registradores de presión ha utilizar.

2. MEDICION DE VELOCIDAD.

Se instalaron cinco sensores (modelo PK8246 9) para registrar el paso del pistón, se colocaron cada 10 pies a lo largo de la tubería de producción. Estos sensores se conectaron a un registrador Barton, el cual registró el paso del pistón por cada sensor. Estos dispositivos son capaces de calcular la velocidad promedio del pistón por cada 10 pies de sección de tubería de producción por encima de la tubería de revestimiento.

3. MEDICION DE PRODUCCION Y RESBALAMIENTO DE LIQUIDO.

La producción de líquido se midió con un dispositivo electrónico con una aproximación de 0.1 lbm. El resbalamiento de líquido se determinó directamente, midiendo la altura del líquido en la tubería de producción y en el espacio anular. El tiempo de medición se determinó a partir de la curva de resbalamiento de líquido vs. tiempo (Fig. 5) para el bombeo intermitente de gas para un bache de líquido de 6.56 pies con una presión inicial en el espacio anular de 15 lb/pg². Una buena aproximación se basó en la carga inicial de líquido, empleando:

$$\text{Carga} = \text{Producción} + \text{resbalamiento de líquido.}$$

4. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA.

Antes de iniciar la prueba, fue necesario calibrar los registradores de presión, empleando para ello un manómetro de Bourdon de alta precisión, que

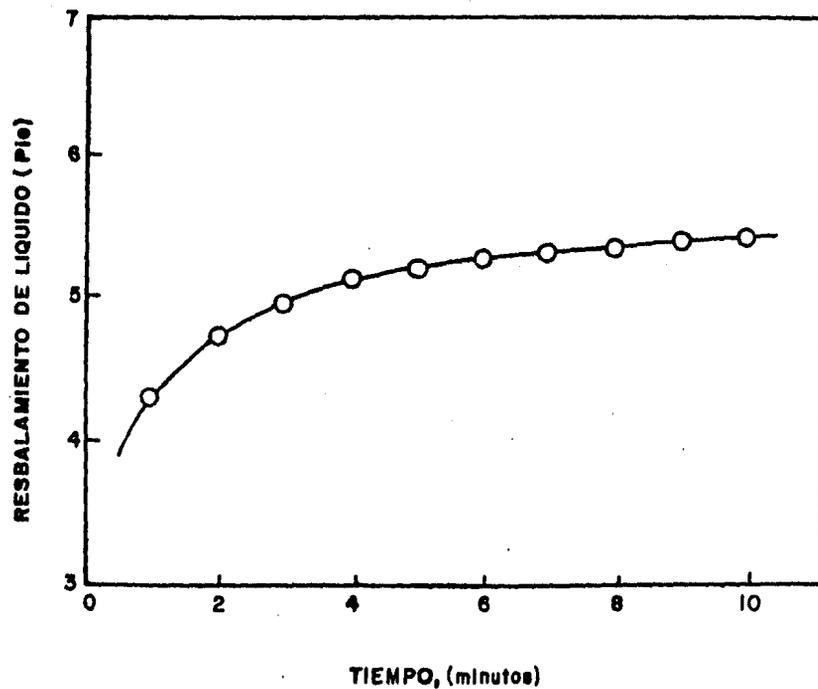


FIG. 5-RESBALAMIENTO DEL LIQUIDO COMO FUNCION DEL TIEMPO.

fue instalado previamente en el cabezal de la tubería de revestimiento.

Después de haberse realizado la calibración se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

1. Se cerro la válvula de la línea de flujo y el pistón fue colocado en el fondo de la tubería de producción.

2. Tanto la tubería de producción como la de revestimiento fueron represionadas con la inyección de aire en la tee de mezcla.

3. Se creo el bache de líquido con la altura deseada (carga), pero únicamente en la tubería de producción. Esto se logró con una pequeña diferencial de presión controlada entre las tuberías de producción y revestimiento. Para asegurarse que no ocurriera la formación del bache en el espacio anular, el líquido fue transferido a la tubería de producción hasta que una pequeña burbuja de gas proveniente del espacio anular penetrara el bache.

4. Se abrió manualmente la válvula esférica de la línea de flujo, lo que permitió el ascenso tanto del pistón como del bache de líquido. Se inició simultáneamente las mediciones de presión y velocidad del pistón.

5. Al mismo tiempo que la válvula de la línea de flujo fue abierta, un sistema de relojería fue activado para controlar el tiempo de medición de la producción de líquido. La medición de la producción de líquido se llevó a cabo durante el mismo intervalo de tiempo en cada prueba (6 minutos). Así mismo, después de que el bache de líquido fue producido y se reestablecieron las condiciones estáticas, se calculó la cantidad de líquido del bache que no fue producido, mediante las alturas de líquido en la tubería de producción y en el

espacio anular. Para verificar el balance de masa se tiene, que la suma del resbalamiento de líquido y la producción del bache debe ser igual a la carga inicial de líquido. Más de 300 pruebas⁷ se llevaron a cabo con aire y agua, variando tanto el volumen como la presión del espacio anular, carga del bache de líquido, distribución inicial de líquido arriba y abajo del pistón, diámetro, tamaño y tipo de pistón (sólido o con orificio). Los resultados de todas las pruebas realizadas se compararon con los obtenidos en un bombeo neumático intermitente sin pistón.

5. EVALUACION DE DATOS.

La Fig. 6 representa un registro típico de presión para pruebas en el pistón viajero (pruebas 18 y 117), con una presión inicial en el cabezal de la tubería de revestimiento (PCHI) de 20 lb/pg² man. La presión inicial en el cabezal de la tubería de producción (PTHI) fue 5.8 lb/pg² man. menor, que corresponde a una carga de 13.12 pies de agua. Por lo tanto, la presión inicial en el cabezal de la tubería de producción fue de 14.2 lb/pg²man.

Después de que se abrió la válvula de la línea de flujo, ambas presiones disminuyeron rápidamente. Se puede observar en la curva de presión de la tubería de producción, que el tiempo necesario para que el bache de líquido alcance la superficie es de 2.2 seg. Que es donde la curva PTH alcanza su primer valor mínimo. Después de los 2.2 seg. la curva PTH se incremento debido a que el bache de líquido paso completamente hasta los 2.55 seg. que es cuando el pistón llega a la superficie.

Una vez que se verificaron los resultados, se realizó un perfil de presiones en la tubería de producción, abajo del pistón durante el ascenso de

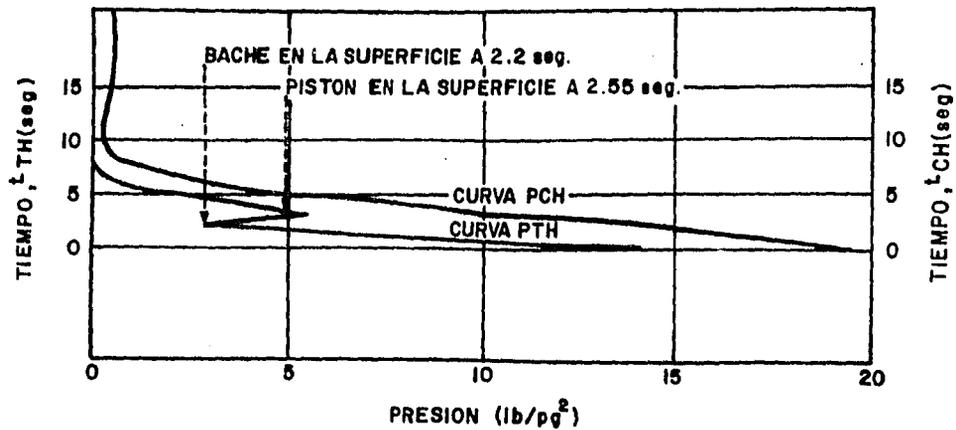


FIG.6 — REGISTRO TÍPICO DE PRESION

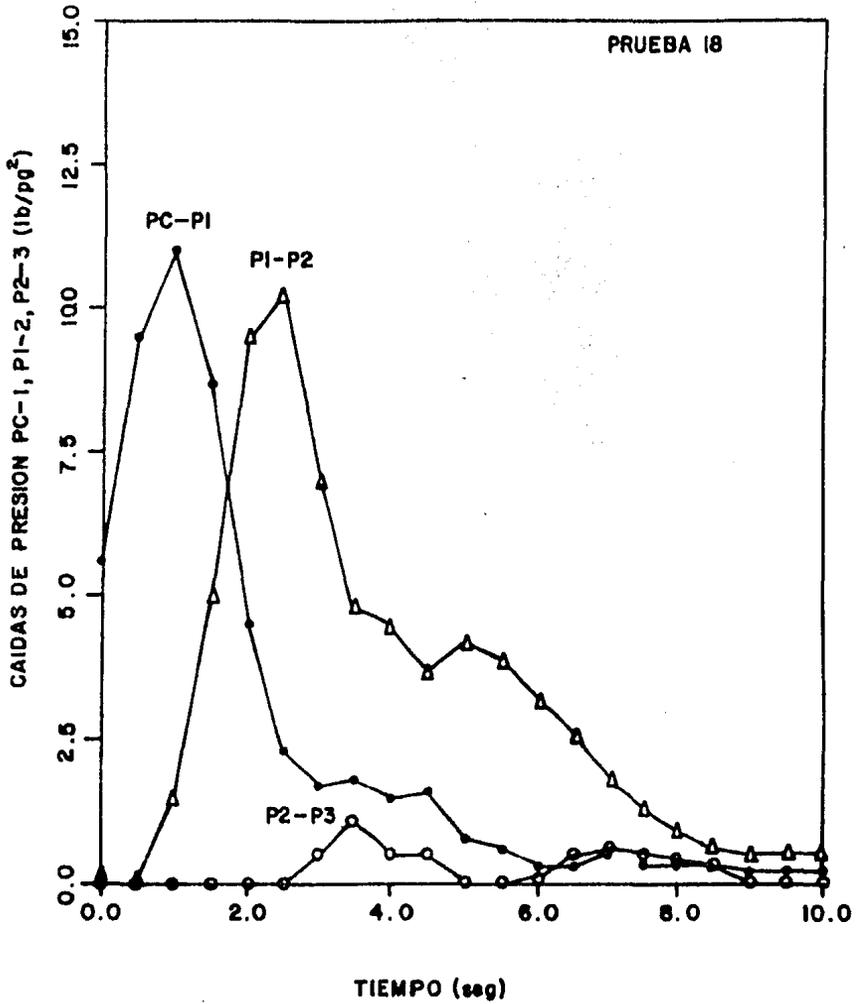


FIG.7-CAIDAS DE PRESION ABAJO DEL PISTON

éste. Se instalaron dos registradores de presión adicionales en la sarta de la tubería de producción uno a 20 pies (P1) y el otro a 50 pies (P2) de la zapata de la tubería de producción. En la Fig. 7 se presentan las caídas de presión PC-P1, P1-P2 y P2-P3, donde P3 = PTH y PC = PCH. Se puede observar que la caída de presión total abajo del pistón fue aproximadamente de 12 lb/pg² y el tiempo transcurrido fue de 2.5 seg.

Otra forma de obtener el tiempo de ascenso del pistón fue calculando el tiempo adicional requerido, después de que el bache ha alcanzado la superficie a 2.2 seg. A partir de la velocidad conocida del pistón en la última sección de 10 pies, que fue aproximadamente 27 pie/seg. se calculó un tiempo adicional de 0.37 seg. Este tiempo se sumó a los 2.2 seg. resultando un tiempo de ascenso del pistón de 2.57 seg. La Fig. 8 muestra el registro de tiempo de viaje del pistón para la misma prueba. Debido a que se conocía el espaciamiento entre sensores, fue posible calcular la velocidad promedio del pistón entre sensores utilizando los tiempos de viaje del pistón de la Fig. 8.

Empleando las velocidades promedio del pistón para cada sección de 10 pies, se construyó el perfil de velocidades del pistón durante su ascenso. En la Fig. 9 se muestran los perfiles de velocidad para las tres siguientes pruebas:

Prueba 18 - Pistón No. 1 sin orificio

Prueba 47 - Pistón No. 1 con orificio No. 1

Prueba 168 - Pistón No. 2 sólido

6. RESULTADOS

El análisis de los resultados experimentales muestra los siguientes

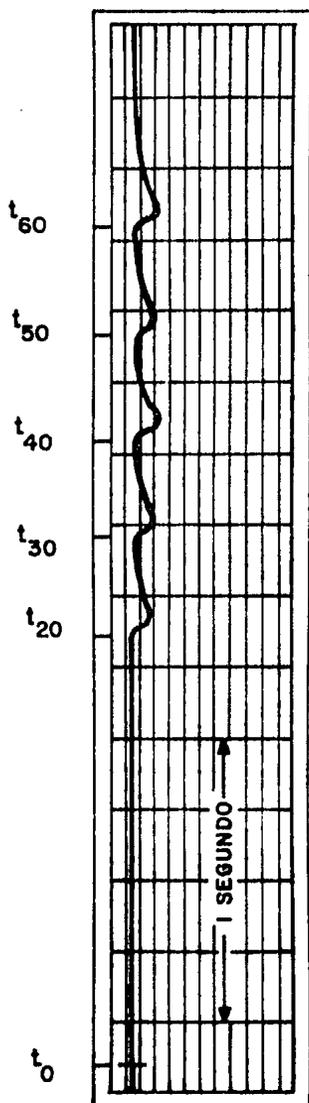


FIG.8 —REGISTRO DEL TIEMPO DE VIAJE DEL PISTON

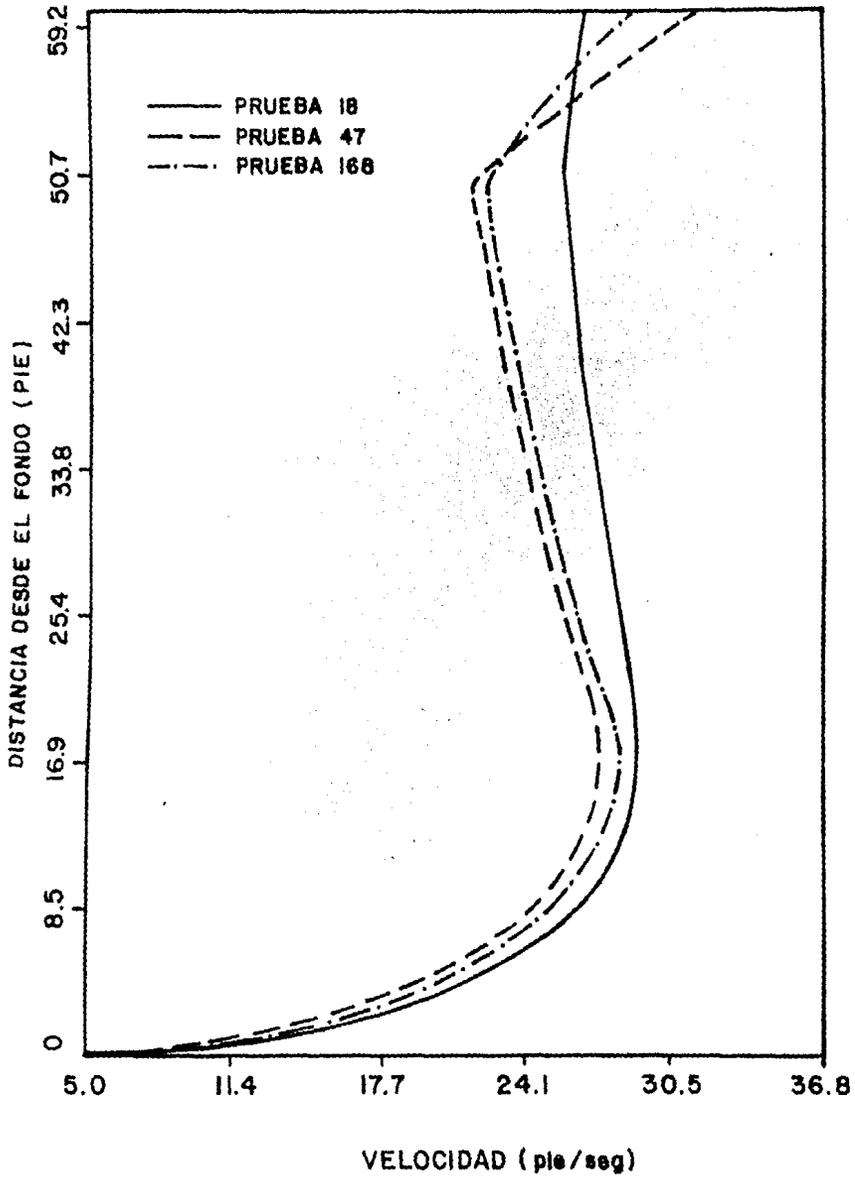


FIG 9 — PERFILES DE VELOCIDAD DEL PISTON

efectos en la eficiencia del pistón viajero en comparación con la del bombeo neumático.

1. Se tiene el mismo resbalamiento de líquido tanto en el bombeo neumático como en instalaciones con pistón viajero cuando se presenta una alta diferencial de presión. A una baja diferencial de presión (a través del pistón y el bache de líquido), el pistón viajero es mucho más eficiente que el bombeo neumático. Las Figs. A1-A6 muestran esta relación. Una disminución en la presión inicial en la tubería de revestimiento (PCHI) causa un ligero decremento en la eficiencia del pistón viajero (alto resbalamiento de líquido) hasta un punto, en donde además de decrecer PCHI, se tiene un aumento en la eficiencia de bombeo (bajo resbalamiento de líquido). El incremento en la eficiencia, teniéndose un bajo PCHI puede deberse al aumento del resbalamiento de gas sobre el pistón a una baja velocidad de ascenso. Al tenerse grandes resbalamientos de gas se proporcionan cambios en el patrón de flujo, creándose un mejor mecanismo de elevación.

