

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN PRUEBAS DE POZOS

**ANÁLISIS DE FLUJO TRANSITORIO EN YACIMIENTOS HOMOGÉNEOS Y
HETEROGÉNEOS ALARGADOS**

PRESENTADO POR:

GEINER JULIAN CORTÉS SOLANO
MARGARITA MARÍA ROJAS RODRÍGUEZ

Neiva, Huila

Junio de 2010

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN PRUEBAS DE POZOS

**ANÁLISIS DE FLUJO TRANSITORIO EN YACIMIENTOS HOMOGÉNEOS Y
HETEROGÉNEOS ALARGADOS**

PRESENTADO POR:

GEINER JULIAN CORTÉS SOLANO
MARGARITA MARÍA ROJAS RODRÍGUEZ

**Proyecto de Grado presentado como requisito para optar
al título de Ingeniero de Petróleos**

Director: FREDDY HUMBERTO ESCOBAR MACUALO
Doctor en Ingeniería de Petróleos

Neiva, Huila

Junio de 2010

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

Mi tesis y sobre todo estos años vividos los dedico con todo mi amor y cariño ya que son una parte de mi vida y comienzo de otras etapas, principalmente a Dios que me diste la fe, la salud y la esperanza para culminar este trabajo; por demostrarme tantas veces tu existencia y con ello darme fuerzas para salir adelante de cada tropiezo. A mi mamita Mireya quien me enseñó desde pequeña a luchar para alcanzar mis metas, a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Mi triunfo es el tuyo, ¡Te amo! Me has dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nada a cambio. Gracias por tu apoyo, por confiar en mis ideales y por comprender el tiempo que no estuve contigo. A mi papá por darme la vida. A mi hermanita María Salomé que la vida me regaló, por entenderme en los momentos en los cuales no podía compartir con ella, pero que sin embargo con cualquier palabra me brindaba una sonrisa, por sus enseñanzas y porque siempre alimenta mi alma de cosas positivas. A mi profesor y Director Freddy Humberto Escobar quien ha sido como un padre para mí, gracias por creer en mí, por la paciencia y por apoyarme desde el momento en que Dios lo puso en mi camino para acompañarme siempre guiándome para lograr mis metas.

También me gustaría dedicar esta tesis a toda mi familia, por estar siempre a mi lado. A mi abuelita Ligia por todas sus oraciones y buenos consejos ¡Te quiero mucho!, a mis tías y tíos, a mis primos y a todos los que estuvieron al tanto de cada paso dado.

A mis amigos, los que han pasado y los que se han quedado, porque todos ustedes han sido tantas veces parte de mi vida y la han marcado de alguna forma y me han abierto los ojos al mundo. A mi compañero de tesis Geiner Julián por aceptar el reto de alcanzar este logro.

A mis profesores por confiar en mí: a Jairo Sepúlveda, Ricardo Parra, Haydé Morales, Carmen Pinzón. Agradezco el haber tenido unos profesores tan buenas personas como lo son ustedes. Nunca los olvidaré. Y no me puedo ir sin antes decirles a todos, que sin ustedes a mi lado no lo hubiera logrado, tantas desveladas sirvieron de algo y aquí está el fruto. Les agradezco a todos ustedes por haber llegado a mi vida y el compartir momentos agradables y momentos tristes. Pero esos momentos son los que nos hacen crecer y valorar a las personas que nos rodean. Los quiero mucho y nunca los olvidaré.

Margarita María

" Dedico este proyecto y toda mi carrera universitaria a Dios por ser quien ha estado a mi lado en todo momento dándome las fuerzas necesarias para continuar luchando día tras día y seguir adelante rompiendo todas las barreras que se me presenten. Le agradezco a mi mamá Luz Omaira Solano Medina y mi papá Geiner Cortes Montero ya que gracias a ellos soy quien soy hoy en día. Fueron los que me dieron ese cariño y calor humano necesario; son los que han velado por mi salud, mis estudios, mi educación, alimentación entre otros. Son a ellos a quienes les debo todo: horas de consejos, de regaños, de reprimendas, de tristezas y de alegrías de las cuales estoy muy seguro que las han hecho con todo el amor del mundo para formarme como un ser integral y de las cuales me siento extremadamente orgulloso. Le agradezco a mi hermana Livy Fernanda Cortes Solano quien ha estado a mi lado, prácticamente hemos vivido las mismas historias, los mismos pesares y las mismas alegrías; de carácter fuerte y orgullosa pero que me ha demostrado un amor inigualable, una persona capaz de sacrificarse por el bien de su familia; también agradezco a mi hermana menor Maria Lucía Cortes, pues me ha traído alegría desde que nació. También les agradezco a mis amigos más cercanos, a esos amigos que siempre me han acompañado y con los cuales he contado desde que los conocí; Jasmine Valderrama una amiga por siempre, una amiga que quiero como a una hermana que ha compartido conmigo todos mis momentos en muchos sentidos, Mayra Alejandra, Jenifer Arámbulo, Mariann Mahecha, Diego Parra y Margarita Rojas, pues he podido confiar en ellos. Hemos compartido cosas y me han ayudado a superar muchos obstáculos no solo como compañero de estudio sino también como persona y amigo. Les agradezco a todos. Dios los bendiga."

Geiner Julián

AGRADECIMIENTOS

Primero y como más importante, nos gustaría agradecer sinceramente a nuestro director y tutor de tesis, Dr. Freddy Humberto Escobar, su esfuerzo y dedicación. Sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y su motivación han sido fundamentales para nuestra formación como investigadores. Él ha inculcado en nosotros un sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico sin los cuales no podríamos tener una formación completa. A su manera, ha sido capaz de ganarse nuestra lealtad y admiración, así como sentirnos en deuda con él por todo lo recibido durante el periodo de tiempo que ha durado esta tesis.

A Jairo Antonio Sepúlveda Gaona Master en Ingeniería de Petróleos y a Ricardo Parra Pinzón, Ingeniero de Petróleos, evaluadores de este proyecto; por su colaboración y tiempo prestado.

Muchas gracias por todo

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 14 |
| CAPITULO 1. REVISIÓN DE LA LITERATURA | 16 |
| 1.1. YACIMIENTOS HOMOGÉNEOS ALARGADOS | 17 |
| 1.2. YACIMIENTOS HETEROGÉNEOS ALARGADOS | 19 |
| CAPITULO 2. ANÁLISIS DE FLUJO TRANSITORIO EN FORMACIONES HOMOGÉNEAS ALARGADAS | 22 |
| 2.1 GENERACIÓN DE CURVAS TIPO | 22 |
| 2.2. LÍNEAS CARACTERISTICAS | 24 |
| 2.2.1. Flujo Lineal | 24 |
| 2.2.2. Flujo Dual Lineal | 26 |
| 2.2.3. Flujo Parabólico (Pendiente -1/2) | 28 |
| 2.3. DAÑO TOTAL | 30 |
| 2.4. PUNTOS DE INTERSECCIÓN | 31 |
| 2.4.1. Intersección entre la línea estado pseudoestable con la línea de flujo dual lineal, lineal y radial | 31 |
| 2.4.2. Intersección entre la línea de flujo radial con la línea de flujo dual lineal y la línea de flujo lineal | 33 |
| 2.4.3. Intersección entre el flujo parabólico (pendiente -0,5) con el flujo dual lineal y el flujo radial | 34 |
| 2.4.4. Intersección de la línea de pendiente -1 para fronteras abiertas o mixtas cuando el pozo se acerca a la frontera abierta con los flujos (dual lineal, radial y parabólico) | 34 |
| 2.5. PUNTOS MÁXIMOS | 39 |
| 2.5.1. Pozo cerca a la frontera abierta | 39 |

| | |
|--|-----|
| CAPITULO 3. ANÁLISIS DE FLUJO TRANSITORIO EN FORMACIONES HETEROGÉNEAS ALARGADAS | 42 |
| 3.1. MODELO DE YACIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES REGÍMENES DE FLUJO | 42 |
| 3.1.1. Generación de Curvas Tipo | 42 |
| 3.1.2. Regímenes de Flujo | 44 |
| 3.2. MÉTODO DE ANÁLISIS PARA UN YACIMIENTO NATURALMENTE FRACTURADO | 44 |
| 3.2.1. Líneas de Flujo Características | 45 |
| 3.2.2. Puntos de Intersección | 52 |
| CAPITULO 4. APLICACIONES | 64 |
| 4.1. EJEMPLO 1 SIMULADO (YACIMIENTO HOMOGÉNEO) | 64 |
| 4.2. EJEMPLO 2 SIMULADO (YACIMIENTO HOMOGÉNEO) | 69 |
| 4.3. EJEMPLO 3 SIMULADO (YACIMIENTO HOMOGÉNEO) | 74 |
| 4.4. EJEMPLO REAL (YACIMIENTO HOMOGÉNEO) | 80 |
| 4.5. EJEMPLO 1 SIMULADO (YACIMIENTO HETEROGÉNEO) | 84 |
| 4.6. EJEMPLO 2 SIMULADO (YACIMIENTO HETEROGÉNEO) | 91 |
| 5. CONCLUSIONES | 98 |
| 6. RECOMENDACIONES | 99 |
| NOMENCLATURA | 100 |
| REFERENCIAS | 102 |
| ANEXOS | 104 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| FIGURA. 1. GEOMETRÍA DE YACIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS REGÍMENES DE FLUJO (ESCOBAR Y MONTEALEGRE, 2007) | 17 |
| FIGURA. 2. IMAGEN DEL MODELO PARA UNA REGIÓN DE DRENAJE CUADRADA (ESCOBAR Y HERNÁNDEZ, 2006) | 18 |
| FIGURA. 3. GRÁFICO CARACTERÍSTICO DE UN YACIMIENTO NATURALMENTE FRACTURADO, $\Omega = 0.02$, $A = 1 \times 10^{-8}$ | 21 |
| FIGURA. 4. POSICIONES DE POZO PARA CADA GRÁFICA (ESCOBAR Y HERNÁNDEZ, 2006) | 23 |
| FIGURA. 5. RELACIONES DE X_E/Y_E (ESCOBAR Y HERNÁNDEZ, 2006) | 23 |
| FIGURA. 6. RÉGIMEN DE FLUJO LINEAL PARA FRONTERA CERRADA Y POZO DESCENTRADO | 25 |
| FIGURA. 7. RÉGIMEN DE FLUJO DUAL LINEAL PARA FRONTERA CERRADA Y POZO DESCENTRADO | 27 |
| FIGURA. 8. POZO CON $X_D = 1/4$ CON FRONTERAS ABIERTAS (FLUJO PARABÓLICO) | 29 |
| FIGURA. 9. POZO CON $X_D = 1/8$ CON FRONTERAS CERRADAS (ESTADO PSEUDOESTABLE) | 32 |
| FIGURA. 10. INTERSECCIÓN ENTRE LA LÍNEA DE FLUJO PARABÓLICO CON LA LÍNEA DE FLUJO DUAL LINEAL Y LA LÍNEA DE FLUJO RADIAL | 35 |
| FIGURA. 11. INTERSECCIÓN ENTRE LA LÍNEA DE ESTADO ESTABLE CON LA LÍNEA DE FLUJO DUAL LINEAL Y LA LÍNEA DE FLUJO RADIAL | 37 |
| FIGURA. 12. ESTADO ESTABLE EN POZO CON $X_D = 1/4$ Y $X_E/Y_E = 32$ PARA FRONTERAS MIXTAS | 38 |
| FIGURA. 13. PUNTOS MÁXIMOS PARA POZOS LOCALIZADOS CERCA DE LA FRONTERA ABIERTA | 41 |
| FIGURA. 15. LÍMITES DEL YACIMIENTO. | 43 |
| FIGURA. 14. POSICIÓN DEL POZO VERTICAL | 43 |
| FIGURA. 16. EFECTO DE Ω Y A SOBRE LA DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL ADIMENSIONAL DURANTE EL FLUJO DUAL LINEAL | 47 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA. 17. EFECTO DE λ SOBRE LA DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL ADIMENSIONAL DURANTE EL FLUJO DUAL LINEAL | 48 |
| FIGURA. 18. EFECTO DE ω SOBRE EL RECÍPROCO DEL CAUDAL ADIMENSIONAL Y SU DERIVADA DURANTE EL PERIODO DE TRANSICIÓN | 50 |
| FIGURA. 19. IMAGEN DEL PROGRAMA ESPECIALIZADO TABLECURVE 3D | 51 |
| FIGURA. 20. INTERSECCIÓN ENTRE LA LÍNEA DE FLUJO RADIAL CON LA LÍNEA DE FLUJO DUAL LINEAL. | 53 |
| FIGURA. 21. INTERSECCIÓN ENTRE LA LÍNEA DE FLUJO RADIAL CON LA LÍNEA DE ESTADO PSEUDOESTABLE. | 56 |
| FIGURA. 22. FLUJO LINEAL DESPUÉS DEL PERIODO DE TRANSICIÓN | 57 |
| FIGURA. 23. FLUJO LINEAL ANTES DEL PERIODO DE TRANSICIÓN | 58 |
| FIGURA. 24. EFECTO DE λ SOBRE LA DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL ADIMENSIONAL DURANTE EL FLUJO LINEAL | 60 |
| FIGURA. 25. EFECTO DE ω Y λ SOBRE LA DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL ADIMENSIONAL DURANTE EL FLUJO LINEAL | 61 |
| FIGURA. 26. PERIODO DE TRANSICIÓN DURANTE EL RÉGIMEN DE FLUJO DUAL LINEAL | 63 |
| FIGURA. 27. GRÁFICO LOG-LOG DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL Y DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL PARA PRUEBA SIMULADA | 168 |
| FIGURA. 28. GRÁFICO LOG-LOG DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL Y DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL PARA PRUEBA SIMULADA | 273 |
| FIGURA. 29. GRÁFICO LOG-LOG DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL Y DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL PARA PRUEBA SIMULADA | 379 |
| FIGURA. 30. GRÁFICO LOG-LOG DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL Y DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL PARA EJEMPLO REAL | 83 |
| FIGURA. 31. GRÁFICO LOG-LOG DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL Y DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL PARA PRUEBA SIMULADA 1 (YACIMIENTO HOMOGÉNEO) | 90 |
| FIGURA. 32. GRÁFICO LOG-LOG DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL Y DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL PARA PRUEBA SIMULADA 2 (YACIMIENTO HETEROGÉNEO) | 97 |

LISTA DE CUADROS

| | Pág. |
|---|-------------|
| CUADRO 1. DATOS DE ENTRADA SIMULADOR ECRIN V4.02.04..... | 42 |
| CUADRO 2. LÍMITES DEL YACIMIENTO. | 43 |
| CUADRO 3. DATOS DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL Y LA DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL PARA EL EJEMPLO SIMULADO (YACIMIENTO HOMOGÉNEO)..... | 67 |
| CUADRO 4. DATOS DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL Y LA DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL PARA PRUEBA SIMULADA 2 | 72 |
| CUADRO 5. DATOS DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL Y DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL PARA EL EJEMPLO DE UN YACIMIENTO RECTANGULAR. | 78 |
| CUADRO 6. DATOS DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL Y DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL PARA EL EJEMPLO REAL DE UN YACIMIENTO RECTANGULAR HOMOGÉNEO. | 82 |
| CUADRO 7. DATOS DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL Y LA DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL PARA EL EJEMPLO 1 SIMULADO (YACIMIENTO HETEROGÉNEO)..... | 89 |
| CUADRO 8. DATOS DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL Y LA DERIVADA DEL RECÍPROCO DEL CAUDAL PARA EL EJEMPLO 2 SIMULADO (YACIMIENTO HETEROGÉNEO)..... | 96 |

RESUMEN

Este estudio presenta el análisis de pruebas de caudal en pozos verticales que fluyen bajo presión constante, en yacimientos alargados homogéneos y naturalmente fracturados. Se simuló un número significativo de dichas pruebas con parámetros definidos utilizando el programa Ecrin V 4.02.04 (Kappa Saphir) de la compañía Kappa Engineering, para obtener curvas tipo características de los sistemas bajo estudio.

El análisis consistió en estudiar el comportamiento del recíproco del caudal y de la derivada del recíproco del caudal para un pozo vertical productor de petróleo en yacimientos alargados homogéneos y naturalmente fracturados tratados de manera independiente, trabajando los regímenes de flujo para cada uno de ellos, haciendo énfasis en el periodo comprendido durante el flujo dual lineal y lineal único.

En el caso de yacimientos homogéneos se varía la posición del pozo a lo largo del yacimiento para fronteras abiertas, cerradas y mixtas. Por otro lado, cuando se hace el estudio de los yacimientos naturalmente fracturados el pozo se ubica en el centro del yacimiento alargado, y permitiendo que el periodo de transición causado por el depletamiento de las fracturas naturales tome lugar después del flujo radial.

Las curvas tipo permiten identificar puntos de intersección, líneas y pendientes características de cada régimen de flujo, y así generar ecuaciones analíticas y correlaciones, se usan para calcular los parámetros y caracterizar cualquiera de los dos tipos de yacimientos.

Por último las relaciones propuestas se verificaron satisfactoriamente mediante ejemplos sintéticos.

ABSTRACT

This study presents rate transient analysis of vertical wells flowing under constant-pressure conditions in elongated homogeneous and naturally fractured oil-bearing formations. A sufficient number of simulations runs were conducted with some specific parameters using the commercial software Ecrin V 02/04/1904 (Kappa Saphir) produce by Kappa Engineering company with the purpose of obtaining some characteristics type curves of the systems under study. The analysis consisted of studying the behavior of reciprocal of the flow rate and derivative of reciprocal of flow rate for a vertical oil well draining either a homogeneous or naturally fractured elongated reservoir. They were treated independently. The study was focused on the developed flow regimes. Special care was taken for the time period between dual-linear and single-linear flow regimes.

For homogeneous case the position of the well was varied throughout the extreme sides of the reservoir for either open, closed and/or mixed boundaries. On the other hand, for the heterogeneous case, the well is located in the center of the channelized reservoir allowing the transition period caused by the depletion of the fluid inside the natural network of fractures to take place after the radial flow regime.

Curves were constructed to identify which type of intersection points, lines and outstanding features of each flow regime, and generate analytical equations and correlations, which are used to estimate parameters and to characterize any of the two types of deposits.

Finally, synthetic and field examples were used to verify the accuracy of the presented methodology.

INTRODUCCIÓN

Durante las primeras etapas en la producción de un pozo a presión constante, el comportamiento del recíproco del caudal es esencialmente el mismo que el de un yacimiento infinito que produce a caudal constante; éste es el período de flujo transitorio. Si se grafica el recíproco del caudal del pozo contra el logaritmo del tiempo se obtendrá para el período transitorio una línea recta.

Las técnicas convencionales utilizadas para realizar los estudios concernientes a los análisis de pruebas de caudal tienen su base en un gráfico semilogarítmico del recíproco del caudal contra tiempo. Además de ésta, existen las técnicas de ajuste por curvas tipo del recíproco del caudal contra tiempo, en escala semilogarítmica o logarítmica, extendida incluso a la derivada del recíproco del caudal. Por su parte, el método semilogarítmico o análisis convencional de la línea recta, solo hace una buena interpretación cuando se presentan todos los regímenes de flujo, lo cual no ocurre muy a menudo, además de que presentan dificultades para determinar correctamente los regímenes de flujo y el punto exacto donde estos inician y terminan, lo que dificulta definir en forma apropiada las pendientes apropiadas.

Dentro del análisis de estos yacimientos rectangulares homogéneos y heterogéneos, se observó una característica muy particular que se presenta en la curva de derivada del recíproco del caudal contra el tiempo. Cuando el pozo se localiza en uno de los extremos del yacimiento, el régimen más característico de flujo es el lineal, que se identifica por una pendiente de $\frac{1}{2}$ (flujo en una dirección). Cuando la posición del pozo varía con respecto a las fronteras, es decir, no se encuentra en los extremos de él, se presentan dos flujos lineales. Aunque los dos tienen la misma pendiente de $\frac{1}{2}$, las dos líneas presentan interceptos diferentes mostrando un corto periodo de transición entre éstas, el primero se denomina flujo dual lineal, que identifica claramente a estos yacimientos. El análisis planteado se centra en estos regímenes de flujo para determinar permeabilidades, longitud del canal, posición del pozo y tamaño del yacimiento, principalmente.

Hasta el momento no existe una metodología para interpretar pruebas de caudal usando la derivada del recíproco del caudal, por lo que el único estudio de interpretación debía conducirse a simulaciones de casos que representaran las características deseadas. Por ende, en este trabajo se presenta un análisis detallado del recíproco del caudal y la derivada del recíproco del caudal para un pozo vertical que produce de una formación alargada homogénea y heterogénea. Se estudiaron independientemente los regímenes de flujo especialmente el flujo dual lineal puesto que reviste la “huella dactilar” más importante para estos sistemas. Se desarrollaron nuevas ecuaciones y correlaciones para caracterizar tales yacimientos.

El presente trabajo se planteó de la siguiente manera: En el primer capítulo se presenta una recopilación y revisión de los aspectos teóricos sobre los conceptos generales relacionados a estos tipos de yacimientos, además de los antecedentes asociados al

análisis de flujo transitorio aplicado a los mismos. El segundo y tercer capítulo comprende un análisis detallado de los regímenes de flujo y la generación de las curvas tipo para yacimientos alargados homogéneos y heterogéneos, respectivamente. En el cuarto capítulo se presentan aplicaciones (ejemplos de campo y simulados) para la validación de la técnica propuesta en los diferentes tipos de yacimientos alargados (homogéneos y heterogéneos). Finalmente, se dan las recomendaciones y conclusiones que se trazaron en este trabajo.

CAPITULO 1. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Debido a eventos geológicos y tectónicos muchos yacimientos presentan geometría alargada en la cual se pueden desarrollar los flujos dual lineal y lineal único. El flujo lineal sencillo podría ser alterado por cambios en facies (movilidad) o cambios del ancho del yacimiento (yacimiento compuesto). Por ende, se desea identificar y caracterizar estos tipos de sistemas, lo que conducirá a decisiones competentes y una adecuada gerencia del yacimiento. La caracterización de los yacimientos alargados usando curvas tipo se comenzó a realizar en los años setenta (Tiab, 1975, 1976, 1979). Recientemente nuevos estudios han sido realizados particularmente por Escobar et al. (2005), Nutakki y Mattar (1982) y Wong et al. (1986). Escobar et al (2007) presento una serie de ecuaciones y una metodología para caracterizar yacimientos alargados. La combinación del método convencional con la técnica TDS fue presentada inicialmente por Sui et al. (2007) La identificación y determinación de parámetros para tales sistemas se conduce mediante técnicas convencionales (método de la línea recta), curvas tipo del recíproco del caudal versus tiempo y la técnica de la síntesis directa de Tiab (TDS). Esta última ha sido presentada en yacimientos homogéneos de ancho constante. En este trabajo, se extiende la metodología TDS para incorporar variaciones ya sea en movilidad o ancho del yacimiento. (Escobar et al, 2010).

Muchas pruebas de caudal obtenidas de yacimientos alargados tanto homogéneos como naturalmente fracturados, resultado de depósitos fluviales o fallamiento, no se pueden interpretar por medio de métodos convencionales ya que no están identificados ciertos regímenes de flujo, por lo tanto este estudio presenta ecuaciones y correlaciones nuevas para caracterizar este tipo de yacimientos. Las ecuaciones fueron validadas mediante su aplicación a ejemplos simulados y de campo.

Uno de los métodos para caracterizar yacimientos alargados es por medio del análisis por curvas tipo el cual fue usado desde mediados de los años 30. En los años 70, Ramey introdujo sus estudios a la industria petrolera y a comienzos de los años 80 Bourdet et al añadió la derivada, realizando curvas log-log sin necesitar curvas tipo.

Un número representativo de pruebas presión realizado en yacimientos alargados requiere una apropiada identificación y determinación de los parámetros de yacimiento como sea posible, ya que de esto depende una buena administración del yacimiento.

La técnica propuesta en este estudio basada en la Técnica TDS es simple y práctica, la cual se ha extendido para analizar el comportamiento del recíproco del caudal y su derivada.

1.1. YACIMIENTOS HOMOGÉNEOS ALARGADOS

Estos yacimientos pueden presentar una geometría como se observa en la Fig. 1 (parte a). Estos resultan principalmente de depósitos fluviales, comúnmente llamados canales. Cuando las fronteras paralelas del yacimiento son de no flujo (cerradas), y el pozo se encuentra localizado a un extremo de éste, Fig. 1 (parte c), se observa que el régimen de flujo dominante es el flujo lineal caracterizado por una pendiente de 0.5.

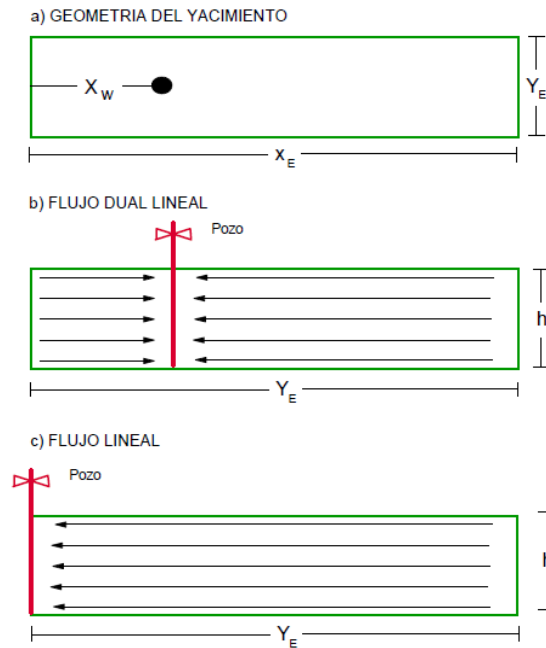


Fig. 1. Geometría de yacimiento y caracterización de los regímenes de flujo (Escobar y Montealegre, 2007)

Para el presente estudio se consideraron tres parámetros ya que se requiere un número infinito de imágenes para producir dos fronteras paralelas, estos se muestran a continuación:

Caso 1. Dos fronteras de No-flujo

Para este caso, los pozos imágenes son del mismo tipo del pozo real: productores. Así no habrá términos cambiantes en la sumatoria de los términos de contribución a las presiones adimensionales.

Caso 2. Dos fronteras de flujo

De acuerdo con la técnica de las imágenes, al generar flujo en las fronteras cambia el tipo de las imágenes del pozo, los que anteriormente se definían como pozos productores ahora son pozos inyectores, así este tipo de fronteras son llamadas “Líneas de presión

constante”, por consiguiente, no todos los pozos imágenes son del mismo tipo del pozo real, productores y ahora son términos cambiantes en la presión y derivada de presión.

Caso 3. Mixtas (Una frontera de No-flujo y Una de flujo)

Similar al caso anterior, no todos los pozos imágenes son del mismo tipo del pozo real: productores. De esta manera existen términos cambiantes en la presión y derivada de presión adimensional.

En la Fig. 2 se puede apreciar la imagen del modelo para una región de drenaje cuadrada

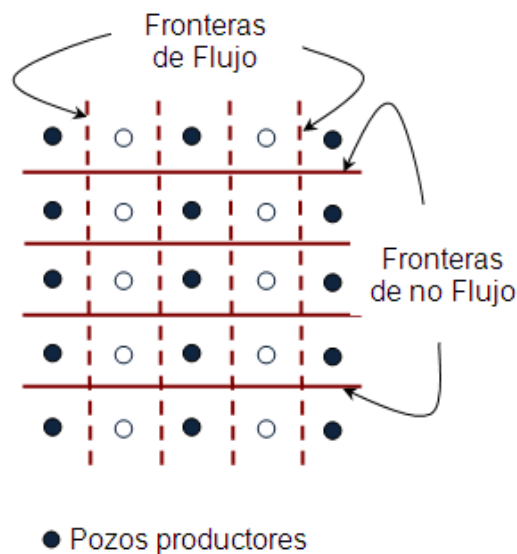


Fig. 2. Imagen del modelo para una región de drenaje cuadrada (Escobar y Hernández, 2006)

Regímenes de flujo

- **Flujo radial.** Se presenta al inicio de la prueba con pendiente en la curva de derivada de presión adimensional igual a cero y con corte en $t_D * P_D' = 0.5$.
- **Flujo dual lineal.** El flujo dual lineal, denominado en la literatura doble flujo lineal o flujo lineal en dos direcciones, se presenta en todas las gráficas con una pendiente de $\frac{1}{2}$ en la curva de derivada de presión. Es el régimen más característico para el yacimiento rectangular planteado, y se muestra con mayor claridad cuando el pozo se ubica en el centro del mismo.
- **Flujo lineal.** Es el flujo lineal en una sola dirección o lineal puro, se presenta solo en el grupo de gráficas de pozo cerca de la frontera cerrada con pendiente en la curva de derivada de presión igual a $\frac{1}{2}$, y se muestra con mayor claridad cuando el pozo se ubica sobre una frontera. En las gráficas se observa que cuando el pozo

- tiende a acercarse a la frontera cerrada, el flujo lineal aumenta y el flujo dual lineal disminuye y que existe un periodo de transición entre estos dos flujos.
- **Flujo parabolico.** (pendiente $-1/2$). En las gráficas cuando el pozo se acerca a la frontera abierta no se presenta la línea de flujo lineal con pendiente igual a $1/2$, es decir, después de que termina el flujo dual lineal y toca la frontera de presión constante debería presentarse, pero la tendencia muestra un flujo con pendiente $-1/2$ que en términos generales se reconoce como flujo hemisférico o esférico, pero que para nuestro caso es el resultado de la acción simultánea de la frontera de flujo estable y del flujo lineal.
 - **Flujo pseudo estable.** Este período de flujo se origina en el grupo de pozos cerca de la frontera de no flujo cuando la onda de presión toca la frontera lejana de no flujo y se reconoce por una pendiente unitaria en la curva de derivada de presión, a tiempos muy tardíos la curva de presión se aproxima a la de la derivada de presión formando una sola línea. Cuando en una prueba de presión se alcanza este flujo, se espera que se presenten en totalidad los regímenes de flujo anteriormente mencionados. Para el grupo de gráficas cuando el pozo se acerca a la frontera abierta, y la frontera lejana es cerrada, la línea de pendiente 1 de flujo pseudo estable no se presenta, aquí se observa que la curva de derivada de presión se levanta un poco hasta un punto máximo y luego cae, debido a la influencia de la frontera de presión constante.
 - **Flujo Estable.** Este período de flujo se origina cuando el transiente de presión toca la frontera de flujo o presión constante y se presenta como una caída en la curva de derivada de presión cuando se alcanza la frontera. (Escobar, 2009)

1.2. YACIMIENTOS HETEROGÉNEOS ALARGADOS

Se espera en formaciones naturalmente fracturadas que el periodo de transición de las fisuras a la matriz tome lugar durante el flujo radial. Sin embargo, dependiendo del valor del parámetro de flujo interporoso, esta transición puede ocurrir antes o después del flujo radial. El primer caso, en una formación heterogénea que ha sido sometida a un tratamiento de fracturamiento hidráulico, la transición puede interrumpir el flujo bilineal o lineal tempranos. Una vez existe depleción de flujo en la fractura hidráulica, éste es restablecido por flujo procedente de la red de fracturas naturales. En el segundo escenario, en una formación alargada, para parámetros de flujo aproximadamente menores a 1×10^{-8} , el periodo de transición ocurre durante el flujo lineal en la formación. Se desea no solo identificar estos sistemas apropiadamente sino complementar la técnica convencional con las expresiones adecuadas para caracterizar tales formaciones de modo que se tenga un manejo más comprensivo del yacimiento/pozo.

Hasta el momento, no se ha dado una metodología para interpretar pruebas de caudal para este tipo de yacimientos, por lo que este estudio se guiará de simulaciones para llegar a los resultados.

Los yacimientos fracturados naturalmente son aquellos que presentan doble porosidad o porosidad dual, por lo que se puede decir que este se compone de dos sistemas (Warren y Root, 1962):

1. Sistema matriz: se caracteriza por presentar una baja permeabilidad, sin embargo este parámetro permite que el fluido pueda ser transferido desde el sistema matriz al sistema de fisuras.
2. Sistema de fractura o fisuras: presenta una alta permeabilidad y baja capacidad de almacenamiento.

Recientemente, Tiab y Bettam (2007) han introducido una técnica para interpretar la presión y la derivada de presión pruebas en las formaciones heterogéneas. Además, se sabe que un importante número de pruebas de presión se realizan yacimientos heterogéneos con una capacidad de transferencia de masa muy baja entre la fractura y la matriz. En el primer caso, el periodo de transición tiene lugar durante el desarrollo del flujo radial. En el segundo caso, el fenómeno se produce después de flujo radial ha desaparecido, es decir durante el flujo dual lineal y el flujo lineal único. En ambos casos, este período de transición tiene una "V" de la presión curva de derivados.

Entre las investigaciones en las pruebas de presión para sistemas alargados durante esta década, Escobar et al. (2007a) introdujeron la aplicación de la técnica TDS para la caracterización de dichos yacimientos permitiendo estimar el área del embalse, el ancho del yacimiento, el factor de daño, entre otros. La caracterización de pruebas de presión en los sistemas alargados por el método convencional fue presentado por Escobar y Montealegre (2007). Basados en la aproximación de flujo interporoso PSS, los parámetros que caracterizan un yacimiento naturalmente fracturado (comportamiento de yacimientos de doble porosidad) son el coeficiente de almacenamiento adimensional ω y el parámetro de flujo interporoso λ .

En la Fig. 3 se puede observar un gráfico característico de un yacimiento naturalmente fracturado con $\omega = 0.01$, $\lambda = 1 \times 10^{-6}$

En muchos pozos se han observado el flujo lineal a largo plazo, este puede ser identificado por una pendiente de $\frac{1}{2}$ en una gráfica log-log del recíproco del caudal y su derivada en función del tiempo. Este flujo lineal es observado algunas veces aún cuando los pozos poseen fracturas hidráulicas pequeñas. (Banbi y Wattenbarger, 1996).

Miller, presentó soluciones para caudal constante para diferentes condiciones de frontera, de la misma forma Nabor y Barham escribieron las soluciones propuestas por Miller, añadiendo el caso de presión constante. Estos autores consideraron un modelo de un yacimiento lineal, presentaron soluciones en términos de presión para caudal constante y en términos de producción acumulada a presión constante.

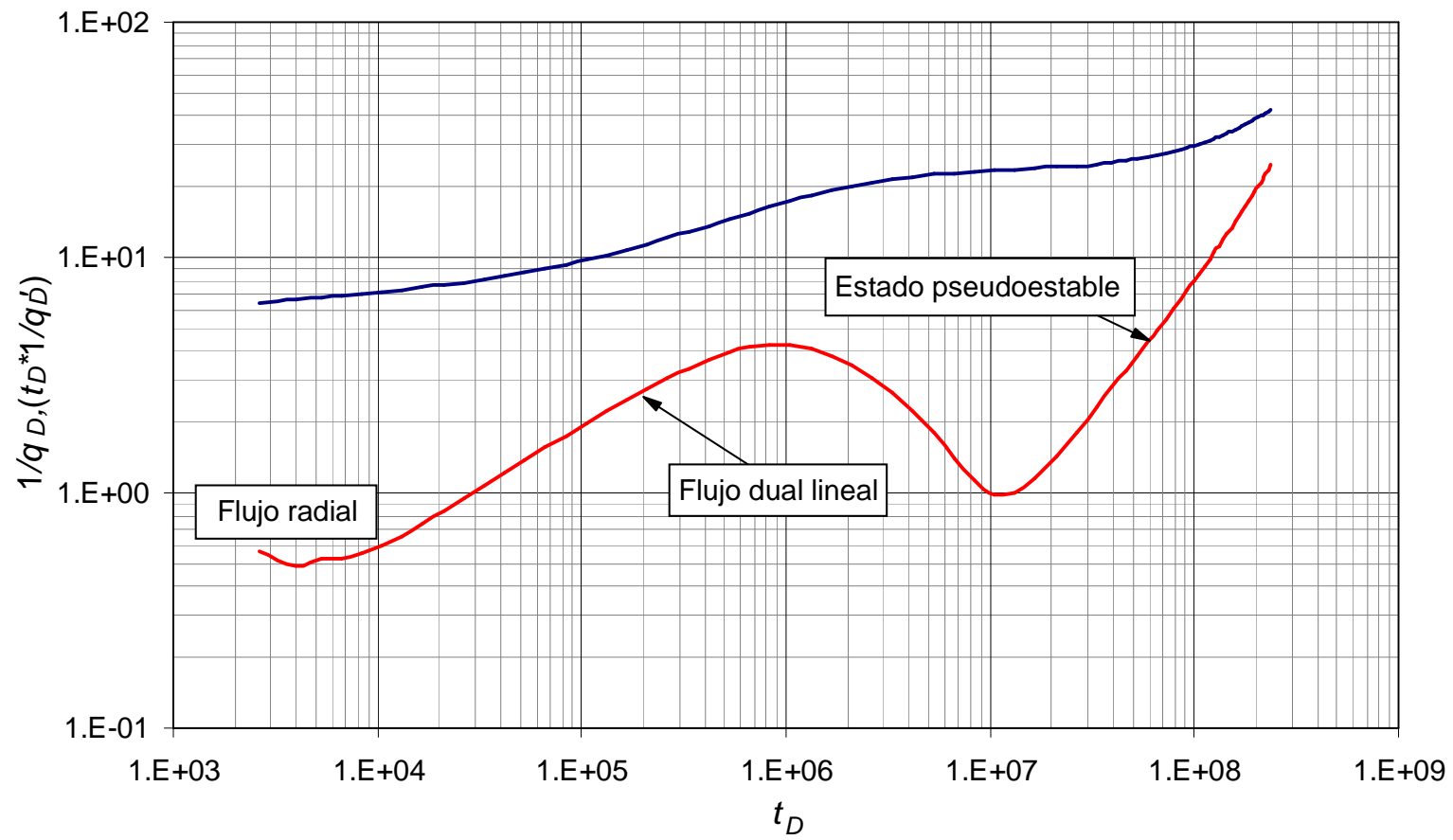


Fig. 3. Gráfico característico de un yacimiento naturalmente fracturado, $\omega = 0.02$, $\lambda = 1 \times 10^{-8}$

CAPITULO 2. ANÁLISIS DE FLUJO TRANSITORIO EN FORMACIONES HOMOGÉNEAS ALARGADAS

En general, el análisis de flujo transitorio en pruebas de presión y de caudal son herramientas excelentes para describir y definir el modelo de un yacimiento cuando se maneja un campo hidrocarburífero; es el método primario para determinar permeabilidad, daño, presión de yacimiento, entre otros. Además, es el único método más rápido y económico para estimar estos parámetros que son dependientes del tiempo.

La técnica de análisis de caudal y derivada del recíproco del caudal sin el uso del ajuste de curvas tipo consiste en determinar huellas características de estas variables dispuestas en un gráfico log-log que permiten obtener relaciones directas para calcular las propiedades de fluido y yacimiento usando las ecuaciones apropiadas de las líneas y puntos característicos de las curvas.

2.1 GENERACIÓN DE CURVAS TIPO

Para la generación de las curvas tipo, las cuales son necesarias para desarrollar la técnica de interpretación, y así poder identificar las líneas y puntos característicos, se utilizaron los siguientes datos de entrada:

Delta de presión, $\Delta P = 200$ psi
Tiempo, $t = 100000$ horas
Daño al yacimiento, $s = 0$
Almacenamiento en el pozo, $C = 0$ bbl/psi
Espesor de la formación, $h = 100$ ft
Compresibilidad de la formación, $c_t = 1 \times 10^{-6}$ psi-1
Radio del pozo, $r_w = 0.5$ ft
Porosidad, $\phi = 20$ %
Factor volumétrico, $B = 1.2$ rb/STB
Yacimiento homogéneo, fronteras paralelas

Se generaron tres grupos de gráficas, de acuerdo a las posiciones posibles de pozo a lo largo y ancho del yacimiento con fronteras cerradas, abiertas y mixtas.

Para cada grupo de gráficas se determina un tipo de frontera con posiciones distintas de pozo dentro de un yacimiento fluvial homogéneo como se muestra en la Fig. 4.

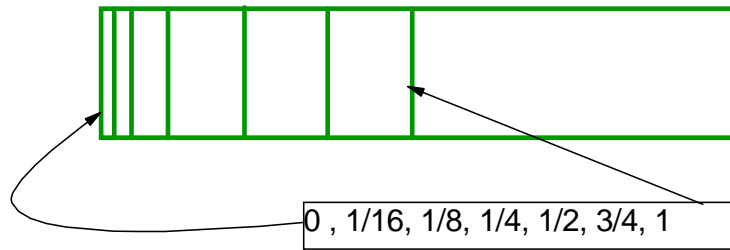


Fig. 4. Posiciones de pozo para cada gráfica (Escobar y Hernández, 2006)

Para cada posición del pozo, es decir para cada gráfica generada se obtuvo distintas curvas para diferentes relaciones entre fronteras X_E/Y_E como se muestra en la Fig. 5.

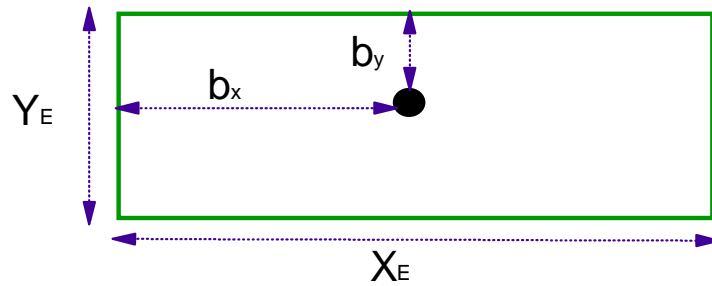


Fig. 5. Relaciones de X_E/Y_E (Escobar y Hernández, 2006)

Para el desarrollo matemático se tienen en cuenta los siguientes parámetros adimensionales:

- Tiempo adimensional:

$$t_D = \frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_i r_w^2} \quad (1)$$

- Tiempo adimensional en términos de área, A:

$$t_{DA} = \frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_i A} \quad (2)$$

- Recíproco del caudal adimensional:

$$\frac{1}{q_D} = \frac{kh\Delta P}{141.2\mu B} \frac{1}{q} \quad (3)$$

- Tiempo adimensional para flujo lineal:

$$t_{DL} = \frac{t_D}{W_D^2} \quad (4)$$

- Ancho adimensional:

$$W_D = \frac{Y_E}{r_w} \quad (5)$$

- Derivada del recíproco del caudal adimensional:

$$[t_D * (1/q_D)'] = \frac{kh\Delta P}{141.2\mu B} [t * (1/q)'] \quad (6)$$

- Posición del Pozo:

$$X_D = \frac{2b_x}{X_E} \quad (7)$$

$$Y_D = \frac{2b_y}{Y_E} \quad (8)$$

2.2. LÍNEAS CARACTERÍSTICAS

2.2.1. Flujo Lineal

Cuando las fronteras paralelas del yacimiento son de no flujo (cerradas), y el pozo se encuentra localizado sobre la frontera, se observa que el régimen de flujo dominante es el flujo lineal caracterizado por una pendiente de 0.5. En la Fig. 6 se observa que existe una transición entre el flujo dual lineal y el lineal único debido a que las pruebas de caudal tardan más en comparación con las pruebas de presión haciendo que se de este comportamiento. La ecuación gobernante obtenida para este comportamiento es:

$$\frac{1}{q_D} = \frac{4\pi\sqrt{t_D}}{W_D} + s_L \quad (9)$$

Siendo s_L el daño causado por el cambio de flujo lineal a dual lineal.