2. El resbalamiento de líquido decrece al aumentar el volumen en el espacio anular tanto en el bombeo neumático como en instalaciones con pistón viajero, teniéndose la misma presión inicial en el espacio anular. Al incrementarse el volumen en el espacio anular, se facilita la elevación del pistón a rangos bajos de presión (Fig. A7).

3. Se tiene una alta eficiencia de elevación si una gran cantidad de líquido es colocada inicialmente sobre el pistón (Fig. A8). Al realizarse pruebas con diferentes pistones teniéndose inicialmente el mismo nivel de líquido en la tubería de producción y en el espacio anular, se observó que ninguno de ellos proporcionó una mejor eficiencia, que la observada en el bombeo

neumático sin pistón. De lo anterior se concluye que la eficiencia del pistón no se podrá determinar para los casos en que se tiene una cantidad significativa de líquido detras del pistón, debido a la pequeña longitud de la instalación experimental.

4. En el caso de descargar a la atmósfera, una cantidad significativa de líquido se producirá con el gas que se encuentra en la parte posterior del pistón, aunque inicialmente todo el líquido haya estado sobre el pistón.

5. La eficiencia de elevación del bache se mejoró perforando un pequeño orificio en el pistón. Dependiendo del diámetro de este agujero, una ΔP adicional podrá ser requerida para elevar el pistón (Fig. A9).

6. La variación de espacio entre el pistón y la pared de la tubería de producción afecta a la eficiencia de elevación del bache, de la misma forma que afecta el diámetro del orificio perforado en el pistón (Fig. A10).

7. Inicialmente el pistón y el bache de líquido están sujetos a una gran aceleración, seguida de una lenta desaceleración hasta iniciarse la producción del bache, que es cuando se incrementa nuevamente la aceleración en forma rápida.

CAPITULO IV

MODELO HIDRODINAMICO

El modelo más reciente sobre el bombeo neumático intermitente fue realizado por Schmidt⁸, el cual se basó en ecuaciones de conservación, este modelo representa en una forma real el fenómeno en estudio. El presente modelo es empleado para describir el comportamiento de ascenso del pistón.

1. ASCENSO DEL PISTON VIAJERO

Al iniciarse una prueba con pistón viajero, tanto el espacio anular como la tubería de producción son represionadas y el bache de líquido (carga) es colocado completamente en la tubería de producción. El ascenso del pistón - se inicia cuando la válvula de la línea de flujo es abierta. El gas comprimido que se encuentra encima del bache en el interior de la tubería de producción es rápidamente descargado, a la presión de separador. La diferencial de presión a través del pistón es la causa por la cual éste viaja a la superficie. El gas comprimido que se acumuló en el espacio anular sufrirá una expansión en el interior de la tubería de producción por abajo del pistón, formando una burbuja

de gas que elevará al pistón y al bache de líquido a la superficie.

Una característica de esta etapa, es la rápida aceleración ascendente del pistón y el bache de líquido. El pistón se mueve más rápido que el bache de líquido, lo que resulta en una pérdida de líquido (resbalamiento de líquido) en el bache. Este flujo de líquido desciende en forma de película sobre la pared de la tubería de producción, circundando el centro de la burbuja de gas. Así, se tendrá un flujo anular por debajo del pistón.

La alta velocidad del gas asociada con la alta velocidad del bache de líquido causa grandes fuerzas de corte a lo largo de la interfase gas-líquido entre la burbuja de gas y la película de líquido, por debajo del pistón. Estas grandes fuerzas de corte causan perturbaciones en la película, lo que resulta en el arrastre de líquido dentro de la burbuja de gas en forma de pequeñas gotas de líquido. Esto se observó experimentalmente, como una alta caída de presión por debajo del pistón, la cual se puede observar en la Fig. 7.

Al transcurrir el tiempo, tanto el pistón como el bache de líquido sufren una disminución en su movimiento de ascenso, como resultado de grandes fuerzas de fricción y altas caídas de presión, debido a la disminución de energía proveniente de la expansión del gas del espacio anular. A pesar de que el pistón y el bache de líquido sufren una desaceleración, el movimiento rápido del pistón aún continúa para penetrar al bache de líquido.

El flujo de gas proveniente del espacio anular tiende a remover el líquido de las paredes de la tubería de producción por debajo del pistón. Esto causa el arrastre de mayor cantidad de líquido dentro de la burbuja de gas.

Al llegar el bache de líquido al cabezal de la tubería de producción

e iniciarse la producción de éste, el cambio en la presión hidrostática y en la fricción del fluido en el bache propician nuevamente una aceleración del pistón. Cuando el pistón alcanza la parte superior del cabezal de la tubería de producción la válvula que se encuentra en la línea de flujo es cerrada por la acción del sensor del pistón. Las presiones en la tubería de producción y en el espacio anular se igualan. El líquido que no se produjo, desciende y se acumula en el fondo de la tubería de producción formando el líquido remanente.

La descripción anterior sobre el ascenso del pistón coincide con los resultados obtenidos en forma experimental. Las velocidades promedio del pistón y del bache y la relación de estas velocidades fueron calculadas para varios casos. Para el pistón sólido No. 1 la velocidad del pistón es mayor que la del bache por un factor de 1.20 a 1.30 dependiendo del tamaño de la carga de líquido. Para el caso del pistón con orificio, esta relación fue significativamente menor, con un valor igual o menor a 1.0. Con lo anterior se concluye que el patrón de flujo para un pistón sólido es similar al patrón de flujo en el bombeo neumático intermitente. La diferencia estriba en que el pistón viaja a la superficie debido al movimiento rápido de la burbuja de gas que no permite la penetración de gas a través del centro del bache de líquido. El flujo de gas o líquido a través del pistón es posible solamente en el espacio anular entre la pared de la tubería de producción y el pistón. Ya que el resbalamiento de líquido es una función de la relación de velocidades (pistón/bache), este factor podrá ser usado en el modelo como una representación del resbalamiento de líquido.

Se cree que una cantidad pequeña de gas se desvía del pistón, la cual fluye ascendentemente por el espacio anular y actúa removiendo el líquido y

minimizando la tendencia al resbalamiento de líquido. Lo anterior se basó en la observación de que la presión del gas abajo del pistón es mayor que la presión debida a la carga del líquido más toda la fricción. Esta desviación de gas no se tomó en cuenta en este modelo. Sin embargo, se podrá tomar en cuenta empleando un factor empírico de 1.15 cuando se este calculando el volumen de gas necesario para el bombeo.

Para el caso en que se emplee un pistón con orificio (o con un gran espacio libre), el patrón de flujo será más complicado. Una pequeña relación de velocidades pistón/bache (igual o menor a 1,0) indicará que la penetración de la burbuja en el bache ha ocurrido. Ya que se tiene flujo de gas a través del orificio, en el centro del pistón, una región de dos fases existirá encima del pistón. Una burbuja se formará encima del pistón y penetrará en el interior del bache de líquido, creándose así el resbalamiento de líquido encima del pistón. El movimiento es lento detrás del pistón, lo que permitirá acumular el resbalamiento de líquido conduciéndose parte de éste a la superficie. El primer intento por modelar este caso complejo fue empleando una pequeña relación de velocidades pistón/bache, "a". Sin embargo, es obvio que se necesita un modelo más complicado para este caso que para un pistón sólido.

El fenómeno de ascenso, para un pistón sólido puede ser representado matemáticamente en dos etapas:

1. Ascenso de la parte superior del bache al cabezal del pozo (Fig. 10); y
2. Producción del bache, la cual culminará con la llegada del pistón a la cabeza del pozo (Fig. 11).

El modelo matemático consiste de un conjunto de ecuaciones sencillas que describen el comportamiento básico del sistema físico a lo largo de las dos etapas antes mencionadas. Este modelo considera que la mayoría de las variables físicas tales como densidad, velocidad, presión, etc., pueden ser reemplazadas por sus correspondientes valores promedios reflejando aún así el comportamiento del sistema físico con una buena aproximación. Esta consideración elimina la necesidad de resolver un sistema de ecuaciones diferenciales parciales simultáneas.

2. ECUACIONES DE CONSERVACION

El comportamiento dinámico de cada una de las etapas se representa por las dos ecuaciones siguientes: La ecuación de continuidad,

$$\iiint_{V(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint_{S(t)} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad \dots 1$$

La cual indica la conservación de la masa en el movimiento de un volumen de control $V(t)$ con una superficie $S(t)$; y la ecuación lineal de momento

$$\begin{aligned} & \iiint_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) dV + \iint_{S(t)} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA \\ = & - \iint_{S(t)} p \vec{n} dA - \iint_{S(t)} \vec{n} \cdot \tau dA + \iiint_{V(t)} \rho \vec{g} dV \quad \dots 2 \end{aligned}$$

La cual indica la conservación del momento para un volumen de control $V(t)$. Las Ecs. 1 y 2 son desarrolladas en el apéndice C.

3. COMPORTAMIENTO EN LA PRIMERA ETAPA

La primera etapa de ascenso del pistón es mostrada en la Fig. 10. Esta etapa se inicia cuando la válvula de la línea de flujo es abierta y termina cuando el bache de líquido alcanza el cabezal de la tubería de producción.

Consideraciones para esta etapa:

1. El área de la burbuja es constante desde la superficie hasta el fondo.
 2. Existe una relación lineal entre la velocidad de la burbuja de gas y la del bache de líquido; y
 3. Al moverse el pistón en la parte frontal de la burbuja, la velocidad de éste será igual a la velocidad de la burbuja en el frente.
4. GAS ABAJO DEL PISTON.

La ecuación para el gas almacenado en el espacio anular, se determinó empleando la ecuación 1 y una ecuación de estado, y es la siguiente:

$$\frac{M}{zRT} V_{TC} \frac{dp_B}{dt} + m_{SCT} = 0 \quad \dots 3$$

La conservación de masa para la burbuja de gas en la tubería de producción puede aproximarse con la siguiente expresión:

$$\left[0.5 Z_{BF} A_b \right] \frac{dp_B}{dt} + \left[0.5 Z_{BF} A_b \right] \frac{dp_{BF}}{dt} -$$

$$\left[\pi (r_T - y) Z_{BF} (p_B + p_{BF}) \right] \frac{dy}{dt}$$

$$= \frac{zRT}{M} m_{GCT} - p_{BF} v_{BF} A_b \quad \dots 4$$

Combinando las ecuaciones 3 y 4 se tiene la ecuación que representa la conservación de masa para el gas en el espacio anular y en la burbuja de gas - abajo del pistón.

$$\left[0.5 Z_{BF} A_b + V_{TC} \right] \frac{dp_B}{dt} + \left[0.5 Z_{BF} A_b \right] \frac{dp_{BF}}{dt}$$

$$- \left[\pi (r_T - y) Z_{BF} (p_B + p_{BF}) \right] \frac{dy}{dt} = p_{BF} v_{BF} A_b \quad \dots 5$$

donde

$$v_{BF} = \frac{dz_{BF}}{dt} \quad \dots 6$$

La caída de presión en la tubería de producción asociada a la burbuja de gas es aproximadamente.

$$144 g_C (p_B - p_{BF}) = f_b \frac{\bar{\rho}_b v_{BF}^2 Z_{BF}}{2d} + g \bar{\rho}_b Z_{BF} \quad \dots 7$$

De acuerdo a la correlación de Hughmark⁹, el factor de fricción f_b incluye las caídas de presión debidas al arrastre de líquido

$$f_b = 0.005 \left(1 + 149.0 \frac{v}{r_T} \right) \quad \dots 8$$

y la densidad media del gas de la burbuja que se encuentra en el interior de la tubería de producción se calcula a partir de la siguiente ecuación de estado:

$$\bar{\rho}_b = \frac{M}{zRT} \frac{(p_B + p_{BF})}{2} \quad \dots 9$$

Diferenciando la ecuación 7, se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & \left[144 g_c - z_{BF} \frac{0.5M}{zRT} \left(\frac{f_b v_{BF}^2}{2d} + g \right) \right] \frac{dp_B}{dt} \\ - & \left[144 g_c + z_{BF} \frac{0.5 M}{zRT} \left(\frac{f_b v_{BF}^2}{2d} + g \right) \right] \frac{dp_{BF}}{dt} \\ - & \left[z_{BF} \frac{0.5 M}{zRT} \frac{v_{BF}^2}{2d} \frac{(0.005)(149.0)}{r_T} (p_B + p_{BF}) \right] \frac{dy}{dt} \\ - & \left[z_{BF} \frac{0.5 M}{zRT} \frac{f_b v_{BF}}{d} (p_B + p_{BF}) \right] \frac{dv_{BF}}{dt} \\ - & \left[\frac{0.5 M}{zRT} \left(\frac{f_b v_{BF}^2}{2d} + g \right) (p_B + p_{BF}) \right] \frac{dz_{BF}}{dt} = 0 \quad \dots 10 \end{aligned}$$

5 PELICULA DE LIQUIDO.

Si se realiza un balance de masa en la película de líquido desde la

zapata de la tubería de producción hasta Z_{BF} la ecuación 1 presentará la siguiente relación entre v_{BF} y la razón de cambio del espesor de la película.

$$2 \pi \rho_L (r_T - y) Z_{BF} \frac{dy}{dt} + \rho_L v_F (A_T - A_b) = 0 \quad \dots 11$$

donde

$$A_b = \pi (r_T - y)^2 \quad \dots 12$$

El ritmo con el cual el pistón (burbuja de gas) invaden el bache de líquido es muy importante en la determinación de la cantidad de película de líquido permisible en la pared de la tubería. Algunos investigadores han coincidido que existe una relación casi lineal entre la velocidad de la burbuja de gas \vec{v}_{BF} y la velocidad del bache de líquido \vec{v}_Z , teniendo-se:

$$\vec{v}_{BF} = a \vec{v}_Z + b \quad \dots 13$$

Diferenciando con respecto al tiempo la ecuación 13 tenemos que:

$$\frac{d\vec{v}_{BF}}{dt} - a \frac{d\vec{v}_Z}{dt} = 0 \quad \dots 14$$

Zuber y Findlay¹⁰ mostraron que los coeficientes a y b dependen del perfil de velocidad y fracción de vacío en el líquido, inmediatamente arriba de la penetración de gas. Para este estudio en particular, los valores de los coeficientes a y b dependerán del tipo de pistón:

Pistón No. 1, sólido	$a = 1.07,$	$b = 1.0$
Pistón No. 1, orificio No. 1	$a = 1.03,$	$b = 1.0$
Pistón No. 2, sólido	$a = 1.03,$	$b = 1.0$

6 BACHE DE LIQUIDO.

Al realizar un balance de momentos sobre el bache de liquido, la ecuación 2 se reduce a

$$\rho_L A_T (Z_{LF} - Z_{BF}) \frac{dv_Z}{dt} = -\rho_L A_T v_Z^2 + \rho_L v_{BF}^2 A_h + \rho_L v_F^2 (A_T - A_b) - \rho_L q (Z_{LF} - Z_{BF}) A_T + 144 q_c A_T (p_S - p_{BF} - \Delta p)$$

$$\frac{f_L \rho_L v_Z \left| v_Z \right| (Z_{LF} - Z_{BF}) A_T}{2d} \dots 15$$

donde Δp es la caída de presión requerida para soportar el peso del pistón (W_{PL}):

$$\Delta p = \frac{W_{PL}}{144 A_{PL}} \dots 16$$

Los factores de fricción del líquido y del gas f_L y f_g fueron calculados a partir de la ecuación de Zigrang y Sylvester¹¹.

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon/d}{3.7} - \frac{5.02}{N_{Re}} \log \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} + \frac{13}{N_{Re}} \right) \right] \dots 17$$

donde:

$$N_{ReL} = \frac{\rho_L v_Z d}{\mu_L} \dots 18$$

y

$$N_{ReG} = \rho_G \frac{(v_Z + v_o) d}{2 \mu_G} \dots 19$$

Aplicando un balance de masa en el bache del líquido y empleando la ecuación 1 se tiene:

$$v_F = \frac{v_Z A_T - v_{BF} A_b}{A_T - A_b} \quad \dots 20$$

La velocidad de ascenso del pistón está definida por el cambio de la longitud del bache de líquido.

$$\frac{dz_{LF}}{dt} = v_Z \quad \dots 21$$

7. GAS POR ENCIMA DEL BACHE.

La caída de presión que se tiene encima del bache de líquido se calcula a partir de un balance de momentos en el gas que se encuentra en la parte superior del bache, si se desprecian los términos gravitacional y de aceleración se tiene,

$$144 g_c (p_S - p_{sep}) = \frac{f_G \bar{\rho}_G \bar{v}_Z}{2d} \left| \bar{v}_Z \right| (Z_T - Z_{LF}) + \frac{K \rho_O v_O}{2} \left| v_O \right| \quad \dots 22$$

donde la densidad media del gas que se encuentra encima del bache se calcula a partir de la siguiente ecuación de estado.

$$\bar{\rho}_G = \frac{M}{zRT} \left(\frac{p_S + p_{sep}}{2} \right) \quad \dots 23$$

y la velocidad media del gas que se encuentra en la parte superior del bache se puede obtener en forma aproximada con la siguiente expresión:

$$\bar{v} = \frac{v_Z + v_O}{2} \quad \dots 24$$

Diferenciando la ecuación 22 y considerando un factor de fricción cons

tante calculado con la ecuación 17 empleando una densidad y una velocidad promedio, se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 & \left[1 - I (Z_T - Z_{LF}) (v_Z + v_0) \left| (v_Z + v_0) \right| \right] \frac{dp_S}{dt} \\
 - & \left[2 I (p_S + p_{sep}) (Z_T - Z_{LF}) \left| (v_Z + v_0) \right| \right] \frac{dv_Z}{dt} \\
 - & \left[2 I (p_S + p_{sep}) (Z_T - Z_{LF}) \left| (v_Z + v_0) \right| - 2 J v_0 \right] \frac{dv_0}{dt} \\
 + & \left[I (p_S + p_{sep}) (v_Z + v_0) \left| (v_Z + v_0) \right| \right] \frac{dz_{LF}}{dt} = 0 \quad \dots 25
 \end{aligned}$$

donde

$$I = \frac{f_G}{(4) (2) (144) (g_c) (d)} \frac{0.5 M}{zRT} \quad \dots 26$$

y

$$J = \frac{K p_{sep}}{144 g_c} \frac{0.5 M}{zRT} \quad \dots 27$$

donde

K = pérdida de velocidad en el cabezal (0.6 por cada codo)

... 28

La velocidad de salida del gas v_0 se obtiene a partir de un balance de masa en el gas que se encuentra encima del bache, el cual se reduce a:

$$\frac{d\bar{p}_G}{dt} A_T (Z_T - Z_{LF}) + \frac{M}{zRT} p_{sep} A_T v_0 - \frac{M}{zRT} p_S A_T v_Z = 0 \quad \dots 29$$

Diferenciando con respecto al tiempo la ecuación 29 se tiene:

$$0.5 (Z_T - Z_{LF}) \frac{d p_S}{dt} = p_S v_Z - p_{sep} v_0 \quad \dots 30$$

Las ecuaciones 5, 6, 10, 11, 14, 15, 21, 25 y 30 forman un sistema lineal de ecuaciones, con las variables p_B , p_{BF} , y , v_{BF} , v_Z , Z_{LF} , v_0 , p_S y Z_{BF} . Este sistema de ecuaciones se puede resolver empleando el método de eliminación de Gauss - Jordan.