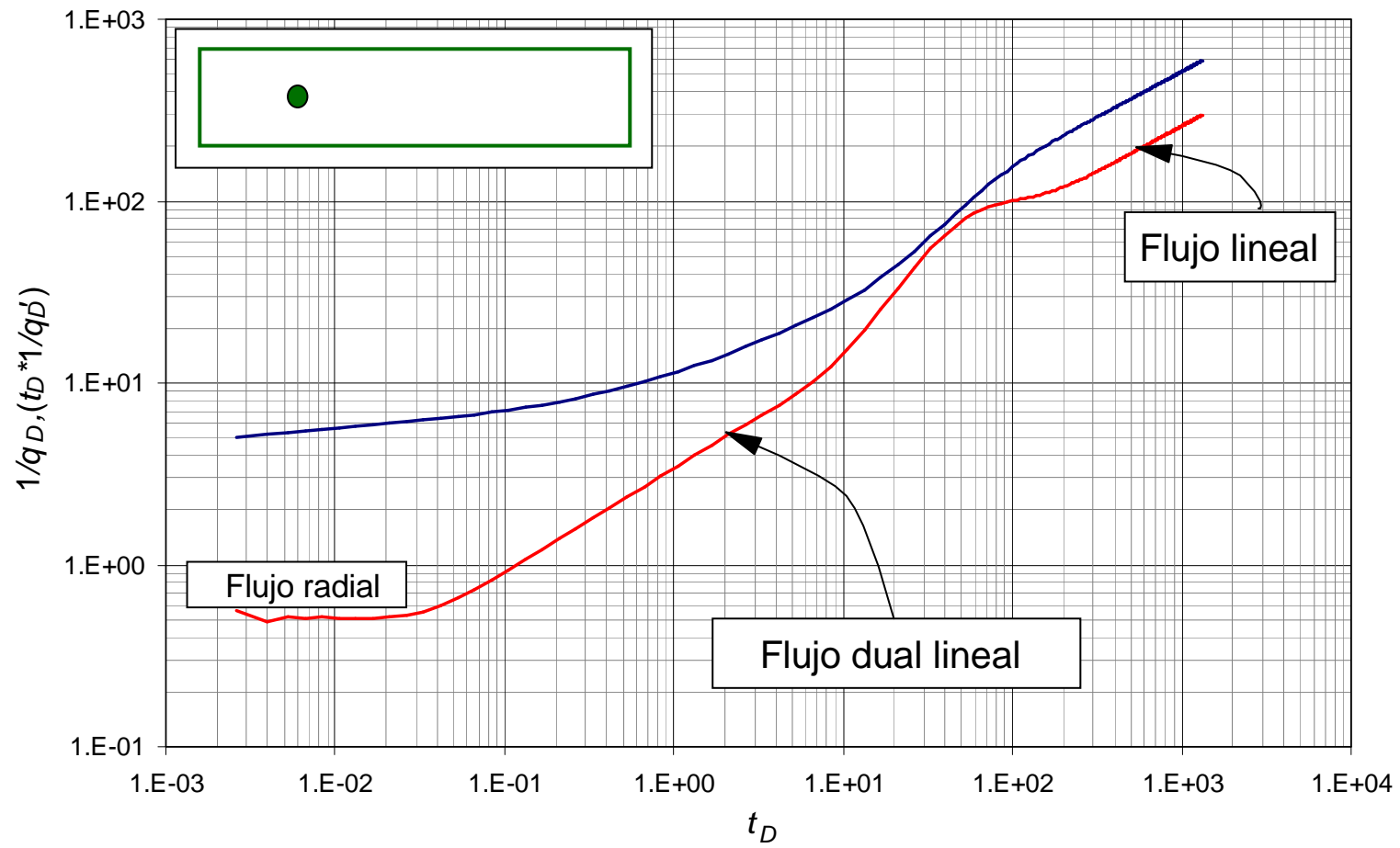


Fig. 6. Régimen de flujo lineal para frontera cerrada y pozo descentrado

La derivada de la Ec. (9) es

$$[t_D^* (1/q_D)'] = \frac{2\pi\sqrt{t_D}}{W_D} \quad (10)$$

Reemplazando las Ecs. (1), (5) y (6) en la anterior ecuación y despejando el producto de la permeabilidad por el ancho del yacimiento, $k^{0.5}Y_E$, se tiene:

$$Y_E\sqrt{k} = \frac{14.4068B}{h\Delta P[t^* (1/q)']_L} \sqrt{\frac{\Delta t\mu}{\phi c_t}} \quad (11)$$

Para $\Delta t = 1 \text{ hr}$

$$Y_E\sqrt{k} = \frac{14.4068B}{h\Delta P[t^* (1/q)']_L} \sqrt{\frac{\mu}{\phi c_t}} \quad (12)$$

El daño causado por la convergencia del flujo lineal a flujo dual lineal puede hallarse dividiendo el recíproco del caudal adimensional por su derivada adimensional, Ecs. (9) y (10), sustituyendo las variables adimensionales por las cantidades en unidades de campo y despejando, s_L :

$$s_L = \left(\frac{1/q}{[t^* (1/q)']_L} - 2 \right) \frac{1}{9.8008Y_E} \sqrt{\frac{k t_L}{\phi \mu c_t}} \quad (13)$$

Donde t_L es cualquier tiempo conveniente durante el flujo lineal y $1/q_L$, t^*1/q_L' son el recíproco del caudal y la derivada del recíproco del caudal correspondiente a t_L .

2.2.2. Flujo Dual Lineal

Este flujo se presenta para todos los casos, fronteras cerradas, fronteras abiertas y fronteras mixtas y toma lugar cuando el pozo se encuentra localizado a cualquier distancia de la frontera más cercana a él, en la Fig. 7 se puede observar este comportamiento.

Se encontró en este estudio que la ecuación gobernante para este régimen de flujo es:

$$\frac{1}{q_D} = \frac{5\sqrt{\pi}D}{2W_D} + s_{DL} \quad (14)$$

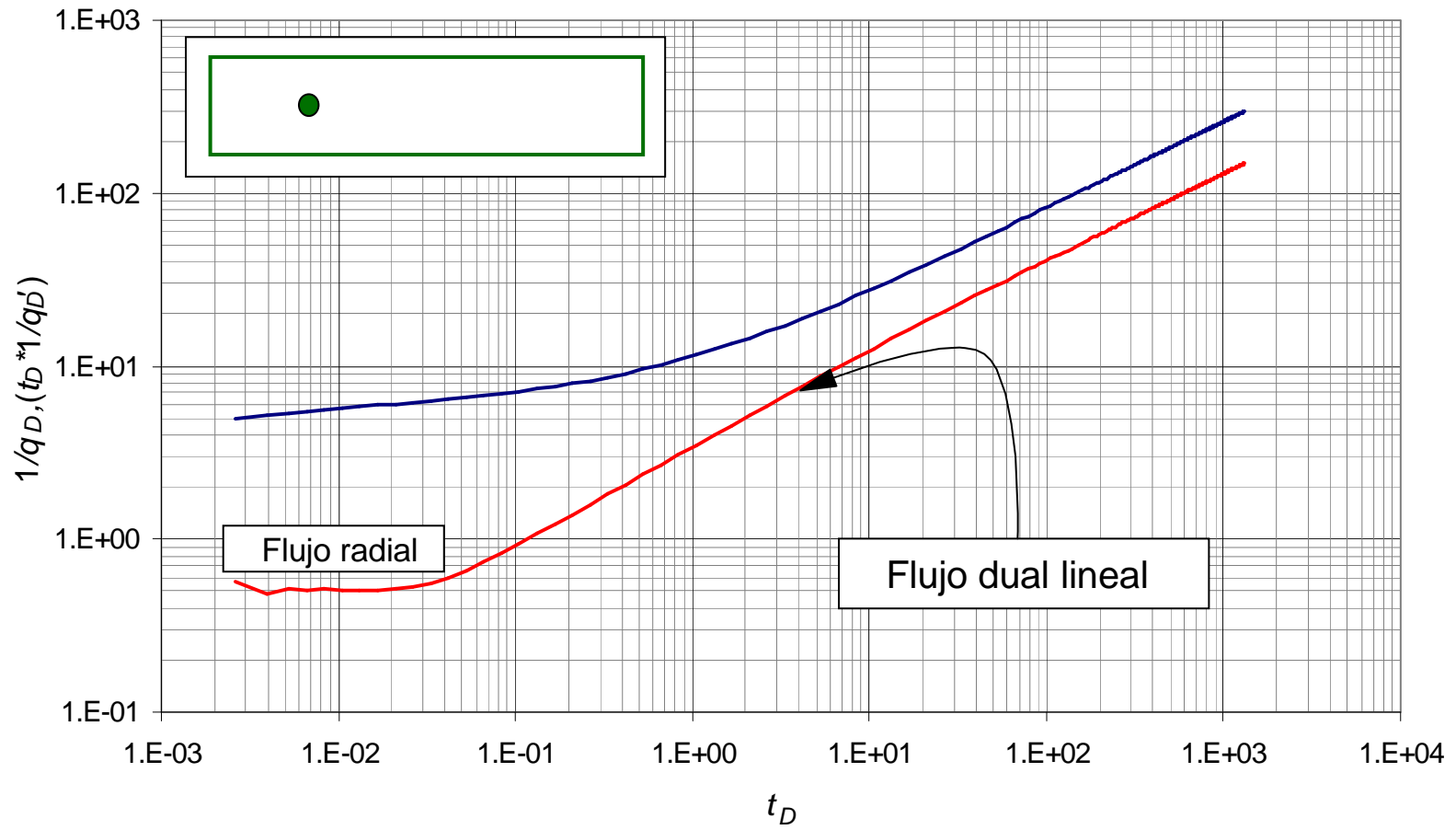


Fig. 7. Régimen de flujo dual lineal para frontera cerrada y pozo descentrado

La derivada de la Ec. (14) es:

$$[t_D^* (1/q_D)'] = \frac{5 \sqrt{\pi} W_D}{4} \quad (15)$$

Reemplazando las Ecs. (1), (5) y (6) en la anterior ecuación y despejando el producto de la permeabilidad por el ancho del yacimiento, $k^{0.5} Y_E$, se tiene:

$$Y_E \sqrt{k} = \frac{5.0801B}{h\Delta P [t^* (1/q)']_{DL}} \sqrt{\frac{\Delta t \mu}{\phi c_t}} \quad (16)$$

Para $\Delta t = 1 \text{ hr}$

$$Y_E \sqrt{k} = \frac{5.0801B}{h\Delta P [t^* (1/q)']_{DL}} \sqrt{\frac{\mu}{\phi c_t}} \quad (17)$$

El daño causado por la convergencia del flujo dual lineal a radial puede hallarse dividiendo el recíproco del caudal adimensional por su derivada, Ecs. (14) y (15), sustituyendo las variables adimensionales por las cantidades en unidades de campo y despejando, s_{DL} :

$$s_{DL} = \left(\frac{1/q}{[t^* (1/q)']_{DL}} - 2 \right) \frac{1}{27.7945 Y_E} \sqrt{\frac{k t_{DL}}{\phi \mu c_t}} \quad (18)$$

Donde t_{DL} es cualquier tiempo conveniente durante el flujo dual lineal y, $1/q_{DL}$, $t^* 1/q_{DL}$ son el recíproco del caudal y la derivada del recíproco del caudal correspondientes a t_{DL} .

2.2.3. Flujo Parabólico (Pendiente -1/2)

En la Fig. 8 se puede observar este flujo el cual normalmente se reconoce como flujo parabólico (PB), pero en el caso del presente estudio es el resultado de la acción simultánea de la frontera de flujo estable y del flujo lineal.

La ecuación adimensional que gobierna este régimen de flujo es:

$$\frac{1}{q_D} = -\frac{\sqrt{\pi}}{4} W_D \left(X_D^2 \right) \left(\frac{X_E}{Y_E} \right)^2 t_D^{-0.5} + s_{PB} \quad (19)$$

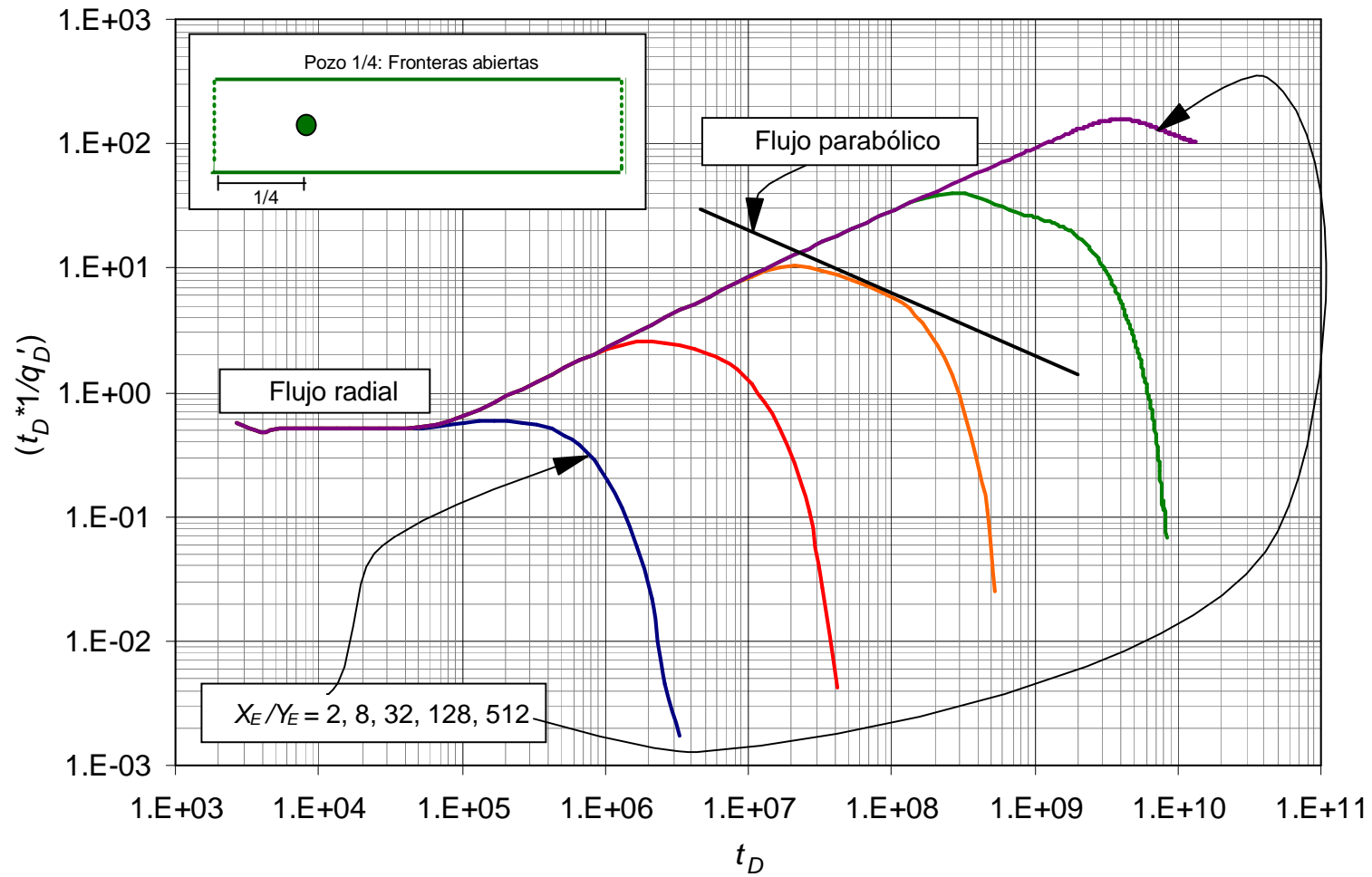


Fig. 8. Pozo con $X_D = 1/4$ con fronteras abiertas (flujo parabólico)

La derivada de la Ec. (19) es:

$$[t_D * (1/q_D)'] = \frac{\sqrt{\pi}}{8} W_D \left(X_D^2 \right) \left(\frac{X_E}{Y_E} \right)^2 t_D^{-0.5} \quad (20)$$

Reemplazando los términos adimensionales de las Ecs. (1), (5), (6) y (7) en la Ec. (20), se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{k^{1.5} Y_E}{b_x^2} = 7705.9213 \left(\frac{\mu B}{h [t^* (1/q)']_{PB}} \right) \left(\frac{\phi \mu c_t}{t_{PB}} \right)^{0.5} \quad (21)$$

El daño causado por la convergencia del flujo parabólico a dual lineal puede hallarse dividiendo el recíproco del caudal adimensional por su derivada adimensional, Ecs. (19) y (20), sustituyendo las variables adimensionales por las cantidades en unidades de campo y despejando, s_{PB} :

$$s_{PB} = \left(\frac{1/q}{[t^* (1/q)']_{PB}} + 2 \right) \frac{54.5745 b_x}{Y_E} \sqrt{\frac{\phi \mu c_t}{k t_{PB}}} \quad (22)$$

Donde t_{PB} es cualquier tiempo conveniente durante el flujo parabólico, $1/q_{PB}$, y $t^* 1/q_{PB}$ son el recíproco del caudal y la derivada del recíproco del caudal correspondientes a t_{PB}

2.3. DAÑO TOTAL

El daño total para este tipo de yacimiento se evalúa de acuerdo a los regímenes de flujo que se presenten:

- Pozo cerca de la frontera cerrada.

En este caso se presentan el flujo radial, dual lineal y lineal.

$$s = s_r + s_{DL} + s_L \quad (23)$$

- Pozo cerca de la frontera abierta.

En este caso se presentan el flujo radial, dual lineal y flujo parabólico.

$$s = s_r + s_{DL} + s_{PB} \quad (24)$$

2.4. PUNTOS DE INTERSECCIÓN

2.4.1. Intersección entre la línea estado pseudoestable con la línea de flujo dual lineal, lineal y radial

Cuando el yacimiento es rectangular con sus fronteras laterales cerradas, para tiempos largos de prueba se obtiene una línea recta de pendiente unitaria como se muestra en la Fig. 9 en la curva de derivada del recíproco del caudal adimensional la cual corresponde al estado pseudoestable, cuya ecuación está dada por:

$$[t_D * (1/q_D)] = \frac{11}{2} \pi t_{DA} \quad (25)$$

El intercepto de esta línea con los demás flujos presentes (flujo lineal, flujo dual lineal y flujo radial) permite obtener las ecuaciones correspondientes para el cálculo del área de drenaje:

- **El flujo dual lineal**

$$A = \sqrt{\frac{kt_{DLPSi} Y_E^2}{62.3221 \phi \mu c_t}} \quad (26)$$

- **El flujo lineal**

$$A = \sqrt{\frac{kt_{LPSSi} Y_E^2}{501.2252 \phi \mu c_t}} \quad (27)$$

- **El flujo radial**

Se presenta como una línea de pendiente cero y se intercepta con la línea de estado pseudoestable. Al igualar la Ec. (25) con el valor adimensional de la derivada durante el flujo radial, Ec. (54) igual a 0.5 se obtiene el área de drenaje:

$$A = \frac{kt_{RPSSi}}{109.7355 \phi \mu c_t} \quad (28)$$

Cuando se observan dos líneas horizontales (dos flujos radiales), o cuando el primero está enmascarado, la intersección de la línea de estado pseudoestable con la radial es:

$$A = \frac{kt_{RPSSi}}{219.4710 \phi \mu c_t} \quad (29)$$

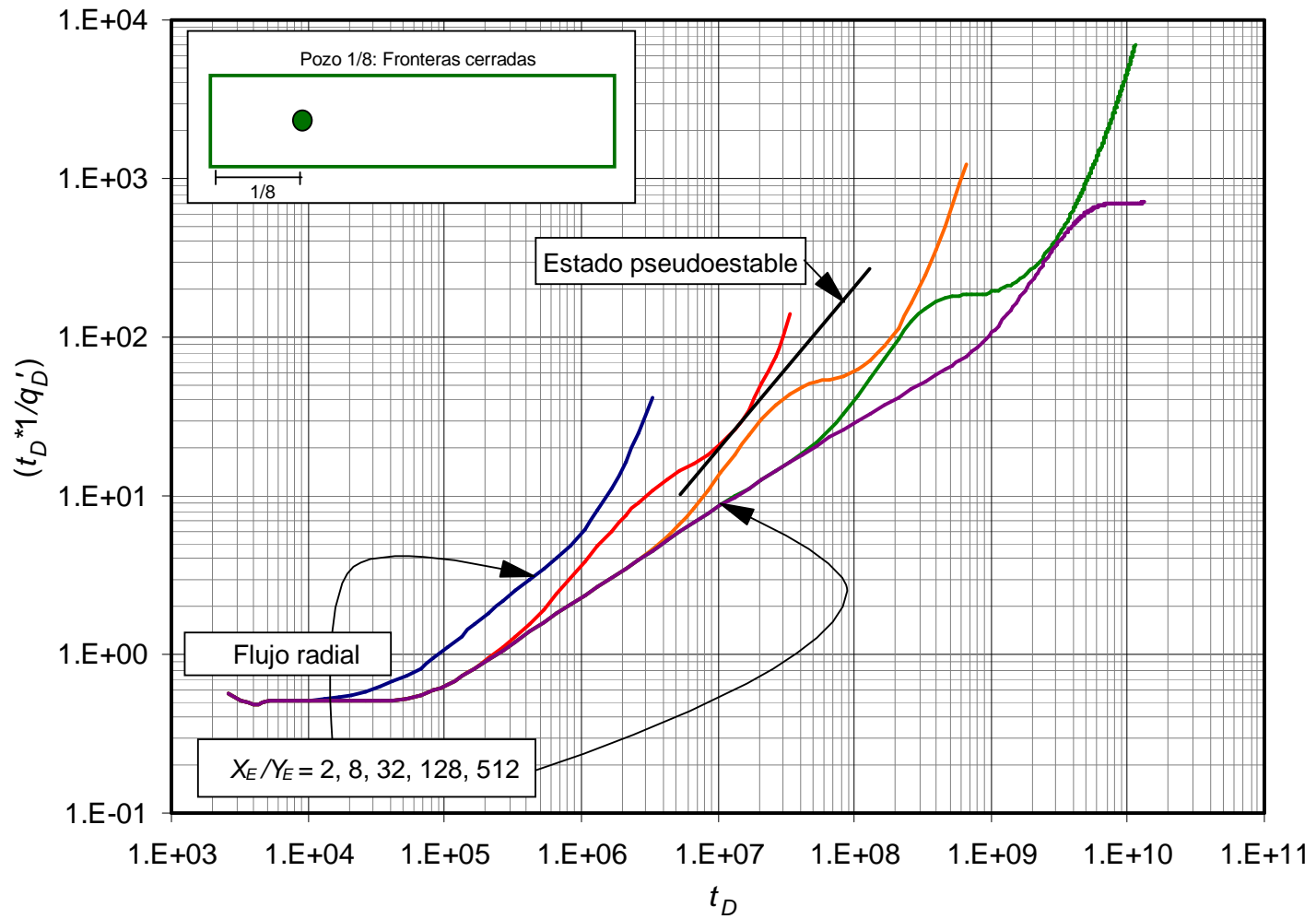


Fig. 9. Pozo con $X_D = 1/8$ con fronteras cerradas (estado pseudoestable)

2.4.2. Intersección entre la línea de flujo radial con la línea de flujo dual lineal y la línea de flujo lineal

De la intersección de la línea de comportamiento radial infinito de la derivada del recíproco del caudal adimensional (línea recta horizontal) con los flujos lineal y dual lineal se obtienen las ecuaciones para calcular el ancho del yacimiento. El punto de corte entre la línea de flujo radial y la línea de flujo lineal único, t_{RLi} , donde el valor de la derivada del recíproco del caudal adimensional adquiere un valor de $1/2$ cuando el pozo se encuentra centrado con respecto a sus fronteras más cercanas, y de 1 cuando el pozo está descentrado y se observan dos líneas horizontales.