8. COMPORTAMIENTO EN LA SEGUNDA ETAPA.

La segunda etapa en el movimiento ascendente del pistón es mostrada en la Fig. 11. Esta etapa comienza cuando el bache del líquido alcanza el cabezal de la tubería de producción y termina cuando el pistón llega al cabezal de la tubería de producción.

Las consideraciones hechas en esta etapa son las mismas que en la primera, excepto que:

1. $p_S = p_{sep}$

2. $Z_{LF} = Z_T$

Las ecuaciones 21, 25 y 30 no son aplicables en esta etapa. Así, se tendrán tres incógnitas menos en el sistema de ecuaciones. La ecuación de balan

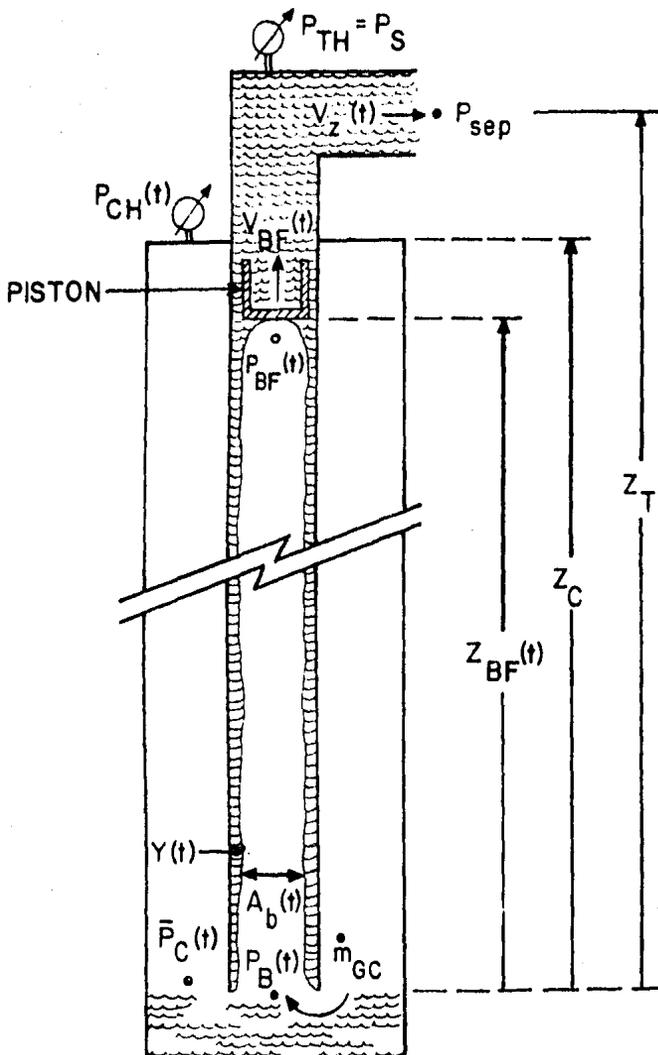


FIG II — MODELO HIDRODINAMICO PARA EL ASCENSO DEL PISTON - SEGUNDA ETAPA.

ce de momentos en el bache de líquido ahora incluye un término de pérdida por fricción debido a la curvatura en la salida de la tubería de producción. Así, la ecuación 15 será modificada:

$$\begin{aligned} \rho_L A_T (Z_T - Z_{BF}) \frac{dv_Z}{dt} &= - \rho_L A_T v_{BF}^2 A_b + \rho_L v_F^2 (A_T - A_b) \\ - \rho_L g (Z_T - Z_{BF}) A_T + 144 g_c A_T (\rho_S - \rho_{BF} - \Delta \rho) \\ - \frac{f_L \rho_L v_Z}{2} \left| \frac{v_Z}{2} \right| (Z_T - Z_{BF}) A_T - 0.6 v_Z \left| v_Z \right| \rho_L A_T \end{aligned} \quad \dots 31$$

Las ecuaciones 5, 6, 10, 11, 14 y 31 podrán resolverse como en la primera etapa, empleando el método de eliminación de Gauss - Jordan.

CAPITULO V

EVALUACION DE LAS PREDICCIONES HECHAS POR EL MODELO

El modelo hidrodinámico fue validado en una serie de pruebas, para ver como reproducia los datos experimentales. En las pruebas se empleó un pistón viajero y un bache de líquido de una longitud inicial (carga) de 13.12 - pies. Todas las pruebas realizadas se llevaron a cabo en una tubería de producción de 60 pies de longitud con 1 pg. de diámetro, con una tubería de revestimiento de 47.38 pies de longitud y 3 pg. de diámetro. El primer grupo de pruebas, de las diez realizadas representa el bombeo con el pistón sólido No. 1 sin orificio (tabla A12).

El segundo grupo de pruebas representa el bombeo con el pistón No. 1 con orificio No. 1 (tabla A19). Esta simulación muestra el efecto del orificio del pistón sobre el resbamiento de líquido. El mismo grupo representa además el bombeo con el pistón sólido No. 2 (tabla A20) que muestra el efecto del espacio entre el pistón y la tubería de producción sobre el resbamiento de líquido.

La comparación de los resultados de la simulación y los datos experimentales se muestran en las Figs. 12 a 16.

1. VELOCIDAD DEL PISTÓN.

La Fig. 12 muestra las velocidades del pistón medidas y simuladas vs. tiempo para el pistón sólido No. 1, obtenidas de la prueba No. 117. Los resultados de la simulación son presentados en la tabla B8*. El modelo predice velocidades ligeramente mayores, como consecuencia de despreciar el resbalamiento de gas que pasa por el pistón y la caída de presión debida al flujo de gas en el espacio anular y alrededor de la zapata de la tubería de producción. Estos efectos podrán ser compensados en el modelo con la reducción de la PCH inicial para igualar las velocidades.

La Fig. 13 presenta las velocidades del pistón medidas y simuladas vs. tiempo para el pistón No. 1 con orificio No. 1 (condiciones similares a la prueba No. 47) y para el pistón sólido No. 2 (condiciones similares a la prueba No. 168). El modelo predice un perfil de velocidades mayor que el experimental. Estos resultados se obtienen a partir del movimiento del pistón atrás del frente de la burbuja, creada por el flujo de gas a través del orificio del pistón o, por el espacio entre el pistón y la pared de la tubería de producción. El modelo predice una velocidad frontal de burbuja, la cual es mayor que la velocidad del pistón medida. Así, mientras el pistón se encuentre en la parte superior de la burbuja, la velocidad simulada será exacta (Fig. 12). También es claro que el espacio entre el pistón y la pared de la tubería de producción proporciona el mismo efecto en la velocidad del pistón que el proporcionado por el orificio del pistón.

*En el apéndice B de la referencia 7.

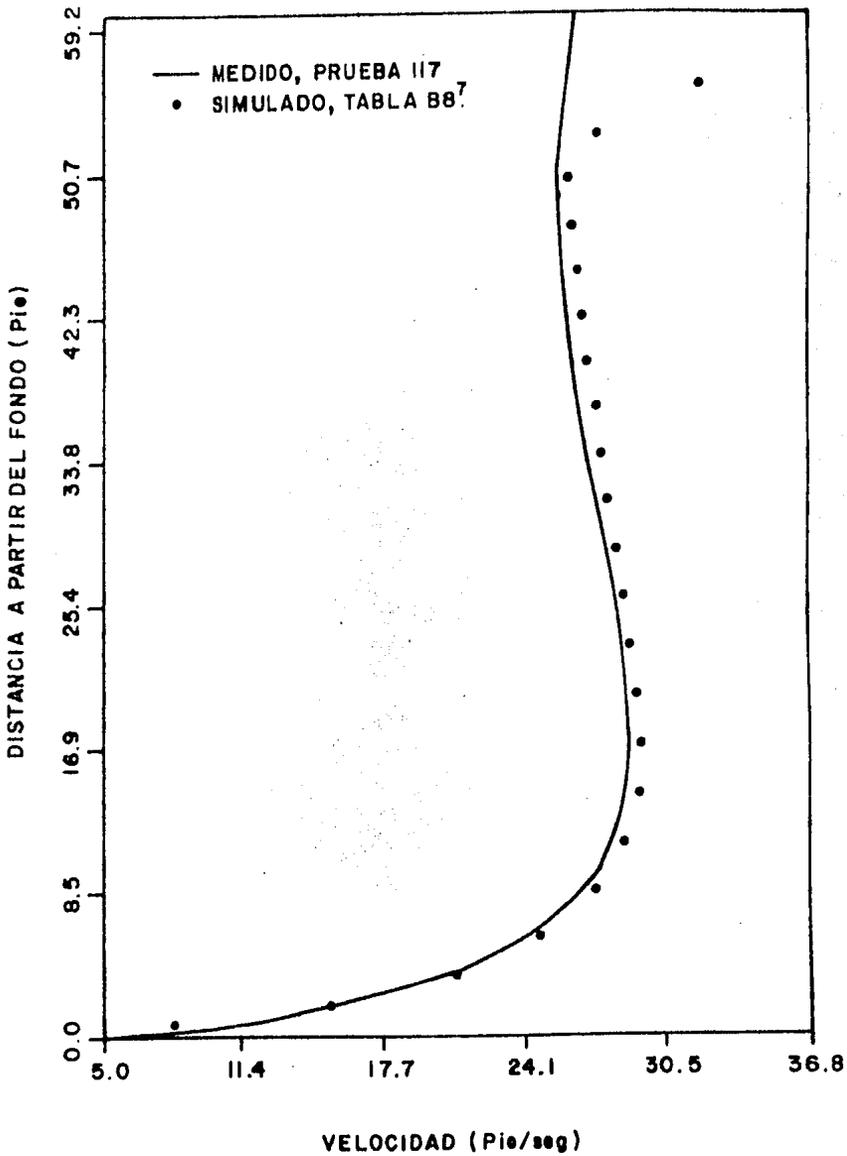


FIG. 12- COMPARACION ENTRE LAS VELOCIDADES MEDIDAS Y SIMULADAS DEL PISTON SOLIDO No 1 EN LA PRUEBA No. 117

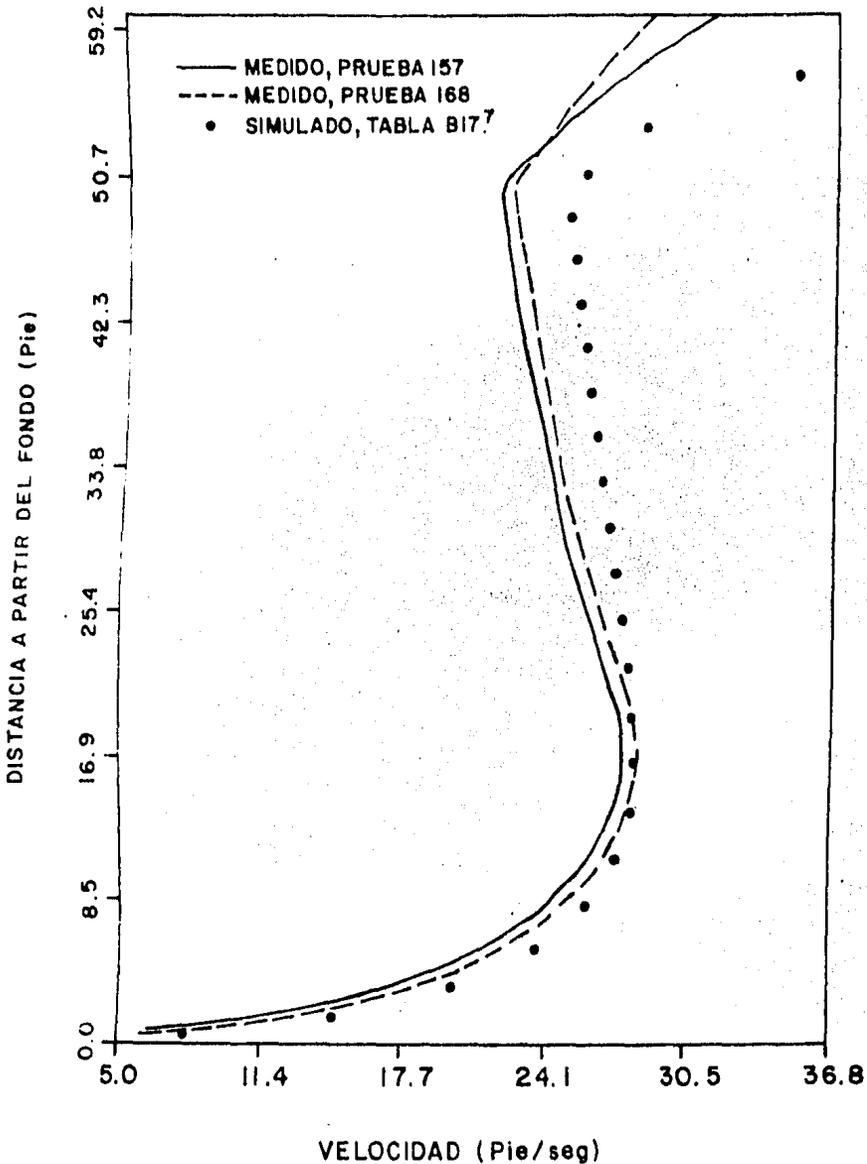


FIG. 13- COMPARACION ENTRE LAS VELOCIDADES DEL PISTON MEDIDAS Y SIMULADAS PARA EL PISTON No.1 CON ORIFICIO No.1 EN LA PRUEBA No.157 Y PARA EL PISTON SOLIDO No.2 EN LA PRUEBA No.168

2. RESBALAMIENTO DE LIQUIDO.

La Fig. 14 muestra la comparación entre resbalamiento medido y el resbalamiento simulado para el pistón sólido No. 1 (tabla A12). La Fig. 15 muestra la misma comparación, pero utilizando el pistón No. 1 con orificio No. 1 - (tabla A19) y por último la Fig. 16 muestra esta comparación empleando el pistón sólido No. 2 (tabla A20).

El modelo predice un resbalamiento de líquido ligeramente menor al obtenido en forma experimental. Esto se debe a que se desprecia el resbalamiento de gas que pasa por el pistón y a la caída de presión debida al flujo de gas en el espacio anular y alrededor de la zapata de la tubería de producción. Esto resulta en una mayor eficiencia del empuje de gas, mayor velocidad de ascenso y menor resbalamiento de líquido en el modelo. Este efecto puede ser compensado introduciendo en el modelo una menor presión inicial en el cabezal de la tubería de revestimiento. Los resultados tanto experimentales como simulados podrán ser igualados utilizando en el modelo una presión inicial en el cabezal de la tubería de revestimiento menor en 3 lb/pg^2 .

Las Figs. 14 a 16 muestran que a un rango bajo de presiones en el espacio anular, los resultados de resbalamiento de líquido obtenidos con la simulación tienden a cruzar la curva formada con los resultados experimentales. Estos resultados obtenidos con el modelo pueden ser aplicables al bombeo neumático intermitente. Así, en este rango de presiones, se tiene una ligera inclinación de la curva de resbalamiento de líquido en el bombeo neumático intermitente.

En la Fig. 16 se puede observar que el modelo es incapaz de simular

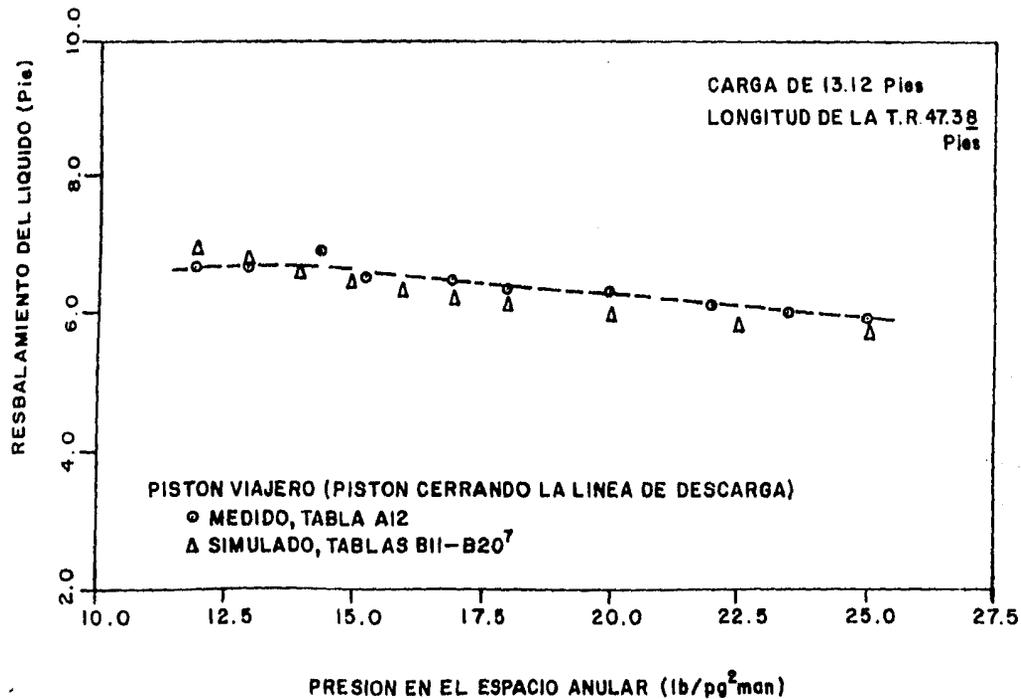


FIG.14-- COMPARACION ENTRE RESBALAMIENTO DE LIQUIDO MEDIDO Y EL SIMULADO EMPLEANDO EL PISTON No. 1 SIN ORIFICIO (TABLA A12)

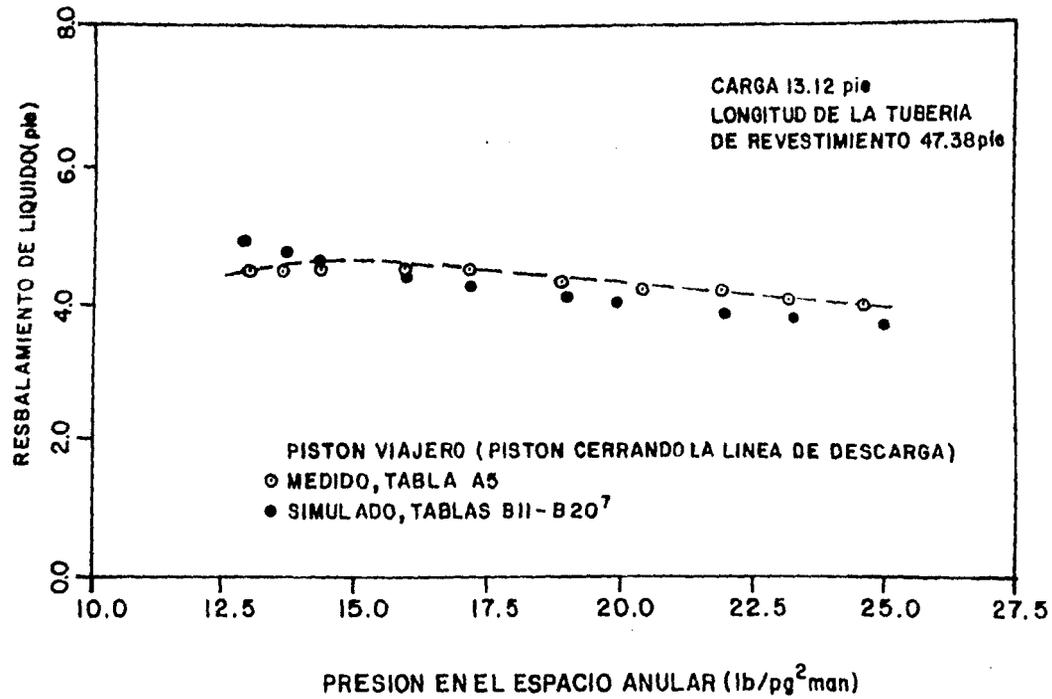


FIG 15 — COMPARACION ENTRE EL RESBALAMIENTO DE LIQUIDO MEDIDO Y SIMULADO PARA EL PISTON No. 1, CON ORIFICIO No. 1 (TABLA A 19).

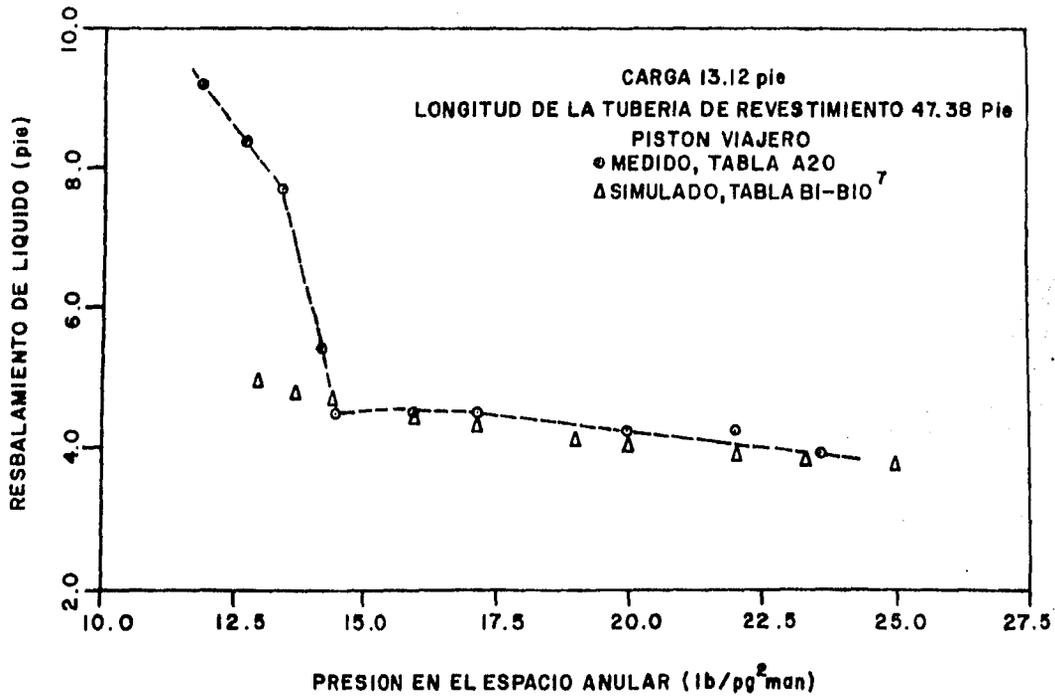


FIG. 16- COMPARACION ENTRE EL RESBALAMIENTO DE LIQUIDO MEDIDO Y SIMULADO PARA EL PISTON No. 2 SIN ORIFICIO (TABLA A20).

la curva para el bombeo neumático intermitente a un rango bajo de presión, donde el pistón permanece estático o es incapaz de alcanzar la superficie. En tal caso, el bache de líquido será elevado solamente por el gas o parcialmente por el pistón viajero. Así, los resultados de la simulación sobre el resbalamiento de líquido serán significativamente menores que los experimentales, debido a que el modelo emplea en la simulación al pistón como dispositivo elevador del bache de líquido.

3. PERFIL DE PRESION PARA GAS EN T.P. VS. TIEMPO.

La Fig. 17 muestra las presiones obtenidas por el modelo en el frente de la burbuja de gas abajo del pistón (p_{BF}), en el fondo de la burbuja de gas (p_B) y encima del bache de líquido (p_S), cada una de ellas vs. tiempo, las condiciones son similares al de las pruebas No. 117 o No. 18. El valor final de 11.61 lb/pg² representa la máxima caída de presión en la burbuja de gas durante el ascenso del pistón a la superficie, el cual tiene una duración de 2.26 segundos. Esta se comparó con la caída de presión de 12.5 lb/pg² obtenida en forma experimental, que tuvo un tiempo de ascenso de 2.55 seg. La diferencia existente es debida a no considerar en el modelo el resbalamiento de gas que pasa por el pistón, y podrá ser compensada reduciendo la presión inicial en el cabezal de la tubería de revestimiento en 3 lb/pg² para igualar tanto en tiempo como en presión los resultados obtenidos.

La Fig. 18 muestra las mismas comparaciones de la Fig. 17, solo que a las condiciones de las pruebas No. 47 o 157 y No. 168. El valor final de 10.58 lb/pg² representa la máxima caída de presión en la burbuja de gas durante el tiempo de ascenso del pistón de 2.34 segundos. Esta se compara favorablemente, con la caída de presión medida de 11.5 lb/pg² con un tiempo de 2.63 segundos en

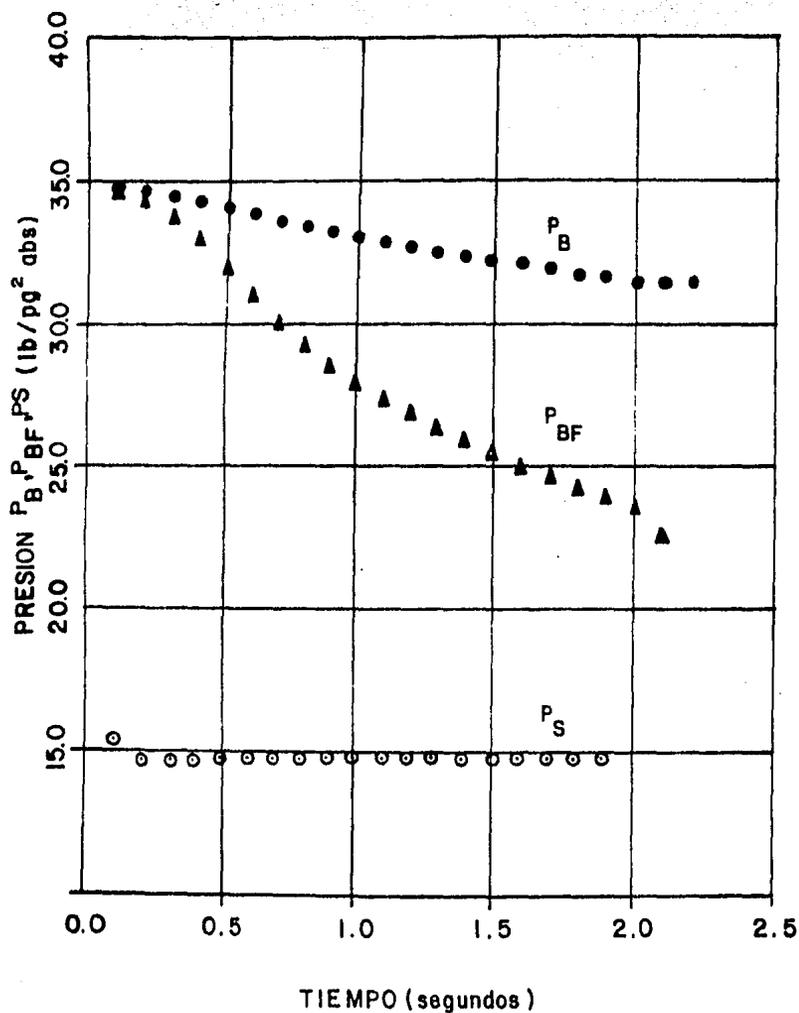


FIGURA 17 — PERFIL DE PRESION PARA GAS EN TUBERIA DE PRODUCCION vs. TIEMPO OBTENIDO CON EL MODELO, PARA EL PISTON SOLIDO No. 1. CONDICIONES SIMILARES A LA PRUEBA No. 117.

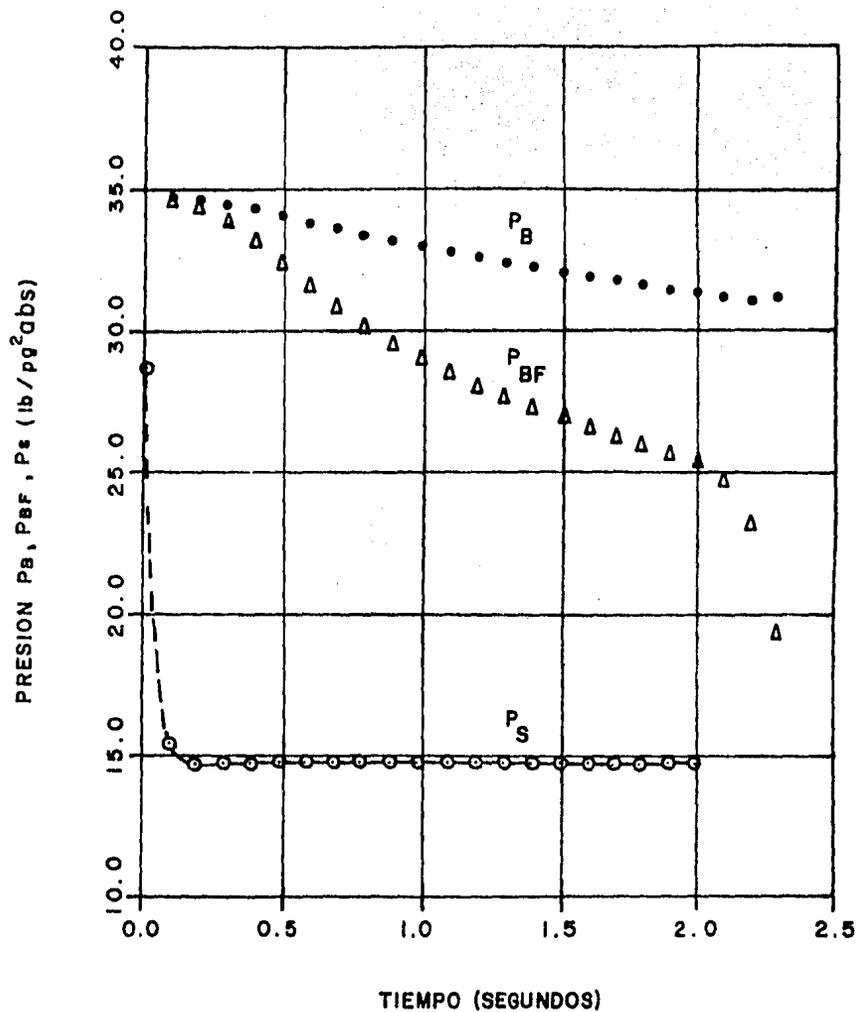


FIG. 18 — PERFIL DE PRESION PARA GAS EN TUBERIA DE PRODUCCION Vs. TIEMPO OBTENIDO CON EL MODELO, PARA EL PISTON No. 1 CON ORIFICIO No. 1, COMO EN LA PRUEBA 157 Y PARA EL PISTON SOLIDO No. 2 COMO EN LA PRUEBA 168.

la prueba No. 47 (157). Esta diferencia en los resultados se debe a dos efectos. Primero, por no considerarse el resbalamiento de gas que pasa por el pistón, se produce tanto una velocidad simulada como una caída de presión elevada y un tiempo de elevación corto. Este mismo efecto se muestra en la Fig. 17. Segundo, el diferente patrón de flujo en el experimento, en el que el pistón ya sea con orificio o con un espacio con la tubería de producción es corrido detrás del frente de la burbuja de gas, proporciona un mayor tiempo de arribo a la superficie que el obtenido con el modelo, el cual simulará al pistón en la parte superior de la burbuja de gas.

La misma conclusión es válida, para la comparación entre los resultados de la simulación de la Fig. 18 y los datos experimentales de la prueba No. 168, donde la máxima caída de presión en la burbuja de gas es de 11.25 lb/pg² con un tiempo de ascenso del pistón de 2.62 segundos. Esta alta caída de presión en la burbuja de gas, es como resultado de la gran cantidad de líquido arrastrado y al tiempo tan corto de ascenso del pistón, esto fue simulado con un factor de fricción:

$$f_b = 0.059 \left(1 + 55.9 \frac{V}{r} \right) \dots 32$$

4. COMPARACION CON OTROS MODELOS.

El modelo hidrodinámico fue aplicado también a datos reales de pozo. El mismo ejemplo con datos de pozo, fue empleado por Lea⁵ para comparar su modelo dinámico con los cálculos efectuados por Foss y Gaul utilizando el modelo estático. Los datos utilizados en el ejemplo son presentados en la tabla B1.

La comparación de resultados del modelo hidrodinámico y de los otros modelos se presenta en la tabla B2. Comparando con el modelo estático de Foss

y Gaul, Lea predijo una reducción en 16% de la presión inicial en el espacio anular y en los requerimientos de volumen de gas, como un resultado de la velocidad variable del pistón. Lea consideró una longitud constante de bache durante la elevación, lo que en realidad no ocurre. La longitud del bache decrece durante el ascenso del pistón, debido a que parte del bache de líquido resbala abajo del pistón, teniéndose así el resbalamiento de líquido antes mencionado. El modelo hidrodinámico considera este fenómeno y predice altas velocidades de elevación del pistón y tiempos cortos en la elevación de éste. Para la velocidad media considerada por Foss y Gaul y Lea (16.7 pie/seg.) el modelo hidrodinámico predice una velocidad de elevación de pistón de 69.0 (14.7)pie/seg.

La velocidad de elevación del pistón de 14.7 pie/seg. es una velocidad de elevación extrapolada, la cual podrá existir si la aceleración al final de la elevación es despreciable, cuando la producción del bache causa un rápido decremento en las fuerzas de fricción y gravedad en el bache. Esta velocidad es comparada con la proporcionada por los modelos anteriores, en los cuales no se consideró este fenómeno. La velocidad real de elevación del pistón debida a este efecto es significativamente mayor (69.0 pie/seg). El perfil de velocidades del pistón es mostrada en la Fig. 19. El tiempo de elevación simulado por el modelo para este caso es de 430.8 seg. El resbalamiento de líquido simulado es de -- 73.2 pies, o alrededor del 30% de la longitud inicial del bache de líquido.