Luego para flujo dual lineal tenemos:

$$[t_D * (1/q_D)] = \frac{5 \sqrt{\pi} W_D}{4} \quad (30)$$

Reemplazando las Ecs. (1) y (5) en la Ec. (30) se obtienen el ancho del yacimiento Y_E , en unidades de campo:

$$Y_E = 0.07195 \sqrt{\frac{kt_{RDLi}}{\phi \mu c_t}} \quad (31)$$

Cuando se observan dos líneas horizontales (dos flujos radiales), o cuando el primero está enmascarado, la Ec. (31) se transforma en:

$$Y_E = 0.03597 \sqrt{\frac{kt_{RDLi}}{\phi \mu c_t}} \quad (32)$$

Debido a que el flujo dual lineal se observa en todos los sistemas de fronteras (cerradas, abiertas o mixtas), las ecuaciones (31) y (32) se pueden utilizar para cualquier caso.

Para el flujo lineal único, las Ecs. (31) y (32) se transforman respectivamente en:

$$Y_E = 0.2040 \sqrt{\frac{kt_{RLi}}{\phi \mu c_t}} \quad (33)$$

$$Y_E = 0.1020 \sqrt{\frac{kt_{RLi}}{\phi \mu c_t}} \quad (34)$$

2.4.3. Intersección entre el flujo parabólico (pendiente -0,5) con el flujo dual lineal y el flujo radial

El flujo de pendiente -0.5 se presenta solo cuando el pozo se acerca a la frontera abierta al flujo. De la Fig. 10 se puede ver el intercepto de la línea de flujo parabólico (pendiente -1/2) con el flujo dual lineal y con el flujo radial obteniendo así las ecuaciones para determinar, la distancia del pozo a la frontera cercana, b_x .

- Intersección flujo parabólico y flujo dual lineal

$$b_x = \frac{1}{38.9470} \sqrt{\left(\frac{kt_{DLPBi}}{\phi \mu c_t} \right)} \quad (35)$$

- Intersección flujo parabólico y flujo radial

$$b_x = \sqrt{\frac{Y_E}{109.2242} \left(\frac{kt_{RPB}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5}} \quad (36)$$

2.4.4. Intersección de la línea de pendiente -1 para fronteras abiertas o mixtas cuando el pozo se acerca a la frontera abierta con los flujos (dual lineal, radial y parabólico)

En el caso de un yacimiento rectangular en el que las dos fronteras paralelas están abiertas, la curva del recíproco del caudal adimensional una vez termina el flujo de pendiente -1/2 presenta una caída la cual comienza con una pendiente de -1 como muestra la Fig. 11. La ecuación que gobierna esta línea de pendiente -1 es:

$$[t_D * (1/q_D)'] = \frac{4}{7\pi^2} W_D^2 (X_D^{1.5}) \left(\frac{X_E}{Y_E} \right)^3 t_D^{-1} \quad (37)$$

Cuando se tienen fronteras mixtas y el pozo se acerca a la frontera abierta, una vez se termina el flujo parabólico de pendiente -1/2 cuando toca la frontera cerrada la curva de derivada del recíproco del caudal adimensional presenta una elevación antes de caer; una vez empieza a caer, esta curva presenta también una línea de pendiente -1 como lo muestra la Fig. 12. Su ecuación gobernante es:

$$[t_D * (1/q_D)'] = \frac{W_D^2}{\pi} (X_D^{1.5}) \left(\frac{X_E}{Y_E} \right)^3 t_D^{-1} \quad (38)$$

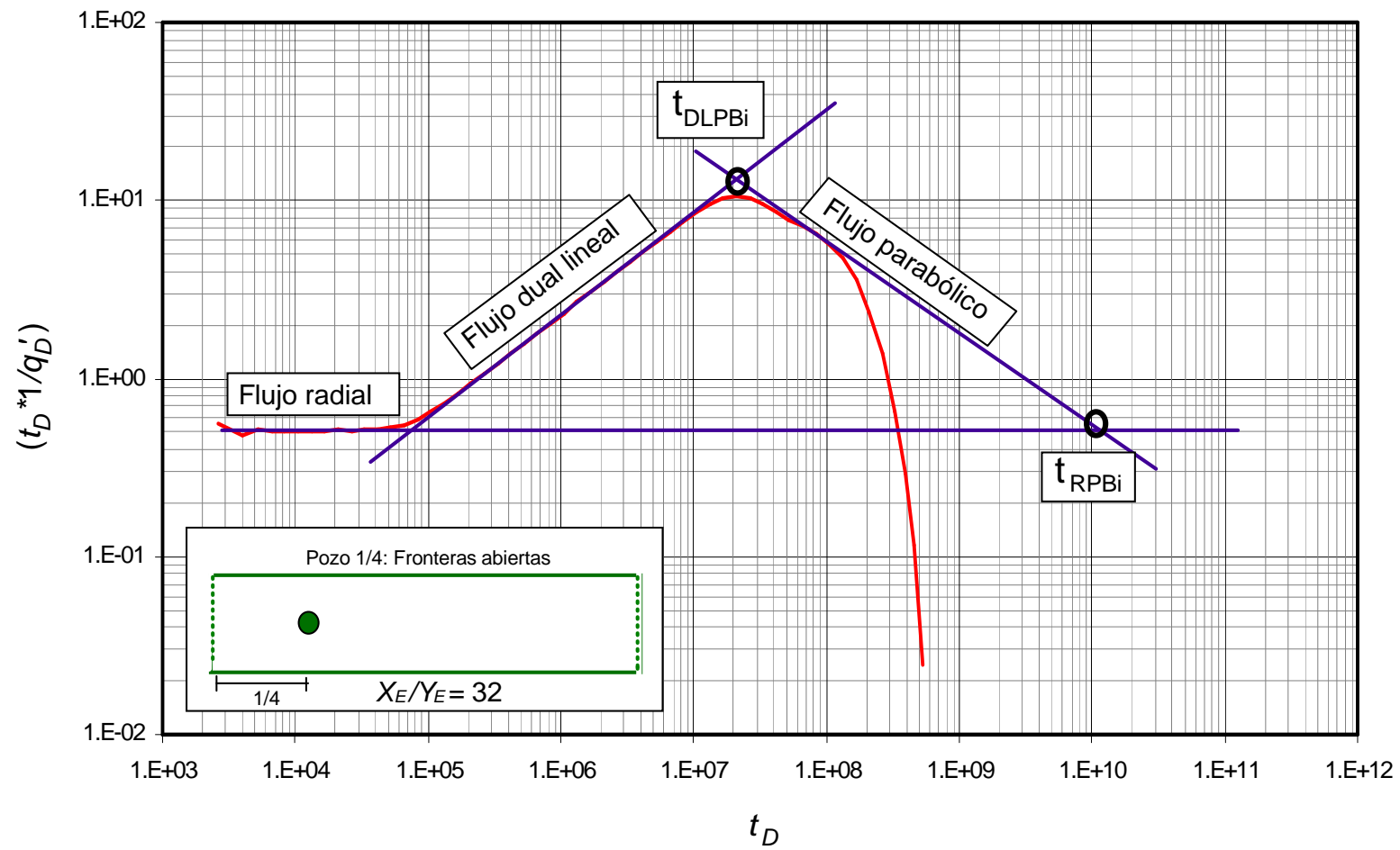


Fig. 10. Intersección entre la línea de flujo parabólico con la línea de flujo dual lineal y la línea de flujo radial

Al interceptar las líneas de pendiente -1 Ecs (37) y (38) con las líneas de los flujos dual lineal, parabólico y radial se obtienen las siguientes ecuaciones:

1. Fronteras abiertas

- Intersección pendiente -1 con flujo dual lineal

$$X_E^3 = \frac{1}{1.33 * 10^9} \left(\frac{kt_{DLSSi}}{\phi \mu c_t} \right)^3 \frac{1}{b_x^3} \quad (38)$$

- Intersección pendiente -1 con flujo radial

$$X_E^3 = \frac{1}{1.74 * 10^6} \left(\frac{kt_{RSSi}}{\phi \mu c_t} \right)^2 \frac{Y_E^2}{b_x^3} \quad (39)$$

- Intersección pendiente -1 con flujo pendiente -1/2

$$X_E^3 = \frac{1}{129.48} \left(\frac{kt_{PBSSi}}{\phi \mu c_t} \right) b_x \quad (40)$$

2. Fronteras mixtas (pozo cerca de la frontera abierta)

- Intersección pendiente -1 con flujo dual lineal

$$X_E^3 = \frac{1}{9.02 * 10^9} \left(\frac{kt_{DLSSi}}{\phi \mu c_t} \right)^3 \frac{1}{b_x^3} \quad (41)$$

- Intersección pendiente -1 con flujo radial

$$X_E^3 = \frac{1}{4.66 * 10^7} \left(\frac{kt_{RSSi}}{\phi \mu c_t} \right)^2 \frac{Y_E^2}{b_x^3} \quad (42)$$

- Intersección pendiente -1 con flujo pendiente -1/2

$$X_E^3 = \frac{1}{3913.6439} \left(\frac{kt_{PBSSi}}{\phi \mu c_t} \right) b_x \quad (43)$$

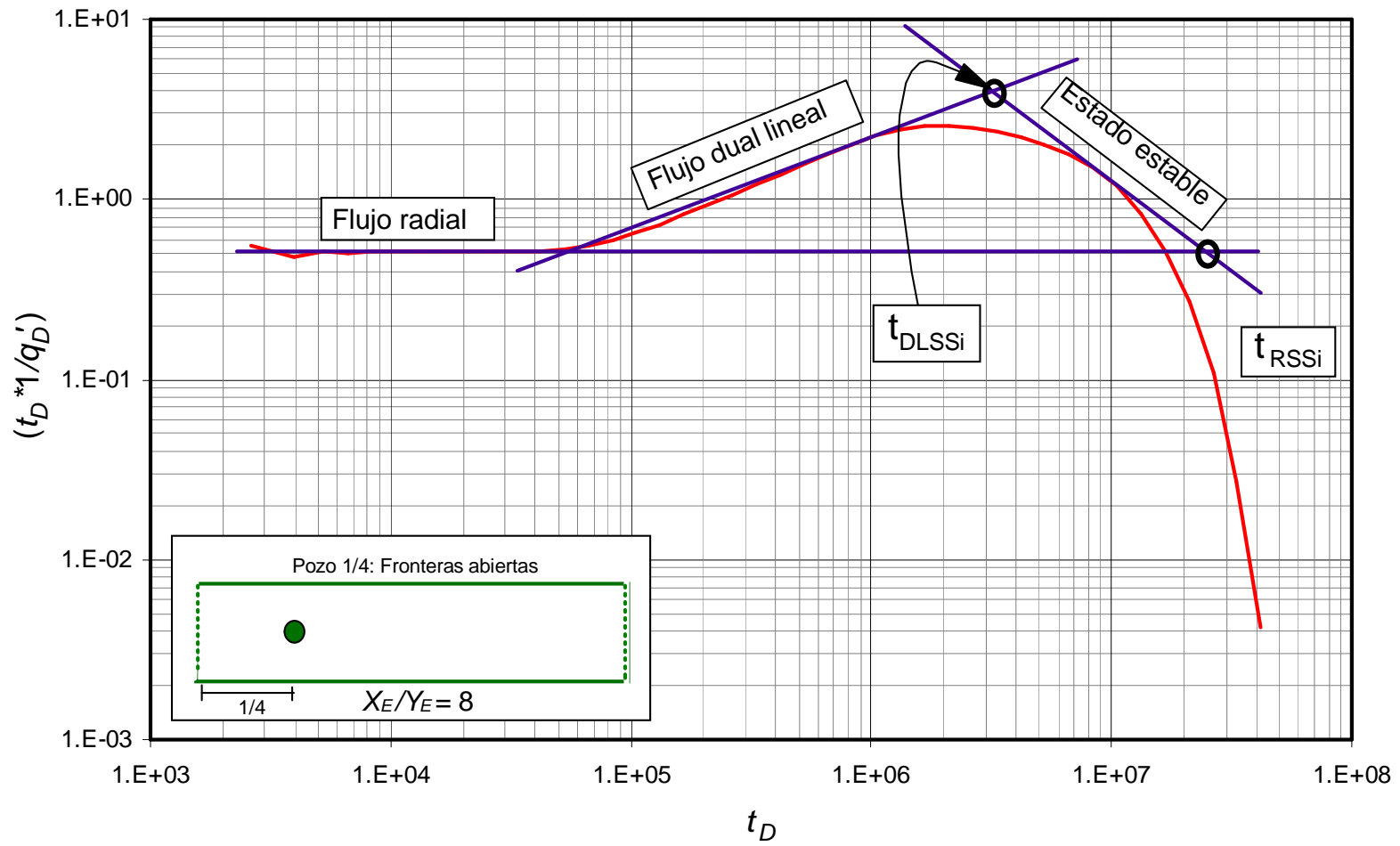


Fig. 11. Intersección entre la línea de estado estable con la línea de flujo dual lineal y la línea de flujo radial

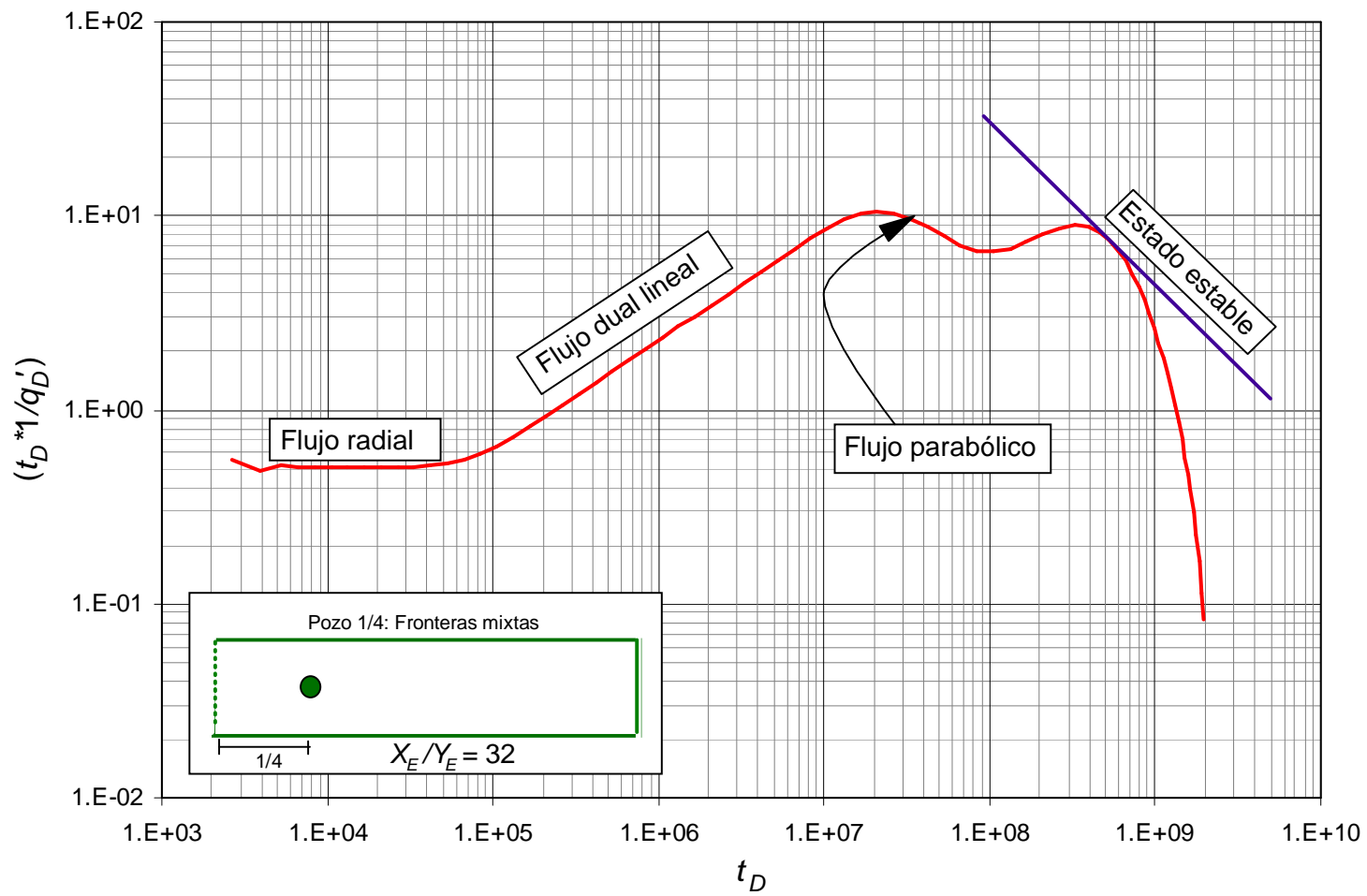


Fig. 12. Estado estable en pozo con $X_D= 1/4$ y $X_E/Y_E= 32$ para fronteras mixtas

2.5. PUNTOS MÁXIMOS

Este análisis se realizó para los yacimientos que tienen una de las dos fronteras laterales abiertas; para los casos cuando el pozo se acerca a la frontera abierta y su frontera lejana es de flujo, es decir, con fronteras abiertas o mixtas.

2.5.1. Pozo cerca a la frontera abierta

Cuando el yacimiento tiene fronteras mixtas y el pozo está localizado cerca de la frontera abierta, la curva de derivada del recíproco del caudal adimensional presenta dos puntos máximos: el primero cuando se cambia de flujo dual lineal a flujo de pendiente $-1/2$ (parabólico) y el segundo cuando se termina el flujo de pendiente $-1/2$ y toca la frontera cerrada.

Cuando el yacimiento tiene ambas fronteras abiertas el comportamiento de la derivada del recíproco del caudal adimensional es similar al de fronteras mixtas, a diferencia que en este último no se observa el segundo punto máximo como se observa en la Fig. 13.

Las ecuaciones de estos puntos máximos permiten calcular dimensión de yacimiento (A y X_E) y localización del pozo (b_x)

- **Primer punto máximo (cambio de flujo dual lineal a parabólico)**

$$[t_D * (1/q_D)']_{x1} = \frac{5 \sqrt{\pi}}{4 W_D} t_{Dx1}^{0.5} \quad (44)$$

$$\frac{X_E}{Y_E} = \frac{5}{4} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{W_D X_D} \right] t_{Dx1}^{0.5} \quad (45)$$

$$\frac{X_E}{Y_E} = \left[\frac{\sqrt{\pi}}{X_D} \right] [t_D * (1/q_D)']_{x1} \quad (46)$$

- **Segundo punto máximo (fin de la línea de flujo parabólico y comienzo del flujo estable)**

$$[t_D * (1/q_D)']_{x2} = \frac{\sqrt{\pi}}{W_D} (X_D^2) t_{Dx2}^{0.5} \quad (47)$$

$$\frac{X_E}{Y_E} = \left[\frac{\pi}{2 X_D} \right] t_{Dx2}^{0.5} \quad (48)$$

$$\frac{X_E}{Y_E} = \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2X_D^2} \right] [t_D * (1/q_D)']_{x2} \quad (49)$$

Reemplazando las variables adimensionales, Ecs. (1), (5), (6) y (7) en las Ecs. (45) y (46) se obtienen dos ecuaciones para determinar la distancia del pozo a la frontera b_x :

$$b_x = \left(\frac{1}{55.58} \right) \sqrt{\left(\frac{kt_{x1}}{\phi \mu c_t} \right)} \quad (50)$$

$$b_x = \frac{khY_E \Delta P [t_D * (1/q_D)']_{x1}}{159.327 \mu B} \quad (51)$$

Reemplazando las variables adimensionales, Ecs. (6) y (7) en las Ecs. (48) y (49) se obtienen dos ecuaciones para determinar el tamaño del yacimiento (X_E)

$$X_E = 637.3 \left(\frac{b_x^2}{Y_E} \right) \left(\frac{\mu B}{\Delta P kh} \right) \left(\frac{1}{[t_D * (1/q_D)']_{x2}} \right) \quad (52)$$

$$X_E = \frac{1}{39.2} \left(\frac{kt_{x2}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \quad (53)$$

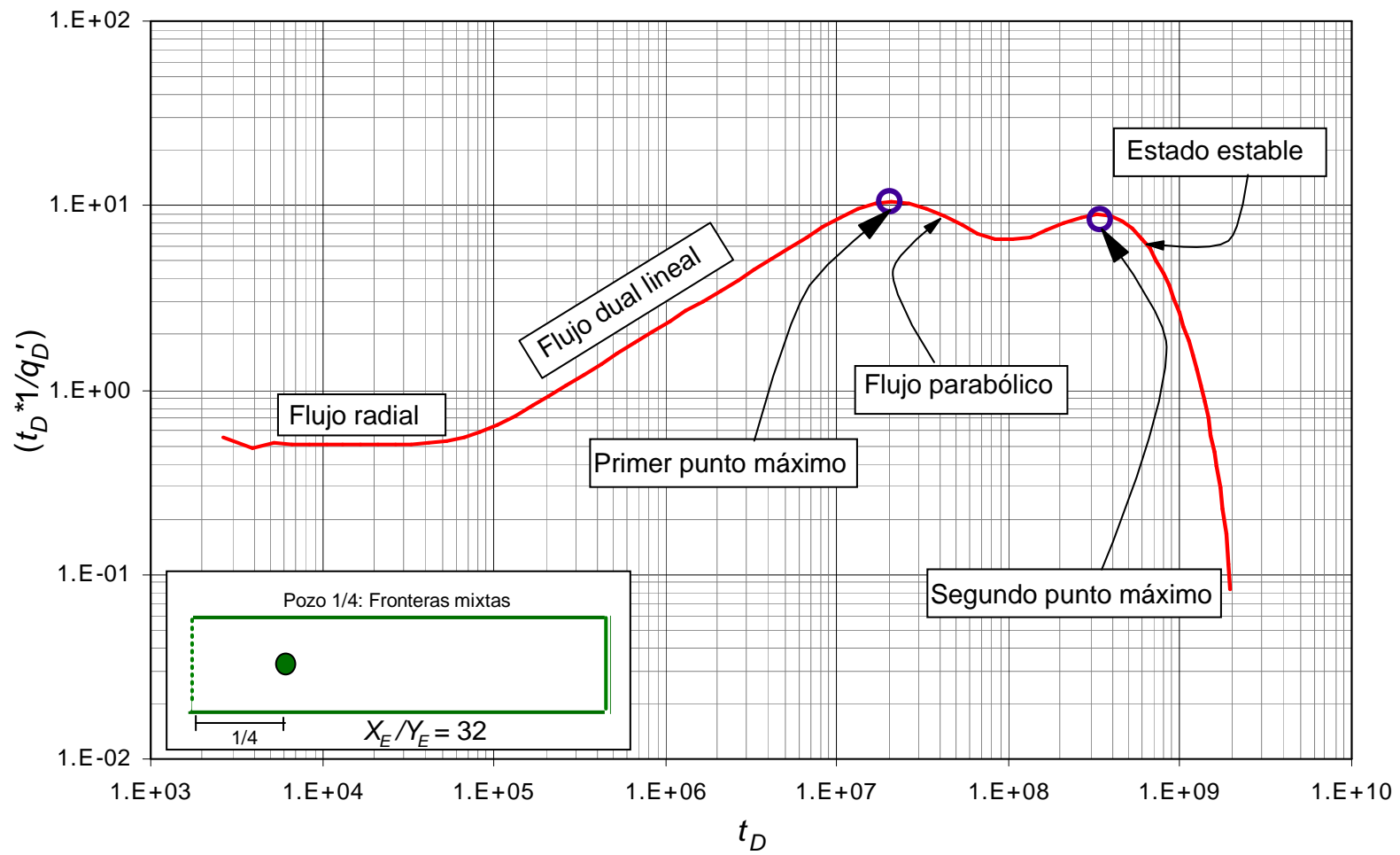


Fig. 13. Puntos máximos para pozos localizados cerca de la frontera abierta

CAPITULO 3. ANÁLISIS DE FLUJO TRANSITORIO EN FORMACIONES HETEROGÉNEAS ALARGADAS

Muchos pozos han sido objeto de estudio para mostrar el flujo lineal a largo plazo. El flujo lineal puede ser identificado en una grafica log-log de tasa de producción en función del tiempo por una línea de pendiente de $\frac{1}{2}$. De igual forma este flujo lineal se puede observar incluso cuando un yacimiento está naturalmente fracturado, como es el caso que se analizará en este capítulo. Por lo tanto el análisis de pruebas de caudal es una herramienta útil para describir y definir el modelo en un yacimiento heterogéneo alargado. El primer paso es establecer ciertas propiedades como la permeabilidad, presión de yacimiento, viscosidad, entre otras. Determinadas estas y evaluadas con las pruebas de caudal se deben seguir unos pasos:

- Modelo del yacimiento e identificación de los diferentes regímenes de flujo.
- Estimación de parámetros.

3.1. MODELO DE YACIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES REGÍMENES DE FLUJO

3.1.1. Generación de Curvas Tipo

Para la construcción de las curvas tipo, las cuales son necesarias para generar las ecuaciones analíticas y las correlaciones, se utilizaron dos programas, el Ecrin V4.02.04 (Kappa Saphir), que permitía generar la prueba de caudal, posteriormente por medio del uso del programa elaborado se realizó el cálculo de la derivada del recíproco del caudal.

| Variables | Valor | Unidades |
|---|--------------------|----------|
| Tiempo, t | 1000 | horas |
| Daño del pozo, s | 0 | |
| Espesor de la formación, h | 50 | ft |
| Compresibilidad de la formación, c_t | 1×10^{-6} | 1/psi |
| Radio del pozo, r_w | 0.5 | ft |
| Porosidad, ϕ | 0.1 | % |
| Caída de presión, ΔP | 200 | psi |
| Factor volumétrico, B | 1.2 | rb/STB |
| Y_E | 1000 | ft |
| Viscosidad, μ | 2 | cp |
| Coeficiente de almacenamiento, ω | 0.02 | |
| Parámetro de flujo interporoso, λ | 1×10^{-8} | |

Cuadro 1. Datos de entrada simulador Ecrin V4.02.04.

La posición de pozo en el yacimiento naturalmente fracturado es en el centro del mismo, como se muestra en la Fig. 14.

Para generar las curvas tipo se tomaron distintos valores tanto para el coeficiente de almacenamiento ω como para el parámetro de flujo interporoso λ .



Fig. 14. Posición del pozo vertical

En el momento de ingresar los datos en el programa Ecrin V4.02.04 se debe indicar los límites del yacimiento (Fig. 15)

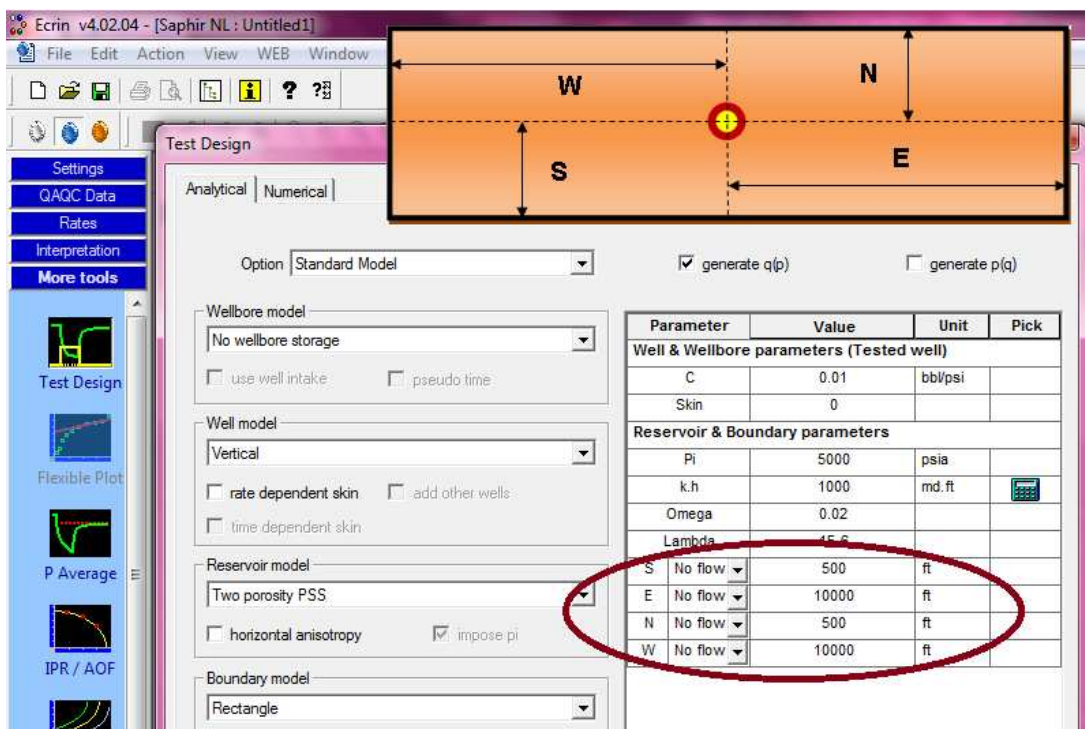


Fig. 15. Límites del yacimiento.

| | | |
|----------|-------|----|
| S | 500 | Ft |
| E | 10000 | Ft |
| N | 500 | Ft |
| W | 10000 | Ft |

Cuadro 2. Límites del yacimiento.

3.1.2. Regímenes de Flujo

En la Fig. 3 se puede observar los distintos regímenes de flujo característicos en un gráfico del recíproco del caudal y derivada del recíproco del caudal en función del tiempo para un yacimiento naturalmente fracturado.

Para comenzar el primer régimen de flujo encontrado es el radial de acción infinita, el cual se puede identificar por una línea con pendiente cero en la curva de la derivada, seguido se observa el flujo lineal por medio de una recta con pendiente de $\frac{1}{2}$. El periodo que se encuentra después del flujo lineal es la fracción que corresponde al depletamiento de la fractura y el segundo a la reacción del yacimiento homogéneo equivalente. En última instancia se tiene el flujo pseudoestable mostrando una recta con una pendiente unitaria.

3.2. MÉTODO DE ANÁLISIS PARA UN YACIMIENTO NATURALMENTE FRACTURADO

El análisis de pruebas de pozo en su mayoría hace uso de variables dimensionales. La importancia de las variables adimensionales es que simplifican los modelos reduciendo así el número total de incógnitas. Tienen la ventaja adicional de proporcionar modelos de soluciones que son independientes de cualquier sistema de unidades en particular.

En el Capítulo 2 se encuentran las ecuaciones que se mostrarán a continuación, sin embargo en el presente capítulo se mencionarán nuevamente.

- Tiempo adimensional:

$$t_D = \frac{0.0002637 kt}{\phi\mu c_t Y_E^2} \quad (1)$$

- Para el recíproco del caudal adimensional, $1/q_D$, se define como:

$$\frac{1}{q_D} = \frac{kh\Delta P}{141.2\mu B} \frac{1}{q} \quad (3)$$

- Tiempo adimensional para flujo dual lineal:

$$t_{DL} = \frac{t_D}{W_D} \quad (4)$$

- Ancho adimensional:

$$W_D = \frac{Y_E}{r_w} \quad (5)$$

- Derivada del recíproco del caudal adimensional:

$$[t_D * (1/q_D)'] = \frac{kh\Delta P}{141.2\mu B} * [t * (1/q)'] \quad (6)$$

3.2.1. Líneas de Flujo Características

Régimen de Flujo Radial

Se tienen las siguientes ecuaciones demostradas para la derivada del inverso del caudal durante este tiempo así:

$$[t_D * (1/q_D)'] = 0.5 \quad (54)$$

Reemplazando el valor correspondiente a la derivada se puede de una manera simple y rápida obtener el valor de la permeabilidad durante el flujo radial en la red de fracturas:

$$k = \frac{70.6 \mu B}{h\Delta P [t * (1/q)']_r} \quad (55)$$

Donde $(t*1/q')_r$ es la derivada del recíproco del caudal en cualquier tiempo durante el flujo radial, t_r .

El daño durante el flujo radial es:

$$s_r = 0.5 \left(\frac{(1/q_r)}{[t * (1/q)']_r} - \ln \left(\frac{kt_r}{\phi \mu c_i Y_E^2} \right) + 7.43 \right) \quad (56)$$

Régimen de Flujo Dual Lineal

El flujo dual lineal es identificado por una tendencia de pendiente positiva de valor 0.5 en el gráfico de la derivada. Este régimen se presenta en pozos hidráulicamente fracturados, pozos horizontales y yacimientos alargados el cual es el tema de este capítulo. Puesto que las líneas de corriente convergen a un plano, los parámetros asociados con el flujo lineal son la permeabilidad de la formación en la dirección de las líneas de flujo y el área de flujo normal a las líneas de corriente.

Se encontró que la ecuación que representa el flujo dual lineal es:

$$1 / q_D = \frac{9}{4} \frac{\sqrt{\pi t_D}}{\sqrt{\omega} W_D} + s_{DL} \quad (57)$$

Siendo s_{DL} el daño causado por la convergencia del flujo radial al dual lineal.

La derivada de la ecuación anterior es:

$$[t_D * (1/q_D)'] = \frac{9}{8} \frac{\sqrt{\pi t_D}}{W_D \sqrt{\omega}} \quad (58)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior los valores de las ecuaciones que representan las variables adimensionales Ecs. (1), (3) y (5), se obtiene el término del ancho del yacimiento Y_E así:

$$Y_E = \frac{4.162115 B}{h \Delta P [t * (1/q)']_L} \sqrt{\frac{\mu \Delta t_{DL}}{k \phi c_i \omega}} \quad (59)$$

Para $\Delta t = 1$ hr

$$Y_E = \frac{4.162115 B}{h \Delta P [t * (1/q)']_{DL}} \sqrt{\frac{\mu}{k \phi c_i \omega}} \quad (60)$$

El daño causado por la convergencia del flujo radial al lineal puede hallarse dividiendo la presión adimensional por su derivada, sustituyendo las variables adimensionales por las cantidades en unidades de campo y despejando s_{DL} , se tiene:

$$s_{DL} = \left(\frac{(1/q)}{[t * (1/q)']_{DL}} - 2 \right) \frac{1}{54.738732 Y_E} \sqrt{\frac{kt_{DL}}{\phi \mu c_i \omega}} \quad (61)$$

Punto Máximo

El cálculo de valor del parámetro de flujo interporoso, λ , es importante ya que este relaciona la permeabilidad de la matriz con la permeabilidad de la fractura. El procedimiento a seguir fue tomar todos los valores máximos de la derivada del recíproco del caudal durante el periodo de transición.

Se asignaron valores para λ en un rango entre 1×10^{-8} hasta 9×10^{-8} y para cada uno de estos valores de λ se grafican valores de ω entre 0.01 hasta 0.1. En la Fig. 16 se puede observar el comportamiento de esta variación de valores.

Para leer el valor máximo único se grafica $(t_D * 1/q_D') \lambda^{1/2}$ vs t_D para diferentes familias de curvas variando λ y ω como se puede apreciar en la Fig. 17.

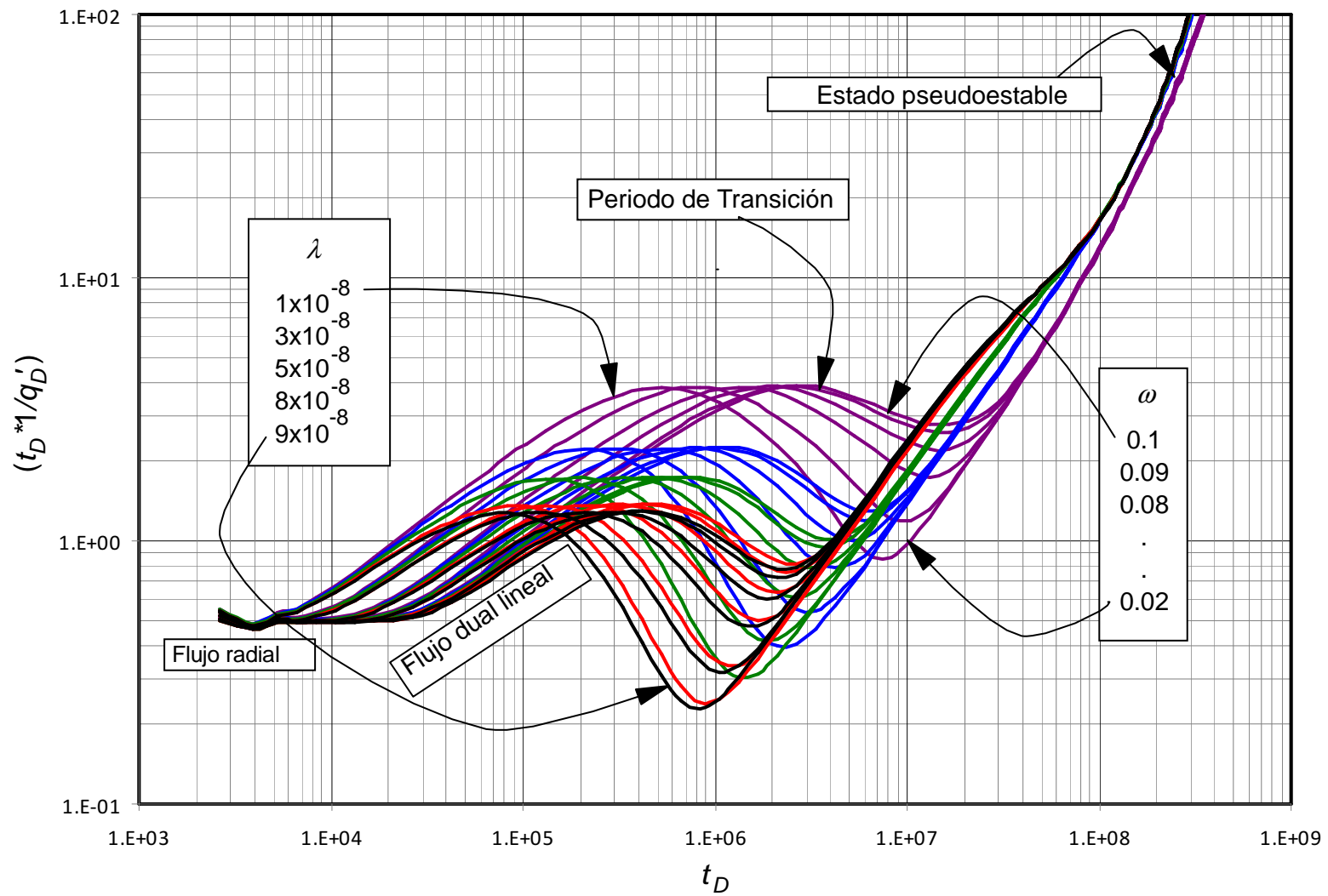


Fig. 16. Efecto de ω y λ sobre la derivada del recíproco del caudal adimensional durante el flujo dual lineal

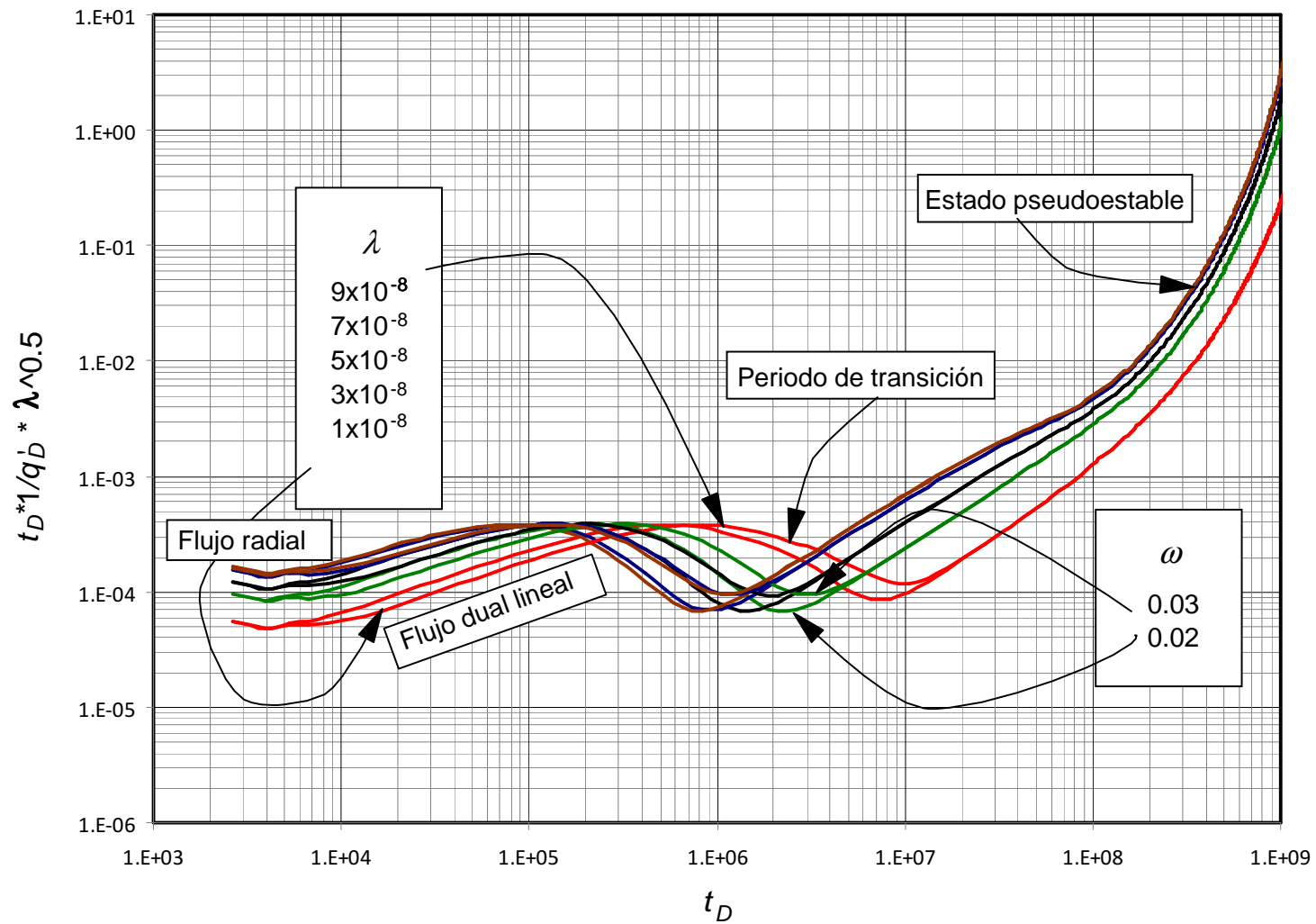


Fig. 17. Efecto de λ sobre la derivada del recíproco del caudal adimensional durante el flujo dual lineal

Después de realizar esta gráfica se obtiene el punto máximo para la familia de curvas con un valor de:

$$[t_D * (1/q_D)']_{\max} \lambda^{1/2} = 0.0003876 \quad (62)$$

Para despejar el valor del parámetro de flujo interporoso, λ , se reemplaza la Ec. (1) en la Ec. (61) así:

$$[t_D * (1/q_D)'] = \frac{hk\Delta P}{141.2\mu B} [t * (1/q)']_{\max} \quad (63)$$

Obteniendo

$$\lambda = \left[\frac{0.05472912\mu B}{kh\Delta P [t * (1/q)']_{\max}} \right]^2 \quad (64)$$

Puntos Mínimos

La línea recta en una gráfica de la derivada del recíproco del caudal indica el periodo de transición para yacimientos alargados naturalmente fracturados. En la Fig. 16 se observa este comportamiento. Lo que se conoce como punto mínimo corresponde a la parte más baja de dicha curva la cual depende del coeficiente de almacenamiento adimensional, pero a su vez independiente del parámetro de flujo interporoso.