La presión inicial en el cabezal de la tubería de revestimiento simulado por el modelo para una velocidad media de ascenso del pistón de 16.7 pie/seg. es de 260 lb/pg² man, o bien un 20% menor que la obtenida por Lea. Así, el volumen de gas requerido para la elevación podrá ser 20% menor (calculado - como en la Ref. 5, empleando como presión en el cabezal de la tubería de reves-

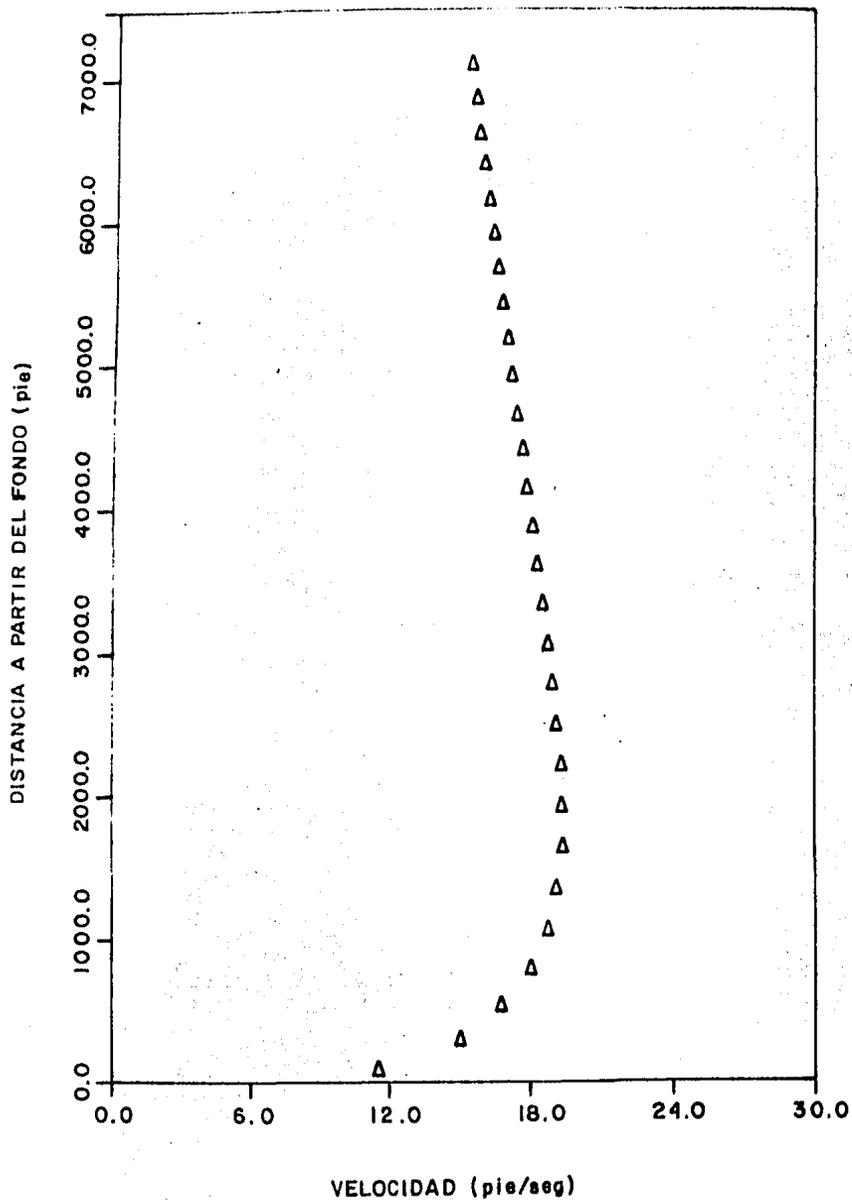


FIG. 19-PERFIL DE VELOCIDAD DEL PISTON SIMULADO EN UN POZO DE 7500 PIES ($\alpha=1.01$, EMPLEANDO LA t_b CALCULADA POR HUGHMARK).

timiento, la máxima presión en el espacio anular que utilizó Lea).

La máxima caída de presión predecida en el cabezal de la tubería de revestimiento en porcentaje, con respecto a la presión inicial en el cabezal de la T.R. es de 17.6%, comparado con el 20.6% obtenido por Lea.

La máxima caída de presión predecida en la burbuja de gas abajo del pistón, durante el tiempo de elevación se presenta en la Fig. 20, como $p_B - p_{BF}$. Este cálculo se basó en la correlación de Hughmark para el factor de fricción.

La tabla B2 muestra que el uso del factor de fricción de Schmidt et. al.⁸ en la burbuja de gas deberá dar únicamente una presión inicial en el cabezal de la tubería de revestimiento menor en un 6.8% que la predecida por Lea para una velocidad media de ascenso del pistón de 16.7 pie/seg. También, para una relación de velocidad $a = 1.0$, el modelo hidrodinámico calculará los mismos valores que el modelo dinámico de Lea, por ejemplo una velocidad promedio del pistón de 16.6 pie/seg. y una velocidad de ascenso del pistón de 28.4 pie/seg. (valor extrapolado 11.0 pie/seg.).

La caída de presión predecida en la burbuja de gas abajo del pistón - será alrededor de 2.5 veces mayor que la calculada con el factor de fricción de Hughmark. El valor medio calculado para el factor de fricción en la burbuja de gas está alrededor de 0.05 en este caso. Comparándolo con el factor de fricción del gas obtenido por Lea de 0.02, este valor es 2.5 veces mayor, debido a que - éste incluye al líquido arrastrado.

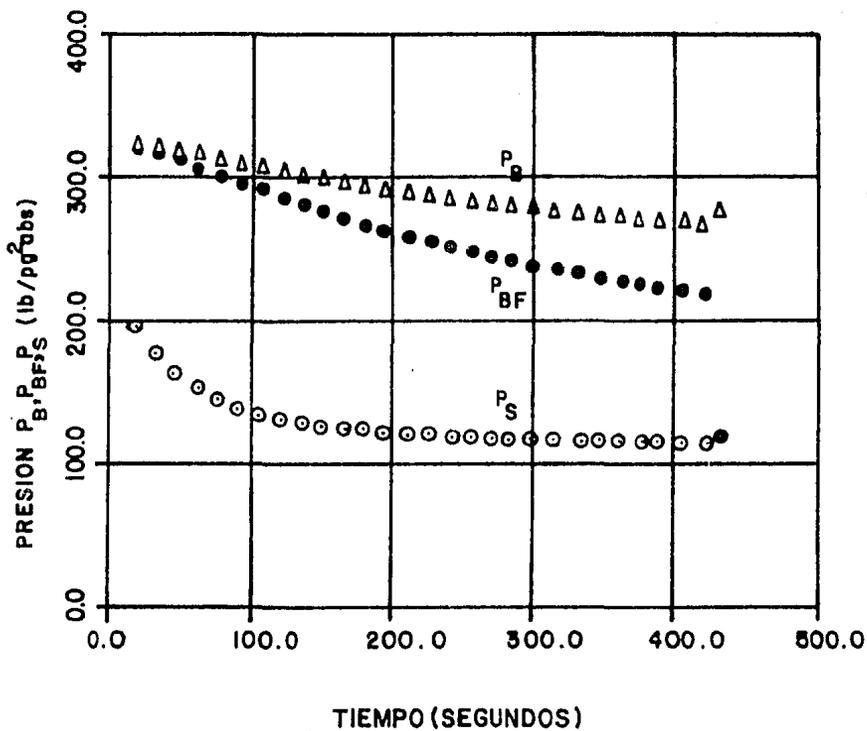


FIG 20 — PERFIL DE PRESION SIMULADO PARA GAS EN T.P V_a TIEMPO EN UN POZO DE 7500 pies, PCI = 274.69 $\text{lb/pg}^2 \text{ abs}$ ($\alpha=1.0$), EMPLEANDO LA f_b CALCULADA POR HUGHMARK).

NOMENCLATURA

SIMBOLO	DESCRIPCION
A	Area
d	diámetro de la tubería de producción
F	Resbalamiento de líquido
f	Factor de fricción
g	Aceleración de la gravedad
g_c	Constante gravitacional
RGL	Relación gas-líquido
M	Peso molecular
m	Gasto másico
N_{Re}	Número de Reynolds
p	Presión
PCH	Presión en el cabezal de la T.R.
PTH	Presión en el cabezal de la T.P.
P_{wf}	Presión de fondo fluyendo
R	Constante universal de los gases
r	Radio de la tubería de producción
T	Temperatura
t	Tiempo
V	Volumen
v	Velocidad
W	Peso
y	Espesor de la película de líquido
Z	Elevación

SIMBOLO	DESCRIPCION
z	Factor de compresibilidad del gas
ϵ	Rugosidad de la tubería
ν	Viscosidad cinemática
μ	Viscosidad dinámica
ρ	Densidad
σ	Tensión superficial
τ	Esfuerzo cortante
γ	Densidad relativa

SUBINDICES

AH	Anular
B	Fondo
b	Burbuja
BF	Frente de burbuja
C	Tubería de revestimiento
CH	Cabezal de la tubería de revestimiento
F	Película de líquido
FB	Resbalamiento de líquido
G	Gas
I	Inicial
L	Líquido
LF	Frente del líquido
o	Salida del gas
PL	Pistón
S	Bache
Sep	Separador
T	Tubería de producción
TC	Tubería de producción - Tubería de revestimiento
TH	Cabezal de la tubería de producción
Z	Bache (Velocidad)

SUPERINDICES

—	Promedio
→	Cantidad vectorial

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Al analizar los datos experimentales junto con el desarrollo del modelo de simulación, se obtienen las siguientes conclusiones:

1) A una alta diferencial de presión entre las tuberías de revestimiento y de producción, el pistón viajero y el bombeo neumático presentan una eficiencia muy semejante (el mismo resbalamiento de líquido).

2) A una baja diferencial de presión entre las tuberías de revestimiento y de producción, la eficiencia del pistón viajero es significativamente mayor que la del bombeo neumático.

3) La eficiencia del pistón viajero depende de la configuración del gas encima del pistón (patrón de flujo).

4) El patrón de flujo para la elevación del pistón, depende principalmente del resbalamiento de gas que pasa por el pistón.

5) Para un resbalamiento de gas reducido, el pistón viajará en la parte superior de la burbuja de gas, la cual está rodeada por una película de líquido, mientras el bache de líquido es elevado encima del pistón.

6) Para un mayor resbalamiento de gas que pase por el pistón, el pistón viajará atrás del frente de la burbuja de gas, teniéndose así una región de dos fases encima del pistón. Una burbuja se forma encima del pistón penetrando al bache de líquido. Una parte del líquido perdido por el bache es colectado debido al movimiento lento del pistón atrás del frente de la burbuja de gas.

La otra parte del líquido perdido por el bache fluye abajo del pistón en forma de una película de líquido que rodea a la burbuja de gas. La zona que rodea al pistón está caracterizada por un arrastre abundante de líquido (flujo con burbujas dispersas). Este patrón de flujo resulta en una mayor eficiencia en el mecanismo de elevación.

7) El flujo de gas que resbala a través del pistón depende (junto con otras variables) de la velocidad de ascenso del pistón.

8) Para cada grupo de variables se tiene una "velocidad de ascenso crítica" la que se tiene a un flujo de gas determinado (resbalamiento), que producirá cambios en el patrón de flujo.

9) Por encima de esta "velocidad de ascenso crítica" (patrón de flujo como en el inciso 5) la eficiencia del pistón viajero decrece ligeramente (mayor resbalamiento de líquido) con:

- El decremento de la presión inicial en el cabezal de la tubería de revestimiento (PCHI).
- La disminución de la velocidad de ascenso del pistón.
- El incremento de la carga.
- La reducción del volumen en el espacio anular.

10) Por abajo de la "velocidad de ascenso crítica" (patrón de flujo como en el inciso 6) el efecto de algunas variables importantes (PCHI, velocidad de ascenso, carga) en la eficiencia de elevación es inversa.

11) La geometría del espacio entre el pistón y la pared de la tubería de producción afecta a la eficiencia de elevación, de la misma forma que afecta

la presencia del orificio en el pistón sólido.

12) Al inicio, el pistón y el bache de líquido está sujetos a una rápida aceleración, seguida de una desaceleración lenta hasta el inicio de la producción del bache, incrementándose nuevamente la aceleración en forma rápida.

13) Cuando se calcula el volumen de gas requerido para elevar el bache de líquido empleando el factor de 1.15 usado por Foss y Gaul se toman en cuenta los efectos despreciados en el modelo hidrodinámico.

14) El modelo hidrodinámico fue desarrollado para simular el ascenso del pistón. Este modelo no considera el resbalamiento de gas que pasa por el pistón y las pérdidas por fricción debidas al flujo de gas en el espacio anular y alrededor de la zapata de la tubería de producción.

- a) Los valores simulados de resbalamiento de líquido son ligeramente menores que los valores obtenidos experimentalmente.
- b) La velocidad del pistón simulada por el modelo es ligeramente mayor que la velocidad experimental.
- c) El tiempo simulado en el modelo es ligeramente menor al obtenido en forma experimental.
- d) Se llevarán a cabo las predicciones del modelo, si antes de la elevación del pistón, la velocidad es cercana a cero, para una presión inicial en el espacio anular dada. El modelo predice el lugar en donde el pistón se detendrá en caso de que la presión en el espacio anular sea insuficiente.
- e) El modelo predice la presión mínima requerida al inicio, en el espacio anular para elevar al pistón.

RECOMENDACIONES

Basándose en las experiencias obtenidas con este estudio, se hacen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros sobre el comportamiento del pistón viajero.

1) Se requieren estudios experimentales adicionales, para desarrollar un mejor modelo de ascenso del pistón, que incluya el resbalamiento de gas que pasa por el pistón y el flujo gas-líquido en el espacio anular ($TR - TP$) y alrededor de la zona de la tubería de producción.

2) Se debe experimentar ampliamente para obtener datos adicionales a partir de los efectos del flujo transitorio en un periodo corto de tiempo.

3) Para obtener la presión de fondo fluyendo (p_{wf}) y la caída de presión debida al flujo de gas y líquido en el espacio anular ($TP - TR$) y alrededor de la T.R., se deberán instalar registradores de presión en el fondo de las tuberías de producción y revestimiento. Estos serán necesarios para la evaluación de los resultados obtenidos con el modelo.

4) Para realizar la simulación del ciclo completo del pistón viajero es necesario considerar las siguientes etapas:

a) Una etapa de depresionamiento después de la elevación del pistón en el caso de que la línea de flujo no se cierre inmediatamente al llegar el pistón a la superficie.

b) Una etapa en la que se incluya la caída del pistón, la formación del bache y el incremento en la presión. En esta etapa, la simulación de la formación del bache deberá incluir tanto la componente del resbalamiento de líquido como la del yacimiento a través de la curva de IPR.

c) El modelo del ascenso del pistón incluirá:

- El resbalamiento de gas que pasa por el pistón,
- Las pérdidas por fricción debidas al flujo de gas y líquido en el espacio anular (TP - TR) y alrededor de la zapata de la tubería de producción, y
- El efecto que proporciona la presencia del líquido al inicio, - atrás del pistón en el espacio anular, y la caída del pistón, sobre el movimiento del bache de líquido que viaja en la parte superior de la burbuja.

5) Los datos se deberán obtener para:

- líquidos con diferentes viscosidades (incluyendo emulsiones agua-aceite, las cuales son encontradas frecuentemente en el campo),
- Altas presiones,
- Tuberías de producción con diámetros grandes (mínimo 1.995 pg de diámetro interior).

6) Se deberán probar los diferentes pistones disponibles en el mercado, para encontrar el más adecuado.

BIBLIOGRAFIA

1. Brown, K. E. y Abercrombie, B., "Plunger Lift", Technology of Artificial Lift Methods. Petroleum Publishing Co. 1980.
2. Pérez Fuentes Alfredo., "Pistón Viajero", Tesis Profesional, Universidad Nacional Autónoma de México (1984).
3. Foss, D. L. and Gaul, R. B., "Plunger - Lift Performance Criteria With Operating Experience - Ventura Avenue Field", Drilling and Production Practice, API (May 1965).
4. Hacksma, J. D., "Users Guide to Predicting Plunger Lift Performance", Presented at Southwestern Petroleum Short Course, Lubbock, Texas (1972).
5. Lea, James F., "Dynamic Analysis of Plunger Lift Operations", Journal of Petroleum Technology (Nov. 1982).
6. White, G. M., "Combining the Technologies of Plunger Lift and Intermittent Gas Lift", Presented at the Annual American Institute Pacific Coast Joint - Chapter Meeting Costa Mesa, California (October 22, 1981).
7. Lavoslav Rosina., "A Study of Plunger Lift Dynamics", M. S. Thesis, University of Tulsa (1983).
8. Schmidt, et al., "Hydrodynamic Model for Intermittent Gas Lifting of Viscous Oil", SPE Preprint No. 10940 (1983).
9. Hughmark, G. A., "Film Thickness, Entrainment and Pressure Drop in Upward Annular and Dispersed Flow", AIChE J. (1973) 19, No. 5, 1062 - 1064.

10. Zuber, N. and Findlay, T. A., "Average Volumetric Concentration in two - Phase flow Systems", J. Heat Transfer (Nov., 1965) 87, 453-468.
11. Zigrang, D. J. and Sylvester, N. D., "Explicit Approximations to the Solu
tion of Colebrook's Friction Factor Equation", AIChE J. (1982) 28, 514-515.

APENDICE A

TABLA A1. DATOS EXPERIMENTALES PARA BOMBEO NEUMATICO
 (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), CARGA DE 13.12
 PIES, LONGITUD DE LA T. R. 47.38 PIES

DIAMETRO INTERIOR DE T.P. 1.025 pg LONGITUD DE T.P. 60.00 pie
 DIAMETRO EXTERIOR DE T.P. 1.315 pg LONGITUD DE T.R. 47.38 pie
 DIAMETRO INTERIOR DE T.R. 3.042 pg LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO 13.12 pie

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)
1	12.4	6.6	9.0	1.7	8.33	2.9
2	12.8	7.0	9.5	1.8	8.07	2.8
3	13.0	7.2	10.2	1.9	7.94	2.8
4	14.0	8.2	10.5	2.1	7.22	2.6
5	15.4	9.6	11.0	2.4	6.30	2.3
6	15.6	9.8	12.0	2.5	6.23	2.2
7	18.2	12.4	14.0	2.9	4.99	2.1
8	19.2	13.4	15.8	3.1	4.52	2.0
9	22.3	16.5	16.8	3.6	3.28	1.9
10	25.0	19.2	-	4.0	1.97	-

TABLA A2. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
 (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), PISTON SOLIDO
 No. 1, CARGA 13.12 PIE, LONGITUD DE LA T.R. 47.38 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P.	1.025 pg	LONGITUD DE T.P.	60.00 pie
DIAMETRO EXTERIOR DE T.P.	1.315 pg	LONGITUD DE T.R.	47.38 pie
DIAMETRO INTERIOR DE T.R.	3.042 pg	LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO	13.12 pie
PISTON (No. 1) DIAMETRO	0.978 pg		

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PIHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, t _{pl} (seg)
11	12.2	6.4	-	3.6	3.02	14.1	-	-
12	13.2	7.4	9.5	3.5	3.28	15.6	3.2	4.2
13	14.2	8.4	9.75	3.5	3.28	17.5	3.0	4.0
14	14.5	8.7	10.0	3.5	3.28	18.4	3.0	3.9
15	16.0	10.2	11.0	3.6	3.02	20.3	2.8	3.4
16	17.0	11.2	12.0	3.6	3.02	22.6	2.7	3.2
17	18.0	12.2	13.0	3.6	3.02	24.2	2.4	3.0
18	20.0	14.2	15.0	3.7	2.76	26.1	2.2	2.55
19	22.5	16.7	17.5	3.7	2.76	27.5	2.0	2.3
20	23.7	17.9	18.0	3.7	2.76	29.9	1.9	2.1

TABLA A3. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
(DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), PISTON SOLIDO
No. 2, CARGA 13.12 PIE, LONGITUD DE LA T.R. 47.38 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P.	1.025 pg	LONGITUD DE T.P.	60.00 pie
DIAMETRO EXTERIOR DE T.P.	1.315 pg	LONGITUD DE T.R.	47.38 pie
DIAMETRO INTERIOR DE T.R.	3.042 pg	LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO	13.12 pie
PISTON (No. 2) DIAMETRO	0.930 pg		

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie-Seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, t _{pl} (seg)
21	12.0	6.2	-	1.4	9.19	-	-	-
22	13.0	7.2	-	1.8	8.07	-	-	-
23	13.5	7.7	-	1.9	7.68	-	-	-
24	14.2	8.4	10.5	2.8	5.38	-	2.8	-
25	15.3	9.5	10.5	3.8	2.42	9.7	2.7	3.7
26	15.8	10.0	10.75	4.0	1.84	13.0	2.6	3.6
27	18.0	12.2	12.30	4.1	1.51	16.4	2.3	3.1
28	21.0	15.2	15.75	4.0	1.84	20.3	2.1	2.6
29	23.0	17.2	17.0	4.0	1.97	32.8	2.0	2.3
30	24.0	18.6	18.25	4.1	1.51	34.4	1.8	2.1

TABLA A4. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
(DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), PISTON SOLIDO
No. 3, CARGA 13.12 PIE, LONGITUD DE LA T.R. 47.38 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P.	1.025 pg	LONGITUD DE T.P.	60.00 pie
DIAMETRO EXTERIOR DE T.P.	1.315 pg	LONGITUD DE T.R.	47.38 pie
DIAMETRO INTERIOR DE T.R.	3.042 pg	LONGITUD DEL BACHE LIQUIDO	13.12 pie
PISTON (No. 3) DIAMETRO	0.878 pg		

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del piston (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del piston, t _{PL} (seg)
31	15.0	9.2	-	2.0	7.55	-	-	-
32	17.0	11.2	-	2.4	6.30	-	-	-
33	20.0	14.2	-	2.8	5.25	-	-	-
34	21.4	15.6	16.0	3.0	4.79	-	2.1	-
35	21.8	16.0	16.0	3.5	3.28	-	2.1	-
36	22.2	16.4	16.2	4.0	1.84	13.2	2.1	2.9
37	22.5	16.7	16.5	4.1	1.51	13.5	2.1	2.8
38	23.9	18.1	17.3	4.1	1.57	13.7	2.0	2.7
39	24.5	18.7	18.0	4.1	1.51	14.1	1.9	2.6
40	26.0	20.2	19.0	4.2	1.44	15.0	1.8	2.4

TABLA A5. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
 (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), PISTON No. 1
 CON ORIFICIO No. 1, CARGA 13.12 PIE
 LONGITUD DE LA T.R. 47.38 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P. 1.025 pg LONGITUD DE T.P. 60.00 pie
 DIAMETRO EXTERIOR DE T.P. 1.315 pg LONGITUD DE T.R. 47.38 pie
 DIAMETRO INTERIOR DE T.R. 3.042 pg LONGITUDE DE BACHE DE LIQUIDO 13.12 pie
 PISTON (No. 1) DIAMETRO 0.978 pg
 ORIFICIO (No. 1) DIAMETRO 0.176 pg

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, T _{PL} (seg)
41	13.0	7.2	8.5	4.0	1.97	8.7	3.4	4.44
42	13.7	7.9	9.0	3.8	2.43	11.0	3.0	3.9
43	14.4	8.6	9.7	3.9	2.09	16.9	2.8	3.4
44	16.0	10.2	11.0	3.9	2.43	18.8	2.6	3.3
45	17.2	11.4	12.0	3.7	2.30	19.5	2.5	3.0
46	19.0	13.2	14.0	3.9	2.09	20.3	2.3	2.8
47	20.5	14.7	15.0	3.8	2.43	21.2	2.1	2.65
48	22.0	16.2	16.5	4.0	1.84	21.6	2.0	2.6
49	23.3	17.5	17.0	4.0	1.84	22.0	1.9	2.5
50	24.7	18.9	18.5	4.0	1.84	22.1	1.9	2.4

TABLA A6. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
 (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), PISTON No. 1
 CON ORIFICIO No. 2, CARGA 13.12 PIE,
 LONGITUD DE LA T.R. 47.38 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P.	1.025 pg	LONGITUD DE T.P.	60.00 pie
DIAMETRO EXTERIOR DE T.P.	1.315 pg	LONGITUD DE T.R.	47.38 pie
DIAMETRO INTERIOR DE T.R.	3.042 pg	LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO	13.12 pie
PISTON (No. 1) DIAMETRO	0.978 pg		
ORIFICIO (No. 2) DIAMETRO	0.250 pg		

Prueba Número	PCHI (1b/pg ² man)	PTHI (1b/pg ² man)	PCH (1b/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, t _{PL} (seg)
51	13.0	7.2	-	1.8	7.94	-	-	-
52	14.0	8.2	-	2.1	7.22	-	2.9	-
53	14.3	8.5	-	2.8	5.38	-	2.9	-
54	15.1	9.3	9.5	4.1	1.55	7.6	2.7	3.9
55	15.8	10.0	10.2	4.2	1.25	9.2	2.6	3.7
56	17.4	11.6	12.5	4.0	1.84	15.4	2.4	3.05
57	20.2	14.4	15.0	4.1	1.51	17.4	2.0	2.5
58	22.0	16.2	16.0	4.1	1.51	20.7	2.0	2.5
59	23.4	17.6	17.0	4.1	1.51	23.1	1.9	2.4
60	25.0	19.2	18.5	4.2	1.25	25.4	1.8	2.3

TABLA A7. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
 (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), PISTON No. 1
 CON ORIFICIO No. 3, CARGA 13.12 PIE,
 LONGITUD DE LA T.R. 47.38 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P.	1.025 pg	LONGITUD DE T.P.	60.00 pie
DIAMETRO EXTERIOR DE T.P.	1.315 pg	LONGITUD DE T.R.	47.38 pie
DIAMETRO INTERIOR DE T.R.	3.042 pg	LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO	13.12 pie
PISTON (No. 1) DIAMETRO,	0.978 pg		
ORIFICIO (No. 3) DIAMETRO	0.281 pg		

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, t _{pl} (seg)
61	12.0	6.2	-	1.3	9.38	-	3.3	-
62	13.0	7.2	-	1.7	8.27	-	3.2	-
63	15.0	9.2	-	2.2	6.89	-	3.0	-
64	16.6	10.8	-	3.1	4.53	-	2.8	-
65	17.0	11.2	12.0	4.3	1.25	10.8	2.7	3.6
66	18.0	12.2	13.2	4.5	0.66	11.5	2.6	3.4
67	19.5	13.7	14.0	4.3	1.12	12.7	2.4	3.2
68	21.0	15.2	15.3	4.2	1.51	18.1	2.3	2.8
69	23.0	17.2	17.0	4.3	1.12	19.5	2.2	2.7
70	24.4	18.6	18.0	4.3	1.25	21.2	2.1	2.6

TABLA A8. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
 (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), PISTON SOLIDO
 No. 1, CARGA 6.56 PIE, LONGITUD DE LA T. R. 47.38 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P. 1.025 pg LONGITUD DE T.P. 60.00 pie
 DIAMETRO EXTERIOR DE T.P. 1.315 pg LONGITUD DE T.R. 47.38 pie
 DIAMETRO INTERIOR DE T.R. 3.042 pg LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO 6.56 pie
 PISTON (No. 1) DIAMETRO 0.978 pg

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, t _{pl} (seg)
71	7.6	4.7	-	1.1	3.61	-	-	-
72	8.6	5.7	4.75	1.0	3.87	18.1	3.0	3.55
73	10.0	7.1	5.75	1.0	3.87	24.2	2.7	3.10
74	11.0	8.1	6.7	1.0	3.87	28.2	2.4	2.75
75	13.0	10.1	8.3	1.0	3.87	31.8	2.2	2.50
76	15.0	12.1	9.7	1.05	3.61	37.6	2.1	2.40
77	17.0	14.1	11.7	1.2	3.28	40.6	1.8	2.10
78	19.0	16.1	13.5	1.2	3.28	46.2	1.7	1.90
79	20.6	17.7	15.0	1.3	2.89	48.3	1.6	1.80
80	23.4	20.5	17.5	1.4	2.76	56.4	1.5	1.60

TABLA A9. DATOS EXPERIMENTALES PARA BOMBEO NEUMATICO
 (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), CARGA 6.56 PIE
 LONGITUD DE LA T. R. 47.38 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P. 1.025 pg LONGITUD DE T.P. 60.00 pie
 DIAMETRO EXTERIOR DE T.P. 1.315 pg LONGITUD DE T.R. 47.30 pie
 DIAMETRO INTERIOR DE T.R. 3.042 pg LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO 6.56 pie

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)
81	12.0	9.1	-	-	6.56	-
82	13.5	10.6	-	-	6.56	-
83	15.1	12.2	8.5	0.3	5.64	2.8
84	15.2	12.3	8.7	0.4	5.38	2.8
85	17.0	14.1	10.0	0.6	4.79	2.1
86	18.8	15.9	12.0	0.7	4.53	2.0
87	20.5	19.3	-	0.9	3.94	-
88	22.2	19.3	-	1.05	3.61	-
89	23.5	20.6	-	1.2	3.28	-
90	25.0	22.1	-	1.3	2.95	-

TABLA A10. DATOS EXPERIMENTALES PARA BOMBEO NEUMATICO
 (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), CARGA 9.84 PIE,
 LONGITUD DE LA T. R. 47.38 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P. 1.025 pg LONGITUD DE T.P. 60.00 pie
 DIAMETRO EXTERIOR DE T.P. 1.315 pg LONGITUD DE T.R. 47.38 pie
 DIAMETRO INTERIOR DE T.R. 3.042 pg LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO 9.84 pie

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)
91	11.2	6.8	8.0	0.8	7.48	2.4
92	13.0	8.6	9.3	1.4	5.91	2.25
93	14.6	10.2	10.7	1.7	5.12	2.1
94	16.0	11.6	11.6	1.9	4.59	2.05
95	17.4	13.0	12.5	2.0	3.99	2.0
96	18.6	14.2	13.3	2.0	3.61	2.0
97	20.5	16.1	14.5	2.5	2.96	1.95
98	22.0	17.6	16.0	2.65	2.43	1.9
99	23.0	18.6	17.0	2.8	1.97	1.8
100	24.8	20.4	18.0	3.0	1.31	1.75

TABLA A11. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
(DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), PISTON SOLIDO
No. 1, CARGA 9.84 PIE, LONGITUD DE LA T.R. 47.38 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P.	1.025 pg	LONGITUD DE T.P.	60.00 pie
DIAMETRO EXTERIOR DE T.P.	1.315 pg	LONGITUD DE T.R.	47.38 pie
DIAMETRO INTERIOR DE T.R.	3.042 pg	LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO	9.84 pie
PISTON (No. 1) DIAMETRO	0.978 pg		

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, t _{pl} (seg)
101	10.0	5.6	6.3	2.0	4.20	13.02	3.5	4.3
102	10.6	6.2	6.7	2.0	4.20	15.4	3.0	3.7
103	12.0	7.6	7.7	1.9	4.46	20.3	2.7	3.2
104	13.0	8.6	8.5	1.9	4.46	21.2	2.5	3.0
105	14.0	9.6	9.7	2.0	4.20	24.2	2.4	2.8
106	14.2	9.8	9.7	1.9	4.46	24.2	2.4	2.8
107	17.0	12.6	12.0	2.0	4.20	30.8	2.3	2.6
108	17.0	12.6	12.5	2.2	3.61	30.8	2.2	2.5
109	19.8	15.4	14.0	2.3	3.35	33.9	2.1	2.4
110	22.5	18.1	16.7	2.3	3.41	37.6	2.0	2.3

TABLA A12. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
 (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), PISTON SOLIDO
 No. 1, CARGA 13.12 PIE, LONGITUD DE LA T.R. 47.38 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P. 1.025 pg LONGITUD DE T.P. 60.00 pie
 DIAMETRO EXTERIOR DE T.P. 1.315 pg LONGITUD DE T.R. 47.38 pie
 DIAMETRO INTERIOR DE T.R. 3.042 pg LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO 13.12 pie
 PISTON (No. 1) DIAMETRO 0.978 pg

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² nam)	PCH (lb/pg ² nam)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, t _{pl} (seg)
111	12.0	6.2	-	2.16	6.67	14.0	-	-
112	13.0	7.2	9.4	2.16	6.67	15.6	3.2	4.2
113	14.4	8.6	10.0	2.10	6.89	18.4	3.0	3.6
114	15.3	9.5	10.5	2.20	6.50	19.4	2.9	3.4
115	17.0	11.2	12.0	2.20	6.46	22.6	2.7	3.2
116	18.0	12.2	13.0	2.30	6.33	24.2	2.4	3.0
117	20.0	14.2	15.0	2.30	6.30	27.0	2.2	2.55
118	22.0	16.2	17.0	2.38	6.10	27.5	2.0	2.3
119	23.5	17.7	18.0	2.41	6.00	29.9	1.9	2.1
120	25.0	19.2	19.2	2.42	5.90	30.0	1.8	2.0

TABLA A14. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
(PISTON CERRANDO LA LINEA DE DESCARGA), PISTON SOLIDO
No. 1, CARGA 9.84 PIE, LONGITUD DE LA T.R. 22.79 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P.	1.025 pg	LONGITUD DE T.P.	60.00 pie
DIAMETRO EXTERIOR DE T.P.	1.315 pg	LONGITUD DE T.R.	22.79 pie
DIAMETRO INTERIOR DE T.R.	3.042 pg	LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO	9.84 pie
PISTON (No. 1) DIAMETRO	0.978 pg		

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, t _{PL} (seg)
126	10.5	6.10	3.7	1.1	6.89	5.6	4.3	6.1
127	12.8	8.40	6.0	1.1	6.89	15.4	3.0	3.6
128	15.0	10.60	7.5	1.2	6.56	20.3	2.6	3.1
129	19.5	15.10	10.5	1.3	6.30	28.2	2.0	2.4
130	20.2	15.80	10.75	1.3	6.36	29.3	2.0	2.35

TABLA A15. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
(DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), PISTON SOLIDO
No. 1, CARGA 9.84 PIE, LONGITUD DE LA T.R. 22.79 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P.	1.025 pg	LONGITUD DE T.P.	60.00 pie
DIAMETRO EXTERIOR DE T.P.	1.315 pg	LONGITUD DE T.R.	22.79 pie
DIAMETRO INTERIOR DE T.R.	3.042 pg	LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO	9.84 pie
PISTON (No. 1) DIAMETRO	0.978 pg		

Prueba Número	PCHI (lb/pg man)	PTHI (lb/pg man)	PCH (lb/pg man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, t _{pl} (seg)
131	12.0	7.6	5.0	1.8	4.79	14.5	3.2	3.9
132	14.0	9.6	6.5	1.9	4.46	18.8	2.7	3.2
133	16.0	11.6	8.0	2.0	4.26	23.0	2.4	2.8
134	19.0	14.6	10.0	2.1	3.87	28.2	2.1	2.45
135	23.0	18.6	14.0	2.3	3.28	35.0	1.9	2.2