Para poder obtener una correlación que permita conocer el valor de este punto se grafica $1/q_D$ y $(t_D * 1/q_D)'$ en función t_D para diferentes valores de ω para un determinado valor de λ como se puede observar en la Fig. 18. Se grafica $1/q_D$ y $(t_D * 1/q_D)'$ versus t_D para un rango de valores de ω para un determinado λ . Por lo tanto partiendo de esta gráfica se leyeron los valores de interés es decir los que se encuentran relacionados con el valor del coeficiente de almacenamiento y se utilizó el programa especializado TableCurve 3D para generar las correlaciones mencionadas (Fig. 19)

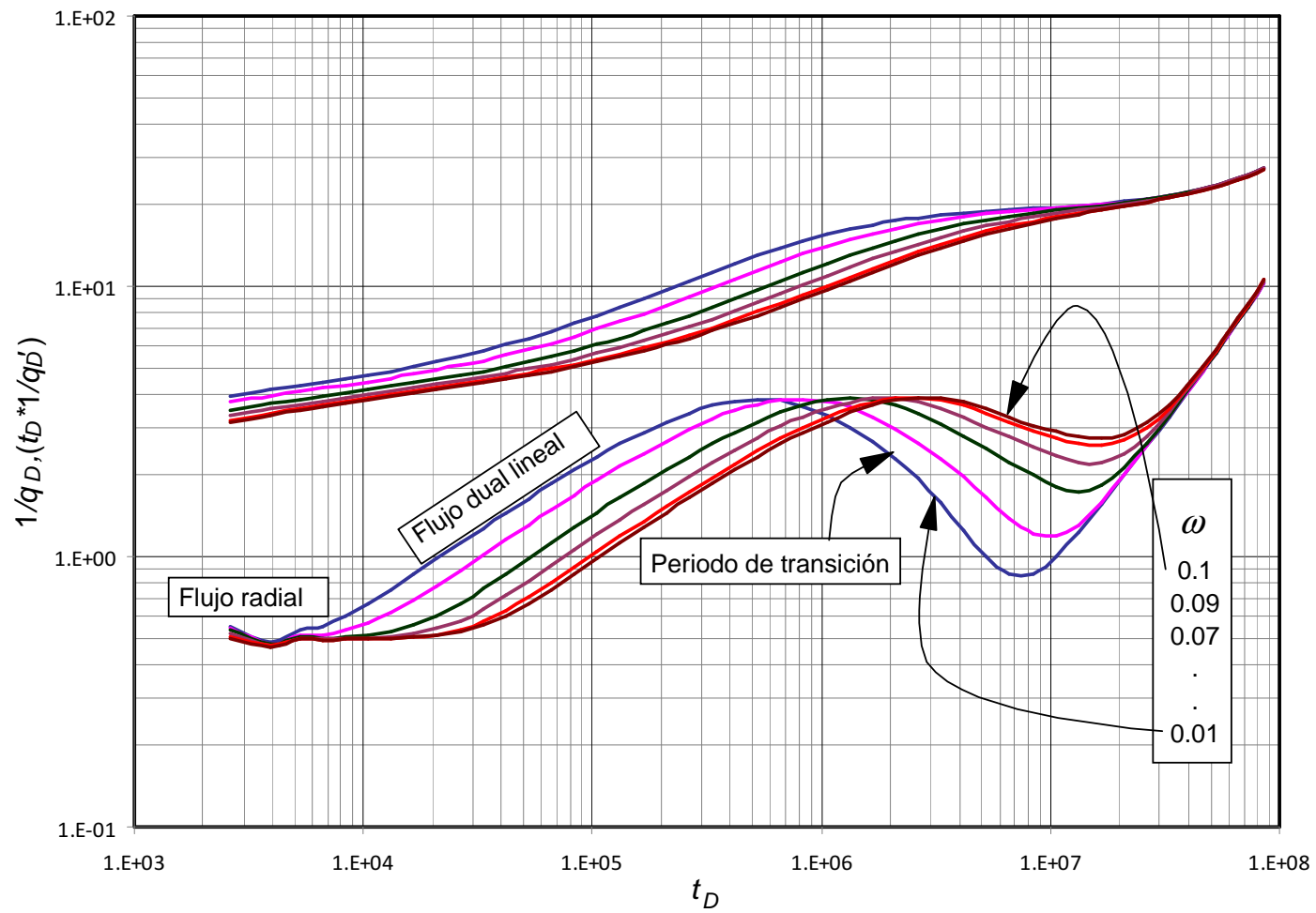


Fig. 18. Efecto de ω sobre el recíproco del caudal adimensional y su derivada durante el periodo de transición

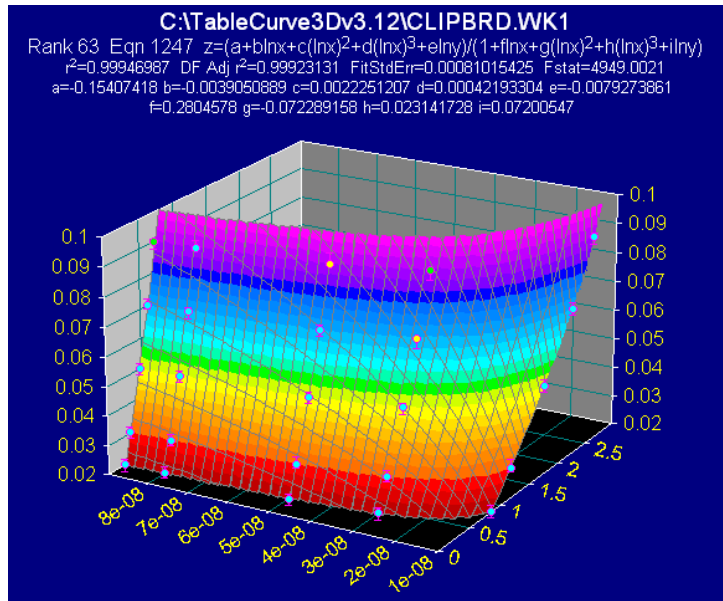


Fig. 19. Imagen del programa especializado TableCurve 3D

Para este caso se determinó que el valor de ω depende de la derivada del recíproco del caudal y del valor de λ de la siguiente manera:

$$\omega = \frac{a + b \ln(t_D * 1/q_D')_{\min} + c(\ln(t_D * 1/q_D')_{\min})^2 + d(\ln(t_D * 1/q_D')_{\min})^3 + e \ln \lambda}{1 + f \ln(t_D * 1/q_D')_{\min} + g(\ln(t_D * 1/q_D')_{\min})^2 + h(\ln(t_D * 1/q_D')_{\min})^3 + i \ln \lambda}$$

Las constantes son definidas:

$$a = -0.15407418$$

$$b = -0.0039050889$$

$$c = 0.0022251207$$

$$d = 4.2193304 \times 10^{-4}$$

$$e = -0.0079273861$$

$$f = 0.2804578$$

$$g = -0.072289158$$

$$h = 0.023141728$$

$i = 0.07200547$

Esta correlación es la recomendable usada, ya que tiene una exactitud de 0.9998

3.2.2. Puntos de Intersección

Intersección entre la línea del estado pseudoestable con la línea de flujo dual lineal.

En un yacimiento alargado cuando sus fronteras laterales son cerradas, teniendo en cuenta que el tiempo de prueba es largo se llega a obtener una línea recta con pendiente unitaria en una gráfica de la derivada del recíproco del caudal adimensional en función del tiempo adimensional. Dicha pendiente unitaria corresponde al estado pseudoestable, y su ecuación gobernante como se menciona en el Capítulo 2 está dada por:

$$[t_D * (1/q_D)] = \frac{11}{2} \pi t_{DA} \quad (25)$$

Teniendo en cuenta que t_{DA} se encuentra dada por la Ec. (2) mencionada en el Capítulo 2.

Reemplazando los valores de la Ec. (2) en la Ec. (25) para obtener la ecuación del área de drene.

$$A = 0.140998 \sqrt{\frac{Y_E^2 \omega k t_{DLPSi}}{\phi \mu C_t}} \quad (65)$$

Intersección entre la línea de flujo radial con la línea de flujo dual lineal

Cuando la línea de la derivada del recíproco del caudal adimensional para el flujo radial infinito se intercepta con la línea de la derivada del recíproco del caudal adimensional para el régimen de flujo dual lineal, como lo muestra la Fig. 20 se pueden igualar las Ecs. (53) y (56) y se obtiene:

$$[t_D * (1/q_D)] = \frac{9 \sqrt{\pi t_D}}{8 W_D \sqrt{\omega}} = 0.5 \quad (66)$$

Seguidamente, si se reemplaza el valor de W_D dado por la Ec. (5) y de la misma forma introduciendo los valores de los términos adimensionales de las Ecs. (1) y (6) obteniendo la ecuación que define el ancho del yacimiento:

$$Y_E = 0.0648256 \sqrt{\frac{k t_{RDLi}}{\phi \mu c_t \omega}} \quad (67)$$

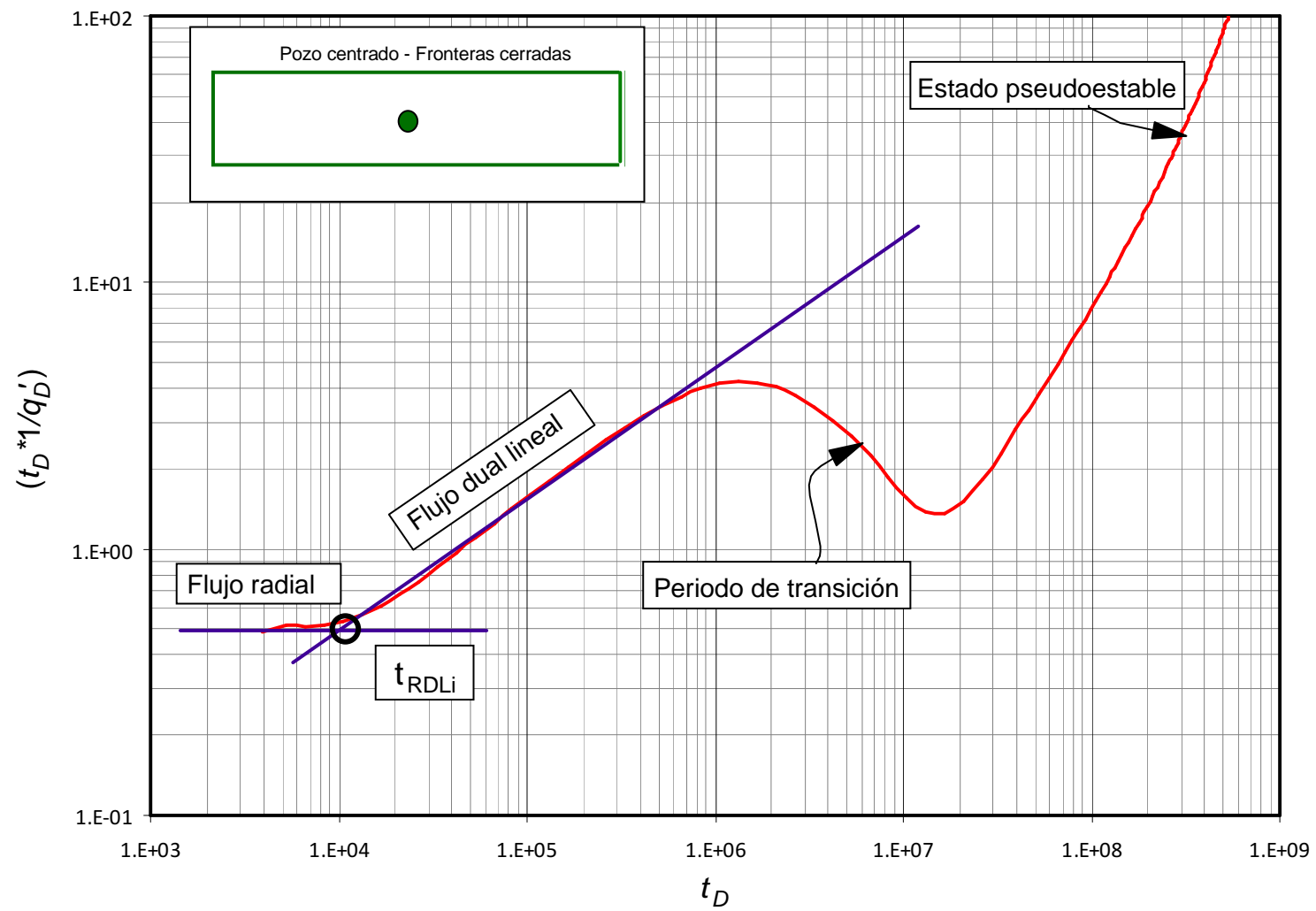


Fig. 20. Intersección entre la línea de flujo radial con la línea de flujo dual lineal.

Intersección entre la línea del estado pseudoestable con la línea de flujo radial.

Como está definido en la literatura, el flujo radial se caracteriza como una línea horizontal (Fig. 21) y cuando ésta se intercepta con la línea que representa el estado pseudoestable se tiene que la ecuación gobernante es:

$$[t_D * (1/q_D)'] = \frac{11}{2} \pi t_{DA} \quad (68)$$

Para obtener la ecuación para el área de drenaje se iguala con el valor de la derivada para el flujo radial la cual es 0.5 y de la misma forma sabiendo el valor de t_{DA} en la ecuación anterior así:

$$A = \frac{kt_{RPSSI}}{75.486 \phi \mu c_i} \quad (69)$$

El régimen de flujo lineal ocurre después del periodo de transición

Cuando el periodo de transición se presenta después del régimen de flujo radial dicho flujo se comporta como un yacimiento homogéneo como se observa en la Fig. 22.

En el Capítulo 2 se hizo el análisis completo para este flujo sin embargo se hará mención de las ecuaciones obtenidas.

$$\frac{1}{q_D} = \frac{4\pi\sqrt{t_D}}{W_D} + s_L \quad (9)$$

$$[t_D * (1/q_D)'] = \frac{2\pi\sqrt{t_D}}{W_D} \quad (10)$$

$$Y_E \sqrt{k} = \frac{14.4068B}{h\Delta P [t^* (1/q)']_L} \sqrt{\frac{\Delta t \mu}{\phi c_i}} \quad (11)$$

Para $\Delta t = 1 \text{ hr}$

$$Y_E \sqrt{k} = \frac{14.4068B}{h\Delta P [t^* (1/q)']_L} \sqrt{\frac{\mu}{\phi c_i}} \quad (12)$$

$$s_L = \left(\frac{1/q}{[t^* (1/q)']_L} - 2 \right) \frac{1}{9.8008 Y_E} \sqrt{\frac{k t_L}{\phi \mu c_i}} \quad (13)$$

El régimen de flujo lineal ocurre antes del periodo de transición

Cuando el régimen de flujo lineal se da antes del período de transición el comportamiento de dicho flujo es el de un yacimiento fracturado naturalmente el cual es el tema de este capítulo. El presente caso se muestra en la Fig. 23 donde las ecuaciones gobernantes para $1/q_D$ y la derivada de $1/q_D$ son:

$$\frac{1}{q_D} = \frac{21}{5} \frac{\sqrt{\pi t_D}}{W_D \sqrt{\omega}} + s_L \quad (70)$$

$$[t_D * (1/q_D)]' = \frac{21}{10} \frac{\sqrt{\pi t_D}}{W_D \sqrt{\omega}} \quad (71)$$

Siguiendo el procedimiento realizado en la sección 3.2.1.1. se obtienen las ecuaciones:

$$Y_E = \frac{42.480763 B}{h \Delta P [t * (1/q)]'_L} \sqrt{\frac{\mu t_{DL}}{k \phi c_t \omega}} \quad (72)$$

$$s_L = \left(\frac{1/q}{[t * (1/q)]'_L} - 2 \right) \frac{1}{29.32416 Y_E} \sqrt{\frac{k t_{DL}}{\phi \pi c_t \omega}} \quad (73)$$

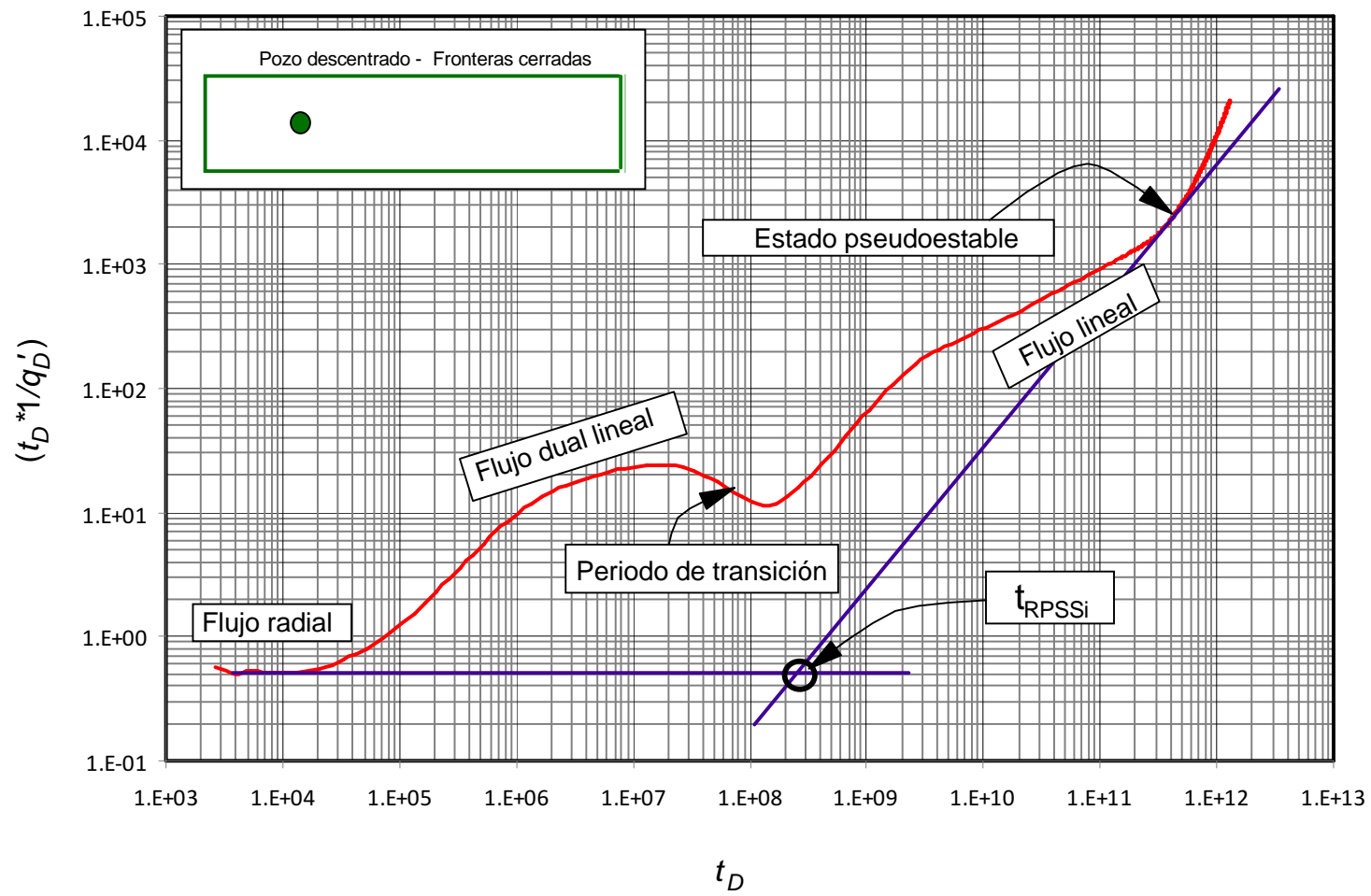


Fig. 21. Intersección entre la línea de flujo radial con la línea de estado pseudoestable.

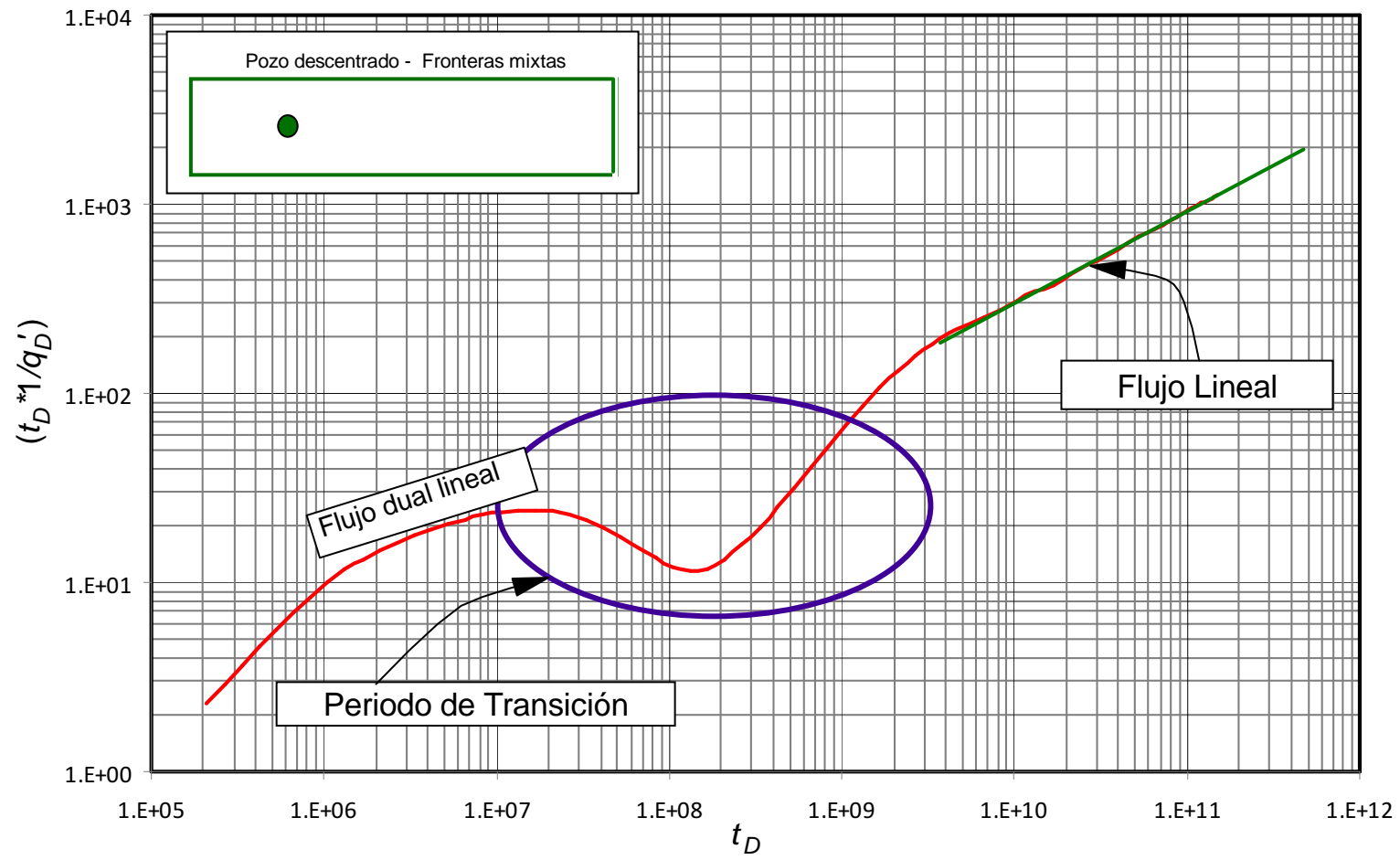


Fig. 22. Flujo lineal después del periodo de transición

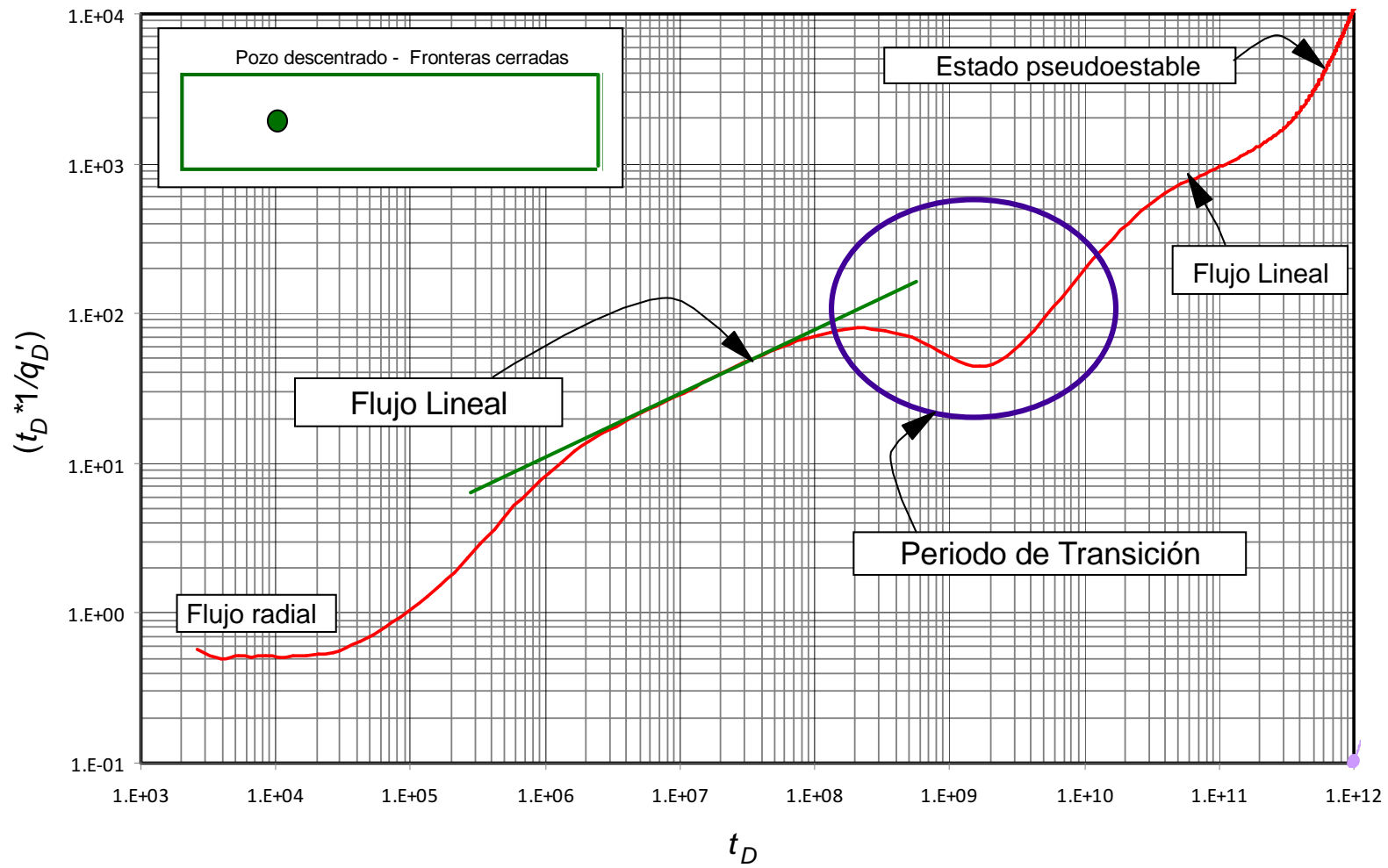


Fig. 23. Flujo lineal antes del periodo de transición

Como se muestra en la Fig. 24 el punto máximo se presenta durante el régimen de flujo lineal donde éste está interrumpido por el periodo de transición el cual es útil para estimar el valor del parámetro de flujo interporoso. Siguiendo el procedimiento de la sección 2.3.1.3. se obtienen las siguiente ecuaciones:

$$\sqrt{\lambda} [t_D * (1/q_D)']_{\max} = 0.000746 \quad (74)$$

De donde se despeja λ :

$$\lambda = \left[\frac{0.105335 \mu B}{kh \Delta P [t * (1/q)']_{\max}} \right]^2 \quad (75)$$

La lectura de los puntos mínimos se realiza a partir de la Fig. 25. Posteriormente se realiza el mismo procedimiento de la sección 3.2.1.4. para hallar la correlación más representativa utilizando el programa especializado Table Curve 3D.

Para este caso la correlación obtenida es:

$$\omega = \frac{a + b \ln \lambda + c \ln \lambda^2 + d (t_D * 1/q_D')_{\min} + e (t_D * 1/q_D')_{\min}^2 + f (t_D * 1/q_D')_{\min}^3}{1 + g \ln \lambda + h (t_D * 1/q_D')_{\min} + i (t_D * 1/q_D')_{\min}^2 + j (t_D * 1/q_D')_{\min}^3}$$

$$a = 0.14646803$$

$$b = 0.013342717$$

$$c = 0.00030434555$$

$$d = -0.00026701191$$

$$e = 2.4497641 \times 10^{-6}$$

$$f = -9.2559594 \times 10^{-9}$$

$$g = 0.049793248$$

$$h = 0.0021617165$$

$$i = -8.3473003 \times 10^{-6}$$

$$j = 8.9505062 \times 10^{-9}$$

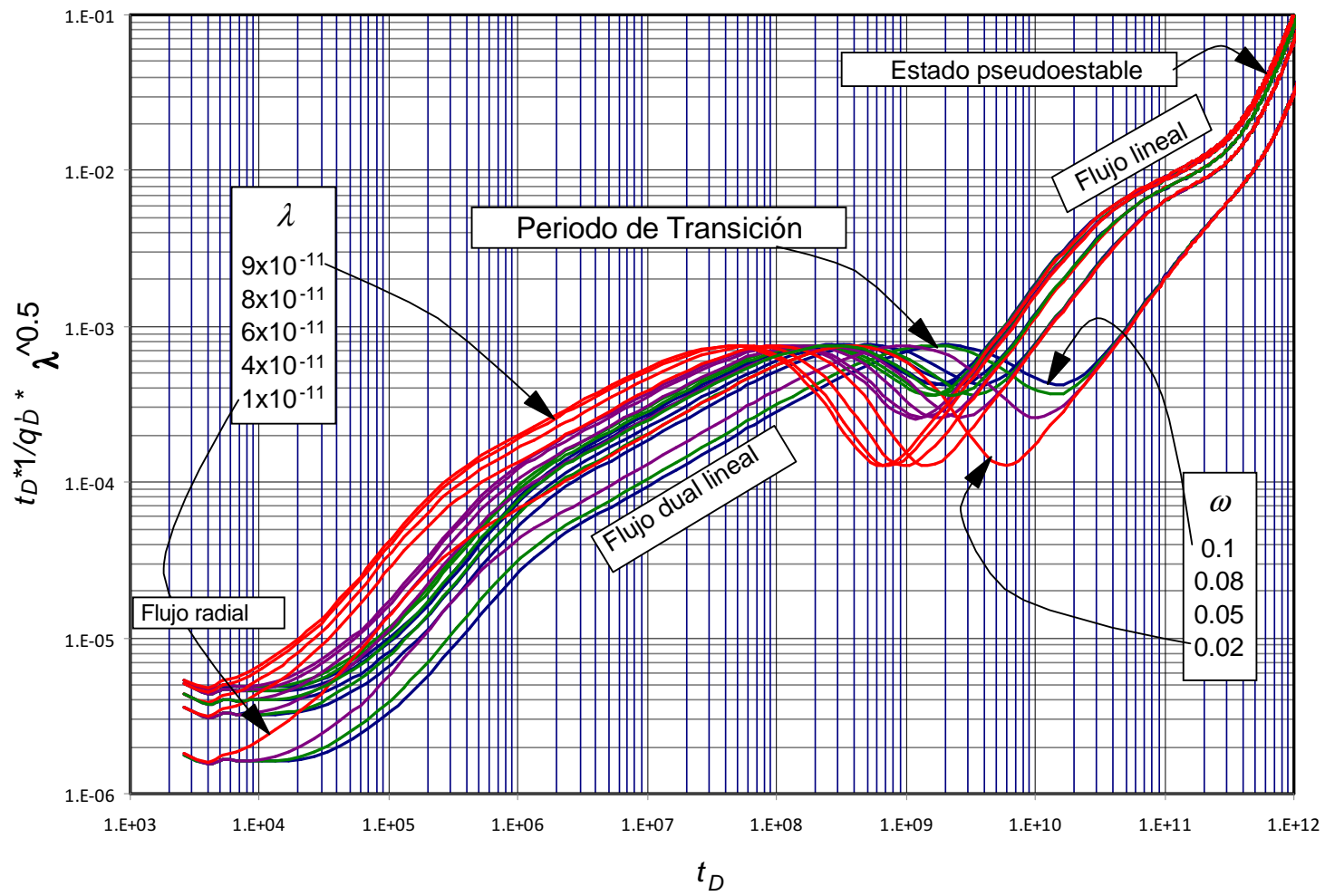


Fig. 24. Efecto de λ sobre la derivada del recíproco del caudal adimensional durante el flujo lineal

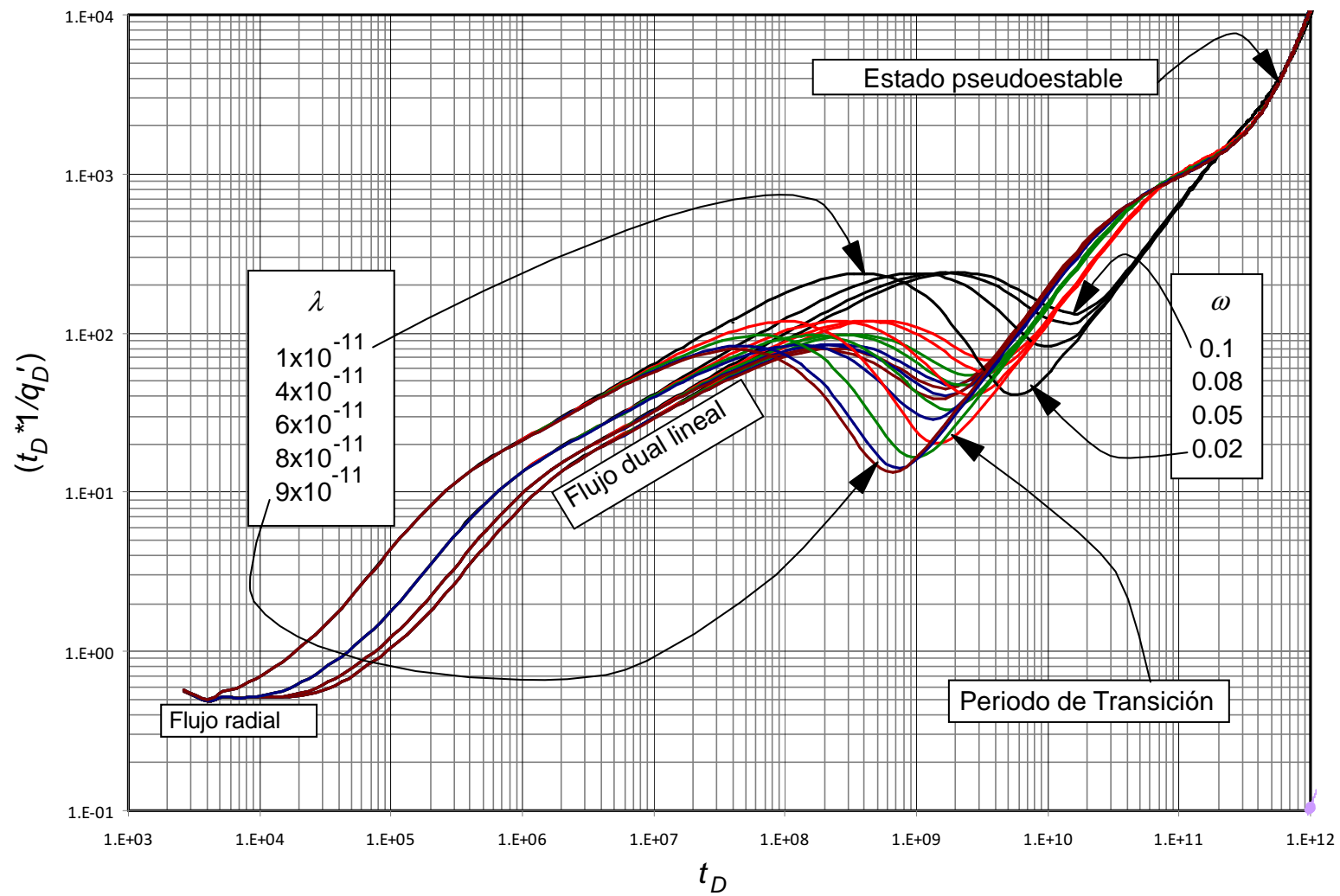


Fig. 25. Efecto de ω y λ sobre la derivada del recíproco del caudal adimensional durante el flujo lineal

Líneas de pendiente unitaria durante el periodo de transición

Cuando el periodo de transición tiene lugar durante el régimen de flujo dual lineal, las fisuras son afectadas por la matriz bajo el estado pseudoestable (Fig. 26)

$$\ln[t_D * (1/q_D)]_{PV} = a + b(\ln \lambda)^2 + c(\ln \lambda) + \frac{d}{\ln(\lambda)} + \frac{e}{(\lambda)^{0.5}} + f(\ln t_D)^2 + g(\ln t_D) + \frac{h}{\ln(t_D)} + \frac{i}{(t_D)^{0.5}}$$

Las constantes correspondientes son:

$$a = 2342.0479$$

$$b = 6.0411895$$

$$c = 322.83587$$

$$d = 34942.473$$

$$e = -0.00060499694$$

$$f = -2.2990566$$

$$g = 154.39236$$

$$h = 26031.429$$

$$i = -162619.25$$

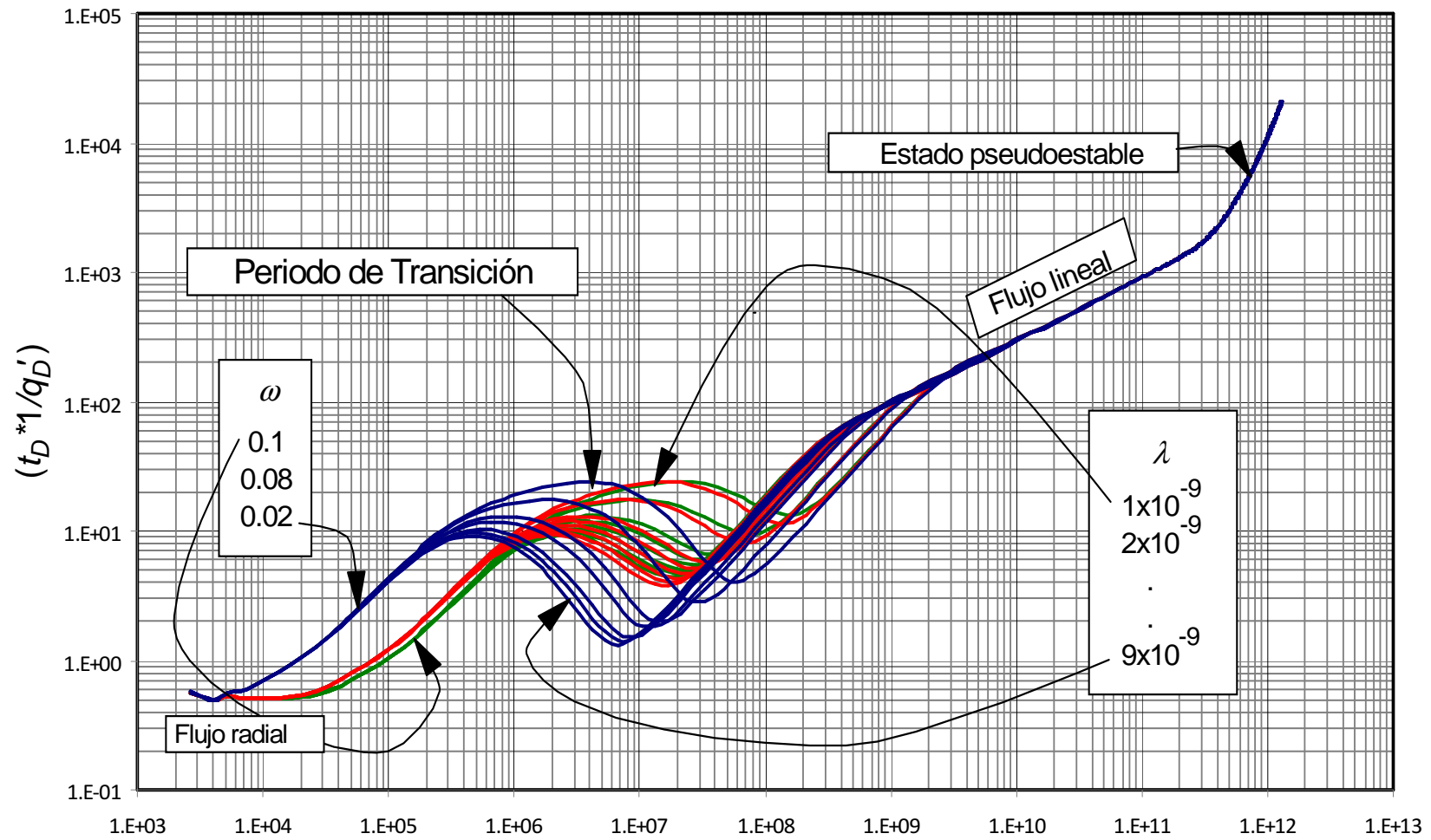


Fig. 26. Periodo de transición durante el régimen de flujo dual lineal

CAPITULO 4. APLICACIONES

4.1. EJEMPLO 1 SIMULADO (YACIMIENTO HOMOGÉNEO)

Se simuló una prueba de caudal en un pozo ubicado cerca a una frontera abierta dentro de un yacimiento rectangular (Ver Cuadro 3) con los siguientes datos:

| | | | |
|--|----------------|---------------|------------------|
| $\Delta P = 5000$ psi | $\mu = 2$ cp | $\phi = 20$ % | $B = 1.2$ rb/STB |
| $c_t = 1 \times 10^{-6}$ psi ⁻¹ | $r_w = 0.5$ ft | $h = 100$ ft | $X_E = 4000$ ft |
| $Y_E = 500$ ft | $k = 50$ md | | |

- 1) Estime la permeabilidad del flujo radial
- 2) Determine el largo y ancho del yacimiento
- 3) Determine la distancia del pozo a la frontera

- De la Fig. 27 se obtienen los siguientes datos:

| | | |
|---|----------------------|--|
| $(t^*1/q')_r = 6.94 \times 10^{-6}$ D/STB | $t_{DL} = 5.0357$ hr | $(t^*1/q')_{DL} = 2.43 \times 10^{-5}$ |
| $t_{RDLi} = 0.5035$ hr | $t_{DLPBi} = 16$ hr | $t_{RPBi} = 600$ hr |
| $t_{DLSSi} = 25$ hr | $t_{RSSi} = 165$ hr | |

Se obtiene la permeabilidad del flujo radial de la Ec. (55)

$$k = \frac{70.6\mu B}{h\Delta P[t^*(1/q')]_r} = \frac{70.6(2)(1.2)}{100(5000)(6.94 \times 10^{-6})} = 48.8299 \text{ md}$$

Este resultado es muy cercano al valor usado en la simulación de 50 md.