TABLA A16. DATOS EXPERIMENTALES PARA BOMBEO NEUMATICO
 (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), CARGA 13.12 PIE
 LONGITUD DE LA T. R. 22.79 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P.	1.025 pg	LONGITUD DE T.P.	60.00 pie
DIAMETRO EXTERIOR DE T.P.	1.315 pg	LONGITUD DE T.R.	22.79 pie
DIAMETRO INTERIOR DE T.R.	3.042 pg	LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO	13.12 pie

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)
136	14.75	8.95	9.0	1.2	9.84	2.6
137	15.0	9.20	9.0	1.2	9.84	2.55
138	17.0	11.20	10.5	1.5	8.86	2.3
139	19.25	13.45	12.3	1.9	7.74	2.0
140	24.5	18.70	15.5	2.8	5.38	1.9

TABLA A17. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
 (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), PISTON SOLIDO
 No. 1, CARGA 13.12 PIE, LONGITUD DE LA T.R. 22.79 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P. 1.025 pg LONGITUD DE T.P. 60.00 pie
 DIAMETRO EXTERIOR DE T.P. 1.315 pg LONGITUD DE T.R. 22.79 pie
 DIAMETRO INTERIOR DE T.R. 3.042 pg LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO 13.12 pie
 PISTON (No. 1) DIAMETRO 0.978 pg

Prueba Número	PCHI (lb/pg man)	PTHI (lb/pg man)	PCH (lb/pg man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, t _{PL} (seg)
141	15.0	9.2	7.5	3.4	3.61	13.4	3.4	4.15
142	17.0	11.2	9.0	3.45	3.48	17.4	3.0	3.50
143	20.0	14.2	11.3	3.5	3.28	23.1	2.3	2.70
144	22.0	16.2	12.1	3.56	3.15	24.7	2.2	2.50
145	25.0	19.2	15.0	3.6	3.02	27.5	2.0	2.36

TABLA A18. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
 (PISTON CERRANDO LA LINEA DE DESCARGA), PISTON SOLIDO
 No. 1, CARGA 13.12 PIE, LONGITUD DE LA T.R. 22.79 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P.	1.025 pg	LONGITUD DE T.P.	60.00 pie
DIAMETRO EXTERIOR DE T.P.	1.315 pg	LONGITUD DE T.R.	22.79 pie
DIAMETRO INTERIOR DE T.R.	3.042 pg	LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO	13.12 pie
PISTON (No. 1) DIAMETRO	0.978 pg		

Prueba Número	PCHI (lb/pg man)	PTHI (lb/pg man)	PCH (lb/pg man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t_s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, t_{PL} (seg)
146	14.2	8.4	7.5	2.4	6.80	12.1	3.4	4.2
147	17.0	11.2	8.1	2.5	6.54	15.2	2.9	4.0
148	20.0	14.2	8.7	2.6	6.27	20.5	2.4	2.85
149	20.7	14.9	9.2	2.7	6.21	23.1	2.3	2.73
150	24.0	18.2	14.5	2.8	5.88	25.4	2.1	2.4

TABLA A19. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
(PISTON CERRANDO LA LINEA DE DESCARGA), PISTON No. 1,
ORIFICIO No. 1, CARGA 13.12 PIE, LONGITUD
DE LA T.R. 47.38 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P. 1.025 pg LONGITUD DE T.P. 60.00 pie
 DIAMETRO EXTERIOR DE T.P. 1.315 pg LONGITUD DE T.R. 47.38 pie
 DIAMETRO INTERIOR DE T.R. 3.042 pg LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO 13.12 pie
 PISTON (No. 1) DIAMETRO 0.978 pg
 ORIFICIO (No. 1) DIAMETRO 0.172 pg

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, t _{PL} (seg)
151	13.0	2.9	4.50	4.0	1.97	8.7	3.4	4.4
152	13.7	2.9	4.50	3.8	2.43	11.0	3.0	3.9
153	14.4	2.9	4.52	3.9	2.09	16.9	2.8	3.4
154	16.0	2.9	4.50	3.9	2.43	18.8	2.6	3.3
155	17.2	2.9	4.52	3.7	2.30	19.5	2.5	3.0
156	19.0	2.95	4.33	3.9	2.09	20.3	2.3	2.8
157	20.5	3.0	4.20	3.8	2.43	21.2	2.1	2.65
158	22.0	3.0	4.20	4.0	1.84	21.6	2.0	2.6
159	23.3	3.03	4.10	4.0	1.84	22.0	1.9	2.5
160	24.7	3.06	4.00	4.0	1.84	22.1	1.9	2.4

TABLA A20. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL PISTON VIAJERO
 (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA), PISTON SOLIDO
 No. 2, CARGA 13.12 PIE, LONGITUD DE LA T.R. 47.38 PIE

DIAMETRO INTERIOR DE T.P.	1.025 pg	LONGITUD DE T.P.	60.00 pie
DIAMETRO EXTERIOR DE T.P.	1.315 pg	LONGITUD DE T.R.	47.38 pie
DIAMETRO INTERIOR DE T.R.	3.042 pg	LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO	13.12 pie
PISTON (No. 2) DIAMETRO	0.930 pg		

Prueba Número	PCHI (lb/pg ² man)	PTHI (lb/pg ² man)	PCH (lb/pg ² man)	Líquido producido (lbm)	Resbalamiento de líquido en T.P. (pie)	Velocidad superficial media del pistón (pie/seg)	Tiempo de elevación del bache, t _s (seg)	Tiempo de elevación del pistón, t _{PL} (seg)
161	12.0	6.2	-	1.4	9.19	-	-	-
162	12.8	7.0	-	1.6	8.36	-	-	-
163	12.5	7.7	-	1.9	7.68	-	-	-
164	14.2	8.4	10.5	2.8	5.38	-	2.8	-
165	14.5	8.7	10.6	2.9	4.46	9.0	2.7	3.7
166	16.0	10.2	11.0	2.9	4.46	13.0	2.6	3.6
167	17.2	11.4	12.0	2.9	4.46	16.0	2.3	3.1
168	20.0	14.2	14.2	3.0	4.20	20.3	2.2	2.7
169	22.0	16.2	16.4	3.0	4.20	29.5	2.1	2.5
170	23.6	17.8	17.6	3.1	3.87	33.5	2.0	2.3

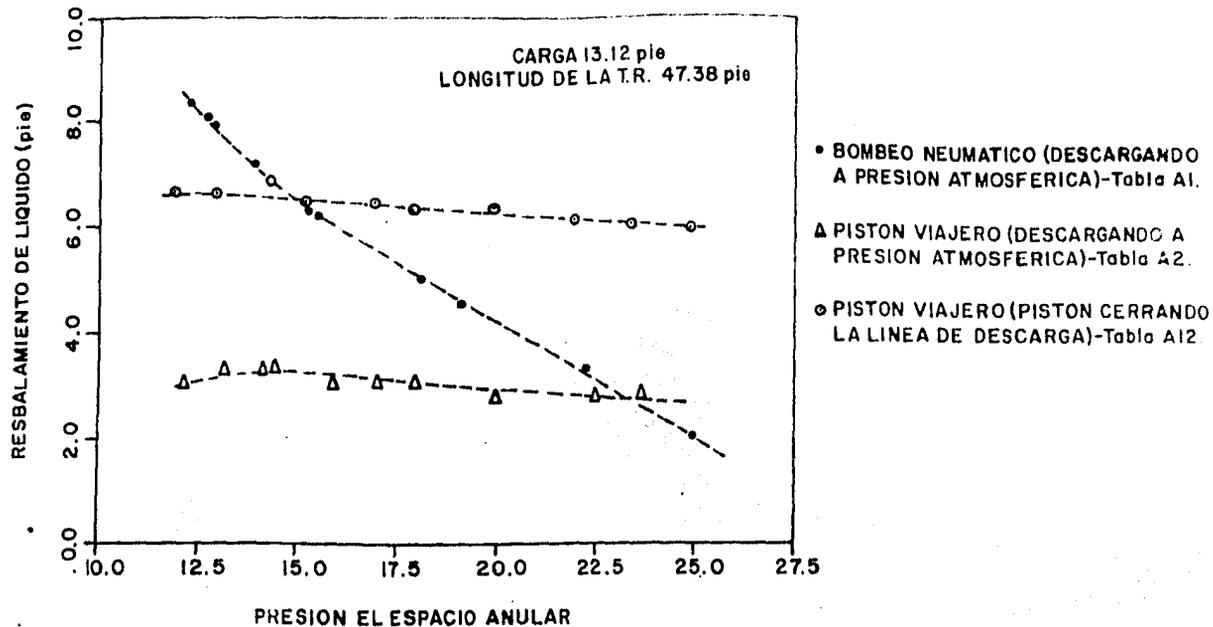
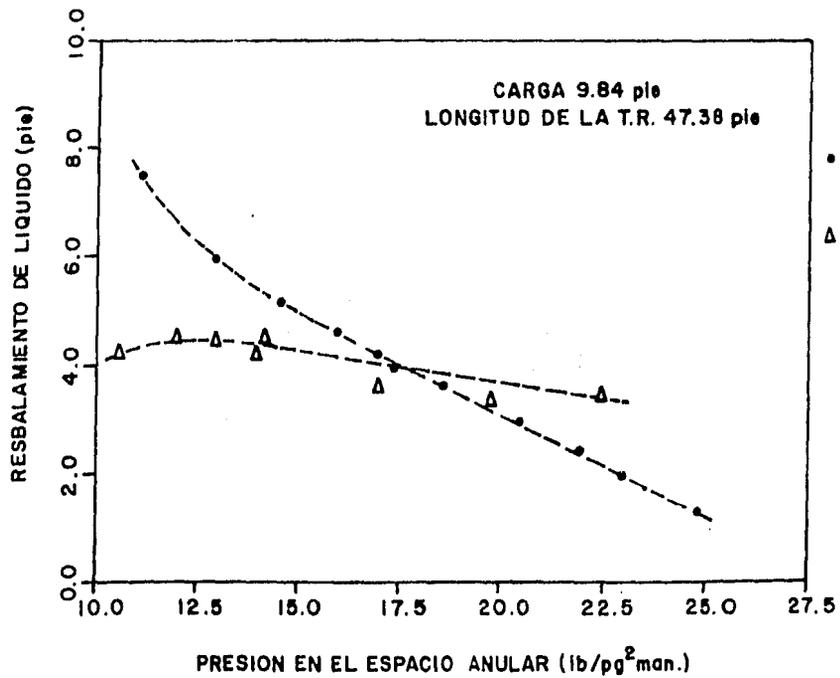
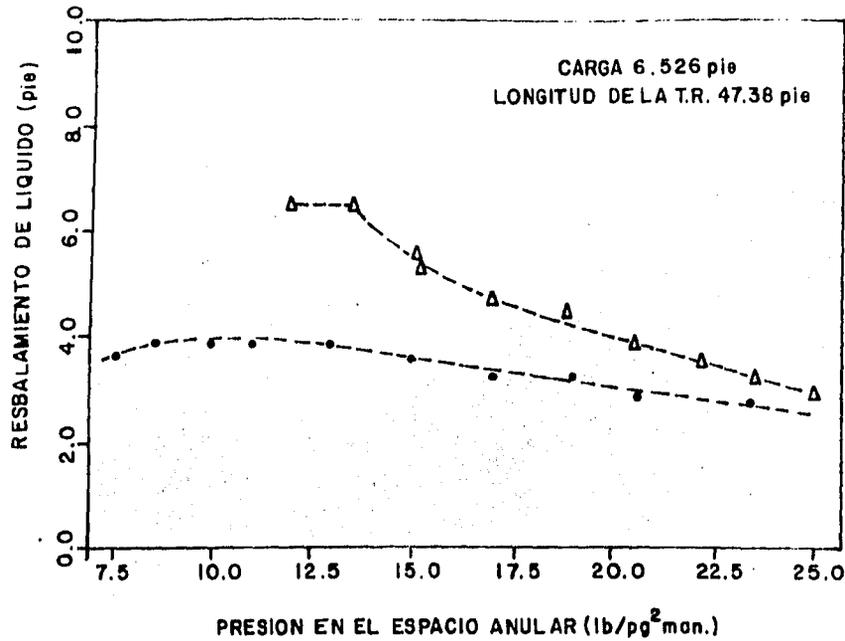


FIG. A1-COMPARACION DE DATOS EXPERIMENTALES DE RESBALAMIENTO DE LIQUIDO PARA BOMBEO NEUMATICO Y PISTON VIAJERO (PISTON SOLIDO No. 1) PARA UNA CARGA DE 13.12 pie Y UNA LONGITUD DE T.R. DE 47.38 pie.



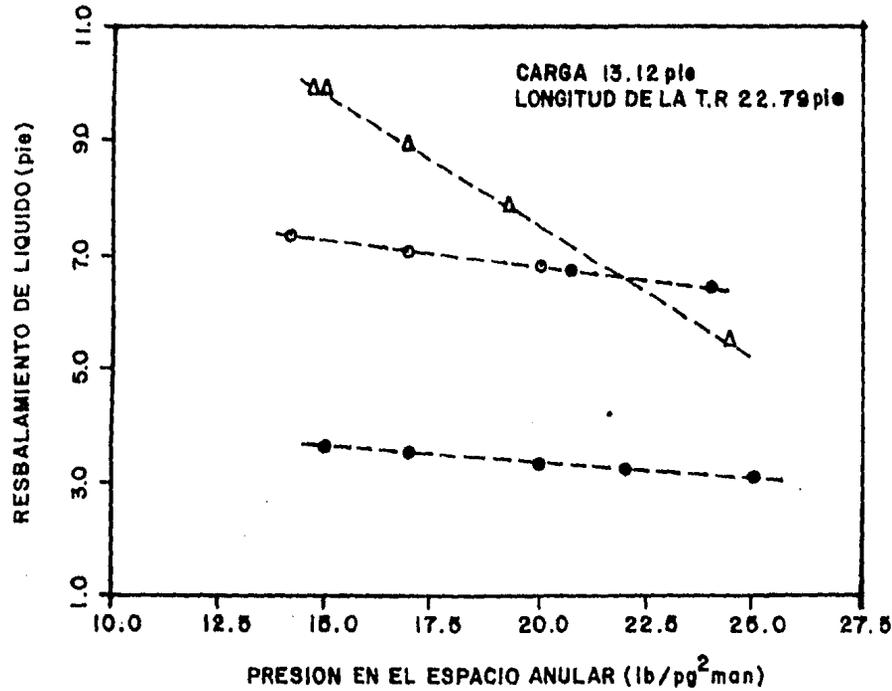
- BOMBEO NEUMATICO (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA)-Tabla A10.
- Δ PISTON VIAJERO (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA)-Tabla A11.

FIG. A2-COMPARACION DE DATOS EXPERIMENTALES DE RESBALAMIENTO DE LIQUIDO PARA BOMBEO NEUMATICO Y PISTON VIAJERO (PISTON SOLIDO No. 1) PARA UNA CARGA DE 9.84 pie Y UNA LONGITUD DE T.R. DE 47.38 pie.



- △ BOMBEO NEUMATICO (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA)-Tabla A9.
- PISTON VIAJERO (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA)-Tabla A8

FIG. A3- COMPARACION DE DATOS EXPERIMENTALES DE RESBALAMIENTO DE LIQUIDO PARA BOMBEO NEUMATICO Y PISTON VIAJERO (PISTON SOLIDO No. 1) PARA UNA CARGA DE 6.526 pie Y UNA LONGITUD DE T.R. DE 47.38 pie.

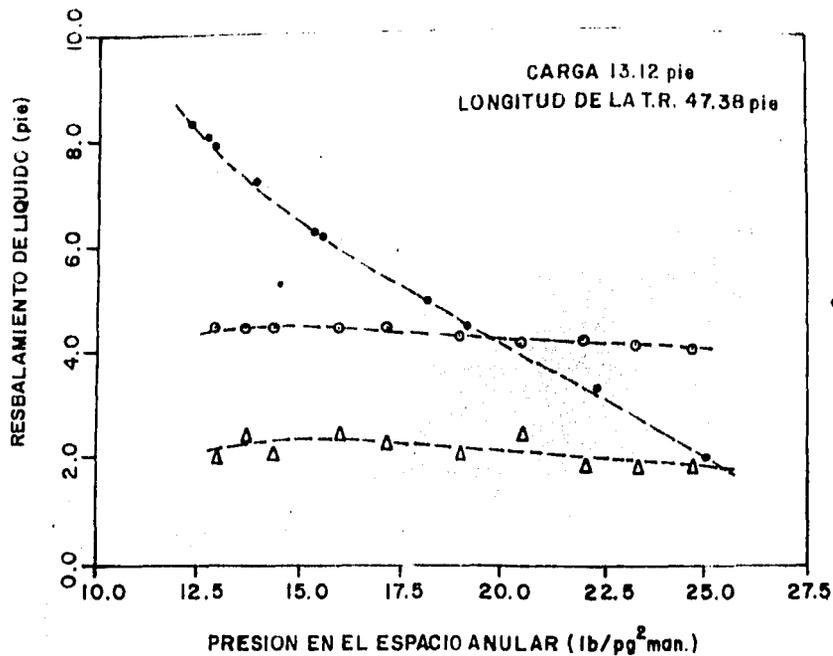


△ BOMBEO NEUMATICO (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA) TABLA A 16.

● PISTON VIAJERO (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA) TABLA A 17.

○ PISTON VIAJERO (PISTON CERRANDO LA LINEA DE DESCARGA) TABLA A 18.

FIG A4 — COMPARACION DE DATOS EXPERIMENTALES DE RESBALAMIENTO DE LIQUIDO PARA BOMBEO NEUMATICO Y PISTON VIAJERO (PISTON SOLIDO No. 1) PARA UNA CARGA DE 13.12 plé Y UNA LONGITUD DE T.R DE 22.79 plé.



• BOMBEO NEUMATICO (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA)-Tabla A1.

△ PISTON VIAJERO (DESCARGANDO A PRESION ATMOSFERICA)-Tabla A19.

○ PISTON VIAJERO (PISTON CERRANDO LA LINEA DE DESCARGA)-Tabla A5

FIG. A5- COMPARACION DE DATOS EXPERIMENTALES DE RESBALAMIENTO DE LIQUIDO PARA BOMBEO NEUMATICO Y PISTON VIAJERO (PISTON No.1, ORIFICIO No 1) PARA UNA CARGA DE 13.12 pie Y UNA LONGITUD DE T.R. DE 47.38 pie.

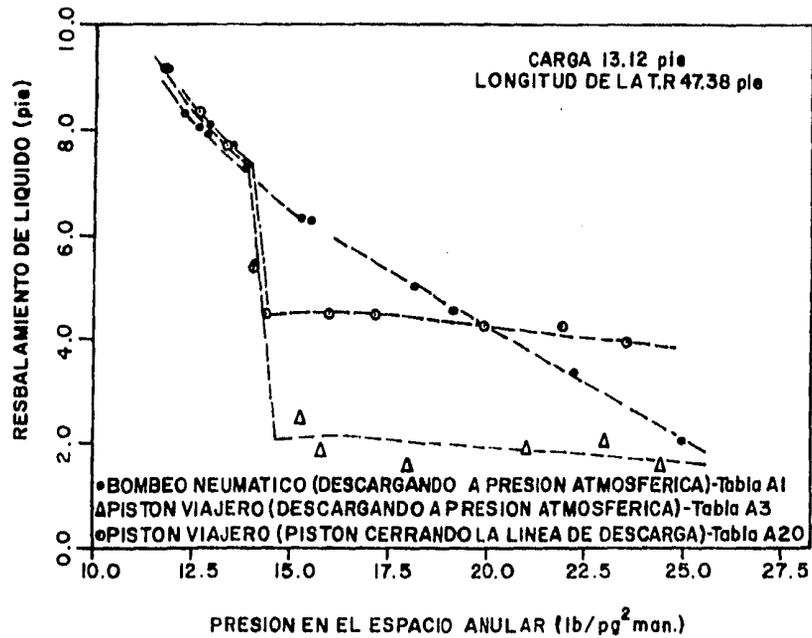


FIG. A6-COMPARACION DE DATOS EXPERIMENTALES DE RESBALAMIENTO DE LIQUIDO PARA BOMBEO NEUMATICO Y PISTON VIAJERO (PISTON SOLIDO No.2) PARA UNA CARGA DE 13.12 pie Y UNA LONGITUD DE T.R. DE 47.38 pie.

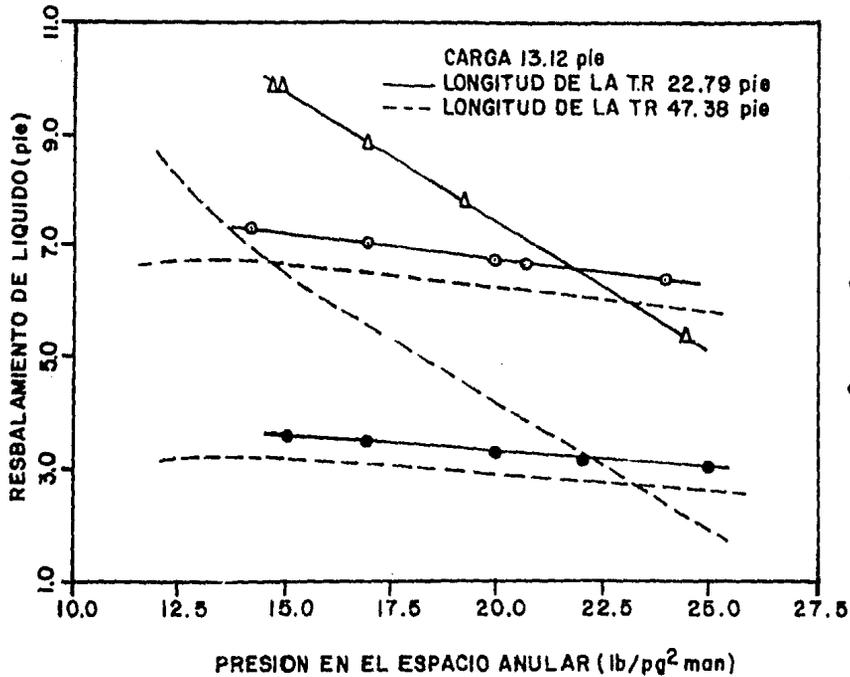


FIG A7- EFECTO DEL VOLUMEN DEL ESPACIO ANULAR EN EL RESBALAMIENTO DE LIQUIDO DEL BOMBEO NEUMATICO Y DEL PISTON VIAJERO.

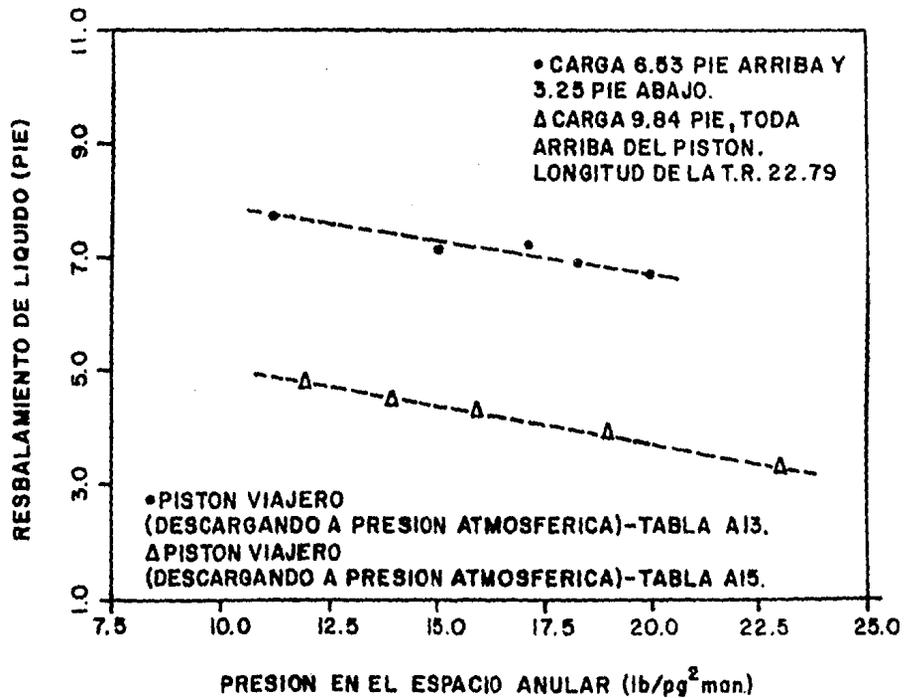


FIG. A8 EFECTO DE LA DISTRIBUCION DEL LIQUIDO EN EL RESBALAMIENTO DE LIQUIDO EN EL PISTON VIAJERO (PISTON SOLIDO NUMERO 1)

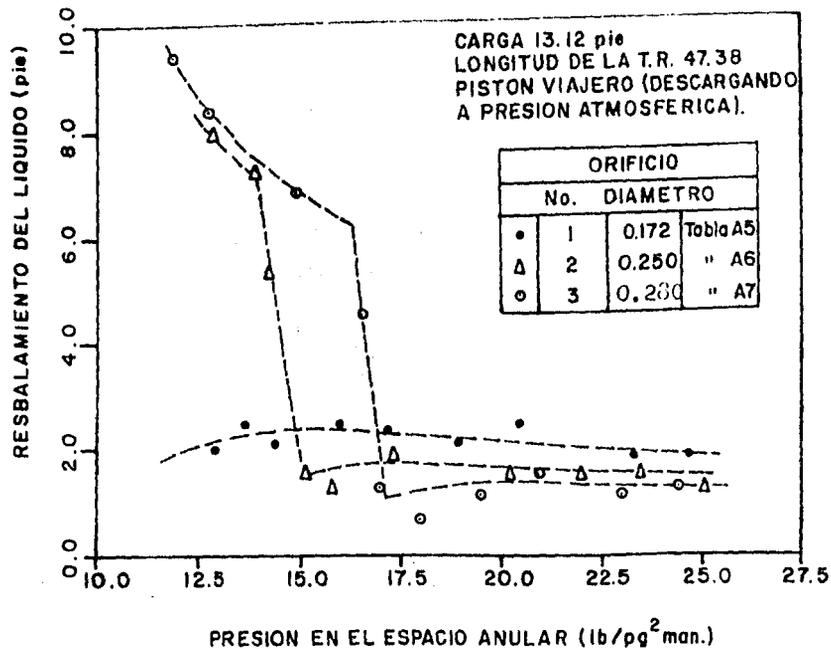


FIG. A9-EFECTO DEL DIAMETRO DEL ORIFICIO EN EL RESBALAMIENTO DE LIQUIDO EN EL PISTON VIAJERO (PISTON No1 ORIFICIOS No1, 2 y 3).

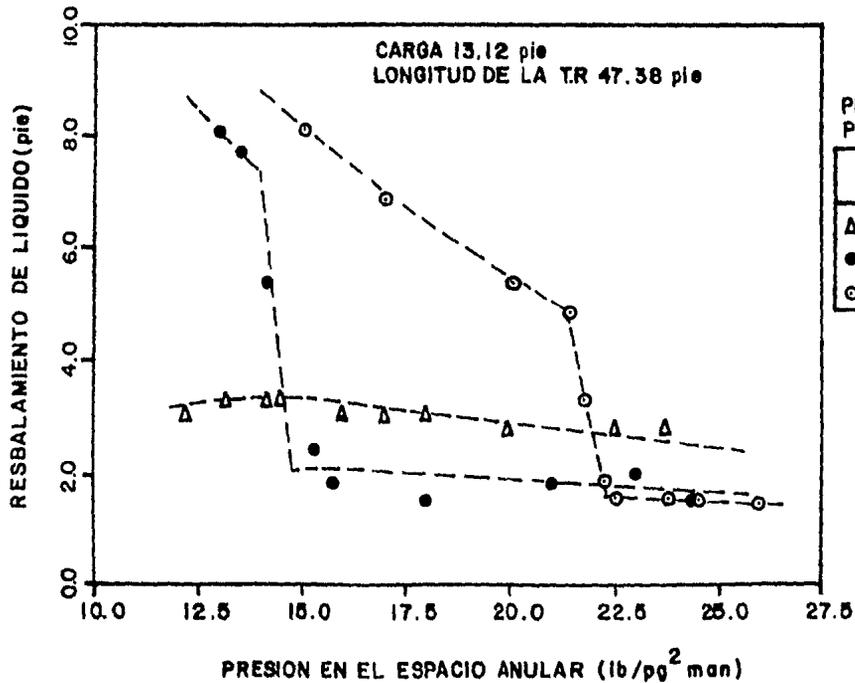


FIG A10— EFECTO DEL ESPACIO EXISTENTE ENTRE EL PISTON Y LA PARED DE LA TUBERIA DE PRODUCCION, EN EL RESBALAMIENTO DE LIQUIDO EN EL PISTON VIAJERO (PISTON SOLIDO No. 1, 2 y 3).

APENDICE B

Tabla B1: Datos del pozo para la Simulación

DATOS DEL POZO:

Profundidad del pozo	= 7500 pie
Temperatura promedio	= 150°F
Diámetro interior de la T.P.	= 1.995 pg.
Diámetro exterior de la T.P.	= 2.375 pg
Diámetro interior de la T.R.	= 4.560 pg.
Volumen inicial del bache de líquido	= 1.0 bl.
Altura inicial del bache de líquido	= 258.6 pie
Presión de separador	= 100 lb/pg ² man
Presión necesaria para elevar el peso del pistón	= 5 lb/pg ²
Puqosidad de la tubería	= 0.00015 pie

DATOS DEL FLUIDO

Líquido: aceite de 30°API con 15% de fracción de agua

gradiente	= 0.39 lb/pg ² /pie
densidad	= 59 lbm/pie ³
viscosidad	= 0.00156 lbm/pie-seg

Gas:	densidad relativa, γ	= 0.72 (aire = 1.0)
	Factor de compresibilidad, z	= 0.95
	Peso Molecular, M	= 20.86
	Viscosidad, μ_G	= 0.00007714 lbm/pie seg.

Tabla B2 - Comparación de Resultados Obtenidos con Diferentes Modelos.

MODELO	Velocidad Media del Pistón	Velocidad Superficial del Pistón	Presión Inicial en el Espacio Anular, PCHI			Tiempo	Resbalamiento de Líquido	
	v_{PL} (pie/seg)	v_{SPL} (pie/seg)	max. (lb/pg ² man)	min. (lb/pg ² man)	$\frac{\text{max-min}}{\text{max}}$ (%)	(Seg)	(pie)	
F&G	16.7	16.7	386	306	20.7	450	---	
Lea	16.7	10.5	325	258	20.6	---	---	
HIDRODINAMICO Hughmark	a = 1.00	20.3	27.8(16.6)	325	267.6	17.7	363	---
	a = 1.01	22.7	77.3(17.0)	325	270.0	16.9	326.7	73.2
	a = 1.01	16.7	69.0(14.7)	260	214.3	17.6	430.8	73.2
MODELO Schmidt	a = 1.00	16.7	28.4(11.0)	325	275.4	15.3	444.4	---
	a = 1.01	17.8	29.2(14.0)	325	278.6	14.3	417.4	73.2
	a = 1.01	16.7	25.2(13.5)	315	268.3	14.8	445.1	73.2

APENDICE C

DESARROLLO DE LAS ECUACIONES DE CONSERVACION.

Schmidt et al⁸ dedujo la forma integral de la ecuación de continuidad (conservación de masa) a partir de su correspondiente forma diferencial.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v}) = 0 \quad \dots \text{C1}$$

La ecuación C1 es válida para cada punto fijo (x, y, z, t) . $V(t)$ representa un volumen de control, el cual cambiará en tamaño, forma o posición con respecto al tiempo. Si la ecuación C1 se integra con respecto a $V(t)$ para cada tiempo fijo, entonces

$$\iiint_{V(t)} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v}) \right) dV = 0 \quad \dots \text{C2}$$

o empleando el teorema de divergencia

$$\iiint_{V(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint_{S(t)} \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad \dots \text{C3}$$

donde $S(t)$ representa la superficie de $V(t)$. Si para cada punto en la superficie $S(t)$, \vec{v}_s representa la velocidad superficial en ese punto, entonces la ecuación C3 podrá escribirse como

$$\iiint_{V(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint_{S(t)} \rho \vec{v}_s \cdot d\vec{A} + \iint_{S(t)} \rho (\vec{v} - \vec{v}_s) \cdot d\vec{A} = 0 \quad \dots \text{C4}$$

El primer término de la ecuación C4 puede interpretarse como el ritmo de incremento de masa en el volumen de control dV debido a los cambios de densidad. El segundo término es el ritmo de incremento en masa debido al cambio en tamaño, forma

o posición del volumen de control. El último término es el ritmo de pérdida de masa a través de la superficie del volumen de control (ésto es el flujo másico). Observándose que el tercer término tiene la siguiente interpretación:

$$\iiint_{V(t)} \rho (\vec{v} - \vec{v}_s) \cdot d\vec{A} = \text{ritmo de masa que sale} - \text{ritmo de masa que entra} \\ = \frac{d(\text{Masa total en el volumen de control})}{dt} \quad \dots C5$$

La forma integral de la ecuación de movimiento (conservación de momento) puede deducirse a partir de su correspondiente forma diferencial:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{v} + \left[\vec{v} \cdot \rho \vec{v} \vec{v} \right] = -\vec{v} p - \left[\vec{v} \cdot \tau \right] + \rho \vec{g} \quad \dots C6$$

Como en la ecuación C1, si la ecuación C6 es integrada con respecto al volumen de control $V(t)$ y empleando el teorema de divergencia, se tiene

$$\iiint_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) dV + \iint_{S(t)} (\rho \vec{v}) (\vec{v}_s \cdot d\vec{A}) + \iint_{S(t)} (\rho \vec{v}) (\vec{v} - \vec{v}_s) \cdot d\vec{A} \\ = - \iint_{S(t)} p d\vec{A} - \iint_{S(t)} \left[\vec{n} \cdot \tau \right] dA + \iiint_{V(t)} \rho \vec{g} dV \quad \dots C7$$

Donde \vec{v}_s es la velocidad superficial, \vec{n} es el vector normal saliente en cada punto de $S(t)$, y τ es el esfuerzo cortante. El primer término de la ecuación C7

representa el ritmo de incremento del momento en $V(t)$ debido a los cambios de densidad y velocidad. El segundo término representa el ritmo de incremento del momento debido al cambio en el tamaño, forma o posición del volumen de control. El tercer término representa el ritmo de pérdida de momento a través de la superficie del volumen de control. El cuarto término representa el ritmo de incremento del momento debido a las fuerzas de presión sobre $S(t)$. El siguiente término representa el ritmo de incremento del momento a causa de las fuerzas viscosas. El último término representa el ritmo de incremento del momento debido a la fuerza gravitacional.

Las ecuaciones C3 y C7 son empleadas para aplicar el principio de conservación de masa y momento en un volumen de control móvil y variable, cuando no es conveniente el empleo de las correspondientes ecuaciones diferenciales.