De la Ec. (31) se determina el ancho del yacimiento:

$$Y_E = 0.07195 \sqrt{\frac{kt_{RDLi}}{\phi\mu c_t}} = 0.07195 \sqrt{\frac{(48.8299)(0.5035)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}} = 564.0835 \text{ ft}$$

Se verifica Y_E con la Ec. (16)

$$Y_E = \frac{5.0801B}{h\Delta P[t^*(1/q')]_{DL} \sqrt{k}} \sqrt{\frac{\Delta t_{DL}\mu}{\phi c_t}} = \frac{5.0801(1.2)}{(100)(5000)(2.43 \times 10^{-5})(\sqrt{48.8299})} \sqrt{\frac{(2)(5.0357)}{(0.2)(1 \times 10^{-6})}}$$

$$Y_E = 509.5235 \text{ ft}$$

Con las Ec. (35 y 36) se determina la distancia del pozo a la frontera:

$$b_x = \frac{1}{38.9470} \sqrt{\left(\frac{kt_{DLPBi}}{\phi\mu c_t}\right)} = \frac{1}{38.9470} \sqrt{\left(\frac{(50)(16)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}\right)} = 1148.2619 \text{ ft}$$

$$b_x = \sqrt{\frac{Y_E}{109.2242} \left(\frac{kt_{RPBi}}{\phi\mu c_t}\right)^{0.5}} = \sqrt{\frac{500}{109.2242} \left(\frac{(50)(600)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}\right)^{0.5}} = 1119.67 \text{ ft}$$

Los valores de b_x obtenidos en las anteriores ecuaciones no son muy cercanos al valor al valor verdadero $b_x = 1000$ ft, puesto que el flujo parabólico no se presenta con mucha claridad en la gráfica.

Con la línea de pendiente -1 formada en el flujo estable se determinan los valores de largo del yacimiento X_E y se verifican con las dos ecuaciones de corte con el flujo dual lineal y radial.

$$X_E^3 = \frac{1}{1.33 \times 10^9} \left(\frac{kt_{DLSSi}}{\phi\mu c_t}\right)^3 \frac{1}{b_x^3} = \left(\frac{1}{1.33 \times 10^9}\right) \left(\frac{(50)(25)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}\right)^3 \left(\frac{1}{(1000)^3}\right)$$

$$X_E = 4678.54 \text{ ft}$$

$$X_E^3 = \frac{1}{1.74 \times 10^6} \left(\frac{kt_{RSSi}}{\phi\mu c_t}\right)^2 \frac{Y_E^2}{b_x^3} = \left(\frac{1}{1.74 \times 10^6}\right) \left(\frac{(50)(165)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}\right)^2 \left(\frac{(500)^2}{(1000)^3}\right)$$

$$X_E = 3939.06 \text{ ft}$$

Estos valores obtenidos son relativamente cercanos al dato de entrada para la simulación de $X_E = 4000$ ft.

Se calcula el daño del flujo radial de la Ec. (56)

$$s = 0.5 \left[\frac{1/q_r}{[t^*(1/q)]_r} - \ln \left(\frac{kt_r}{\phi\mu c_t r_w^2} \right) + 7.43 \right]$$

$$s = 0.5 \left[\frac{(7.88 \times 10^{-5})}{(6.93 \times 10^{-6})} - \ln \left(\frac{(50)(0.2)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})(0.5^2)} \right) + 7.43 \right] = 0.190085$$

Se determina el daño por la convergencia del flujo parabólico a dual lineal Ec. (22) y de flujo dual lineal a radial Ec. (18).

$$s_{DL} = \left(\frac{1/q}{[t^*(1/q)]'_{DL}} - 2 \right) \frac{1}{27.7945 Y_E} \sqrt{\frac{kt_{DL}}{\phi \mu c_t}}$$

$$s_{DL} = \left(\frac{1.17 \times 10^{-4}}{2.43 \times 10^{-5}} - 2 \right) \frac{1}{27.7945(509.5235)} \sqrt{\frac{(48.8299)(5.035)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}} = 4.926$$

$$s_{PB} = \left(\frac{1/q}{[t^*(1/q)]'_{PB}} + 2 \right) \frac{54.5745 b_x}{Y_E} \sqrt{\frac{\phi \mu c_t}{kt_{PB}}}$$

$$s_{PB} = \left(\frac{1.88 \times 10^{-4}}{2.43 \times 10^{-5}} + 2 \right) \frac{54.5745(1000)}{(509.5235)} \sqrt{\frac{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}{(48.8299)(50.357)}} = 0.01329$$

El daño total es la sumatoria de todos los daños

$$s_t = s_r + s_{SDL} + s_{PB}$$

$$s_t = 0.190085 + 4.926 + 0.01329 = 5.12$$

| t , hr | $1/q$, D/STB | $(t^*1/q)'$, D/STB |
|----------|---------------|---------------------|
| 0.020000 | 6.29E-05 | 7.59E-06 |
| 0.030000 | 6.57E-05 | 6.56E-06 |
| 0.040000 | 6.77E-05 | 7.00E-06 |
| 0.050357 | 6.92E-05 | 6.86E-06 |
| 0.063396 | 7.08E-05 | 6.92E-06 |
| 0.079810 | 7.24E-05 | 6.91E-06 |
| 0.100475 | 7.40E-05 | 6.92E-06 |
| 0.126491 | 7.56E-05 | 6.93E-06 |
| 0.159243 | 7.72E-05 | 6.94E-06 |
| 0.200475 | 7.88E-05 | 6.93E-06 |
| 0.252383 | 8.04E-05 | 6.94E-06 |
| 0.317731 | 8.20E-05 | 6.99E-06 |
| 0.400000 | 8.36E-05 | 7.15E-06 |
| 0.503570 | 8.53E-05 | 7.46E-06 |

| | | |
|------------|----------|----------|
| 0.633957 | 8.71E-05 | 8.00E-06 |
| 0.798105 | 8.90E-05 | 8.80E-06 |
| 1.004755 | 9.12E-05 | 9.85E-06 |
| 1.264911 | 9.36E-05 | 1.11E-05 |
| 1.592429 | 9.63E-05 | 1.27E-05 |
| 2.004749 | 9.94E-05 | 1.44E-05 |
| 2.523829 | 1.03E-04 | 1.64E-05 |
| 3.177313 | 1.07E-04 | 1.88E-05 |
| 4.000000 | 1.12E-04 | 2.14E-05 |
| 5.035702 | 1.17E-04 | 2.43E-05 |
| 6.339573 | 1.23E-04 | 2.75E-05 |
| 7.981049 | 1.30E-04 | 3.05E-05 |
| 10.047546 | 1.37E-04 | 3.30E-05 |
| 12.649111 | 1.45E-04 | 3.46E-05 |
| 15.924287 | 1.53E-04 | 3.49E-05 |
| 20.047489 | 1.61E-04 | 3.41E-05 |
| 25.238294 | 1.68E-04 | 3.24E-05 |
| 31.773129 | 1.76E-04 | 3.00E-05 |
| 40.000000 | 1.82E-04 | 2.74E-05 |
| 50.357016 | 1.88E-04 | 2.43E-05 |
| 63.395728 | 1.93E-04 | 2.05E-05 |
| 79.810493 | 1.97E-04 | 1.61E-05 |
| 100.475457 | 2.01E-04 | 1.13E-05 |
| 126.491106 | 2.03E-04 | 6.99E-06 |
| 159.242868 | 2.04E-04 | 3.63E-06 |
| 200.474894 | 2.05E-04 | 1.48E-06 |
| 252.382938 | 2.05E-04 | 3.70E-07 |
| 317.731294 | 2.05E-04 | 5.74E-08 |

Cuadro 3. Datos del recíproco del caudal y la derivada del recíproco del caudal para el ejemplo simulado (yacimientos homogéneos)

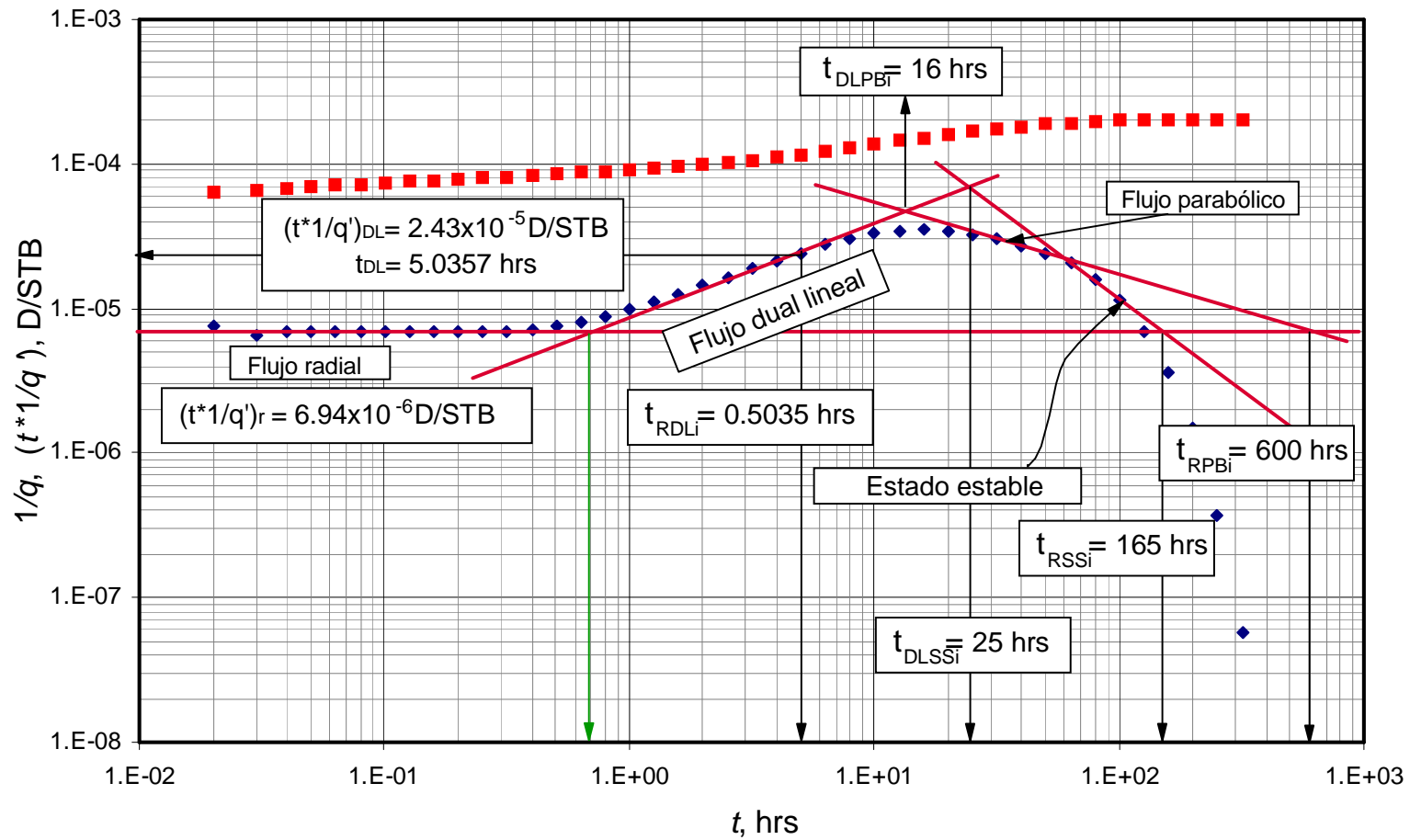


Fig. 27. Gráfico log-log del recíproco del caudal y derivada del recíproco del caudal para prueba simulada 1

4.2. EJEMPLO 2 SIMULADO (YACIMIENTO HOMOGÉNEO)

Se tiene una prueba de caudal en un pozo dentro de un yacimiento cerrado rectangular, (Ver Cuadro 5) Con los siguientes datos:

$$\begin{array}{llll} \Delta P = 5000 \text{ psi} & \mu = 2 \text{ cp} & \phi = 20 \% & B = 1.2 \text{ rb/STB} \\ c_t = 1 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1} & r_w = 0.5 \text{ ft} & h = 100 \text{ ft} & X_E = 16000 \text{ ft} \\ Y_E = 500 \text{ ft} & k = 50 \text{ md} & & \end{array}$$

- 1) Estime la permeabilidad del flujo radial
- 2) Determine el largo y ancho del yacimiento

De la Fig. 29 se obtienen los siguientes datos:

$$\begin{array}{lll} (t^* I/q')_r = 6.93 \times 10^{-6} \text{ D/STB} & t_{DL} = 10.04 \text{ hr} & t_{DLPSSi} = 165 \text{ hr} \\ (t^* I/q')_{DL} = 3.62 \times 10^{-5} \text{ D/STB} & t_L = 400 \text{ hr} & t_{LPSSi} = 1500 \text{ hr} \\ (t^* I/q')_L = 7.04 \times 10^{-4} \text{ D/STB} & t_{RPSSi} = 7.5 \text{ hr} & t_{RDLi} = 0.4 \text{ hr} \\ t_{RLi} = 0.035 \text{ hr} & & \end{array}$$

Se obtiene la permeabilidad del flujo radial de la Ec. (55)

$$k = \frac{70.6\mu B}{h\Delta P [t^* (I/q')]_r} = \frac{70.6(2)(1.2)}{100(5000)(6.93 \times 10^{-6})} = 48.9004 \text{ md}$$

De la Ec. (16) se determina el ancho del yacimiento Y_E :

$$Y_E = \frac{5.0801B}{h\Delta P [t^* (I/q')]_{DL} \sqrt{k}} \sqrt{\frac{\Delta t_{DL} \mu}{\phi c_t}} = \frac{5.0801(1.2)}{(100)(5000)(3.62 \times 10^{-5})(\sqrt{48.9004})} \sqrt{\frac{(2)(10.04)}{(0.2)(1 \times 10^{-6})}}$$

$$Y_E = 482.5980 \text{ ft}$$

Se verifica el dato obtenido en la anterior ecuación con las siguientes ecuaciones:

La Ec. (11) relaciona cualquier punto sobre el flujo lineal

$$Y_E = \frac{14.4068B}{h\Delta P [t^* (I/q')]_L \sqrt{k}} \sqrt{\frac{\Delta t \mu}{\phi c_t}} = \frac{14.4068(1.2)}{(100)(5000)(7.04 \times 10^{-4})(\sqrt{48.9004})} \sqrt{\frac{(2)(400)}{(0.2)(1 \times 10^{-6})}}$$

$$Y_E = 444.2013 \text{ ft}$$

La Ec. (31) relaciona el punto de intersección entre el flujo radial y dual lineal.

$$Y_E = 0.07195 \sqrt{\frac{kt_{RDLi}}{\phi\mu c_t}} = 0.07195 \sqrt{\frac{(48.9004)(0.4)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}} = 503.13 \text{ ft}$$

La Ec. (33) relaciona el punto de intersección entre el flujo radial y lineal.

$$Y_E = 0.2040 \sqrt{\frac{kt_{RLi}}{\phi\mu c_t}} = 0.2040 \sqrt{\frac{(48.9004)(0.035)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}} = 421.9785 \text{ ft}$$

De la (Ec. 26) se determina el área del yacimiento A:

$$A = \sqrt{\frac{kt_{DLPSS} Y_E^2}{62.3221\phi\mu c_t}} = \sqrt{\frac{(48.9004)(165)(500^2)}{62.3221(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}} = 8995330.969 \text{ ft}$$

Se verifica el dato obtenido en la anterior ecuación con las siguientes ecuaciones:

La Ec. (27) relaciona la intersección entre el flujo lineal y pseudo estable.

$$A = \sqrt{\frac{kt_{LPSS} Y_E^2}{501.2252\phi\mu c_t}} = \sqrt{\frac{(48.9004)(1500)(500^2)}{501.2252(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}} = 9563687.90 \text{ ft}$$

La Ec. (28) relaciona la intersección entre el flujo radial y pseudo estable.

$$A = \frac{kt_{RPSSI}}{109.7355\phi\mu c_t} = \frac{(48.9004)(7.5)}{109.7355(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})} = 8355386.361 \text{ ft}$$

Se calcula el daño del flujo radial de la Ec. (56)

$$s_r = 0.5 \left[\frac{1/q_r}{[t^*(1/q)]_r} - \ln \left(\frac{kt_r}{\phi\mu c_t r_w^2} \right) + 7.43 \right]$$

$$s_r = 0.5 \left[\frac{(7.72 \times 10^{-5})}{(6.94 \times 10^{-6})} - \ln \left(\frac{(50)(0.1592)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})(0.5^2)} \right) + 7.43 \right] = 0.1806$$

Se determina el daño por la convergencia del flujo lineal a dual lineal, Ec. (39), y de flujo dual lineal a radial Ec. (44).

$$s_{DL} = \left(\frac{1/q}{[t * (1/q)]_{DL}} - 2 \right) \frac{1}{27.7945 Y_E} \sqrt{\frac{kt_{DL}}{\phi \mu c_t}}$$

$$s_{DL} = \left(\frac{1.38 \times 10^{-4}}{3.62 \times 10^{-5}} - 2 \right) \frac{1}{27.7945(503.13)} \sqrt{\frac{(48.9004)(10.04)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}} = 4.5398$$

$$s_L = \left(\frac{1/q}{[t * (1/q)]_L} - 2 \right) \frac{1}{9.8008 Y_E} \sqrt{\frac{kt_L}{\phi \mu c_t}}$$

$$s_L = \left(\frac{1.04 \times 10^{-3}}{7.04 * 10^{-4}} - 2 \right) \frac{1}{9.8008(503.13)} \sqrt{\frac{(48.9004)(400)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}} = -23.4417$$

El daño total es la sumatoria de todos los daños

$$s_t = s_r + s_{SDL} + s_L$$

$$s_t = 0.1806 + 4.5398 - 23.44 = -18.71$$

| <i>t</i> , hr | 1/ <i>q</i> , D/STB | (<i>t</i> *1/ <i>q</i>), D/STB |
|---------------|---------------------|----------------------------------|
| 0.020000 | 6.29E-05 | 7.59E-06 |
| 0.030000 | 6.57E-05 | 6.56E-06 |
| 0.040000 | 6.77E-05 | 7.00E-06 |
| 0.050357 | 6.92E-05 | 6.86E-06 |
| 0.063396 | 7.08E-05 | 6.92E-06 |
| 0.079810 | 7.24E-05 | 6.91E-06 |
| 0.100475 | 7.40E-05 | 6.92E-06 |
| 0.126491 | 7.56E-05 | 6.93E-06 |
| 0.159243 | 7.72E-05 | 6.94E-06 |
| 0.200475 | 7.88E-05 | 6.93E-06 |
| 0.252383 | 8.04E-05 | 6.94E-06 |
| 0.317731 | 8.20E-05 | 6.99E-06 |
| 0.400000 | 8.36E-05 | 7.15E-06 |
| 0.503570 | 8.53E-05 | 7.46E-06 |
| 0.633957 | 8.71E-05 | 8.00E-06 |
| 0.798105 | 8.90E-05 | 8.80E-06 |
| 1.004755 | 9.12E-05 | 9.85E-06 |
| 1.264911 | 9.36E-05 | 1.11E-05 |
| 1.592429 | 9.63E-05 | 1.27E-05 |

| | | |
|-------------|----------|----------|
| 2.004749 | 9.94E-05 | 1.44E-05 |
| 2.523829 | 1.03E-04 | 1.65E-05 |
| 3.177313 | 1.07E-04 | 1.88E-05 |
| 4.000000 | 1.12E-04 | 2.14E-05 |
| 5.035702 | 1.17E-04 | 2.44E-05 |
| 6.339573 | 1.23E-04 | 2.78E-05 |
| 7.981049 | 1.30E-04 | 3.17E-05 |
| 10.047546 | 1.38E-04 | 3.62E-05 |
| 12.649111 | 1.46E-04 | 4.13E-05 |
| 15.924287 | 1.57E-04 | 4.71E-05 |
| 20.047489 | 1.68E-04 | 5.40E-05 |
| 25.238294 | 1.82E-04 | 6.26E-05 |
| 31.773129 | 1.97E-04 | 7.41E-05 |
| 40.000000 | 2.16E-04 | 9.01E-05 |
| 50.357016 | 2.39E-04 | 1.13E-04 |
| 63.395728 | 2.69E-04 | 1.45E-04 |
| 79.810493 | 3.07E-04 | 1.89E-04 |
| 100.475457 | 3.57E-04 | 2.48E-04 |
| 126.491106 | 4.22E-04 | 3.23E-04 |
| 159.242868 | 5.07E-04 | 4.13E-04 |
| 200.474894 | 6.13E-04 | 5.07E-04 |
| 252.382938 | 7.40E-04 | 5.94E-04 |
| 317.731294 | 8.85E-04 | 6.60E-04 |
| 400.000000 | 1.04E-03 | 7.04E-04 |
| 503.570165 | 1.21E-03 | 7.36E-04 |
| 633.957277 | 1.38E-03 | 7.76E-04 |
| 798.104926 | 1.57E-03 | 8.43E-04 |
| 1004.754573 | 1.77E-03 | 9.63E-04 |
| 1264.911064 | 2.02E-03 | 1.18E-03 |
| 1592.428682 | 2.33E-03 | 1.56E-03 |
| 2004.748935 | 2.76E-03 | 2.22E-03 |
| 2504.748935 | 3.36E-03 | 3.31E-03 |
| 3004.748935 | 4.09E-03 | 4.80E-03 |
| 3504.748935 | 4.97E-03 | 6.75E-03 |
| 4004.748935 | 6.03E-03 | 9.31E-03 |
| 4504.748935 | 7.31E-03 | 1.26E-02 |
| 5004.748935 | 8.85E-03 | 1.69E-02 |

Cuadro 4. Datos del recíproco del caudal y la derivada del recíproco del caudal para prueba simulada 2

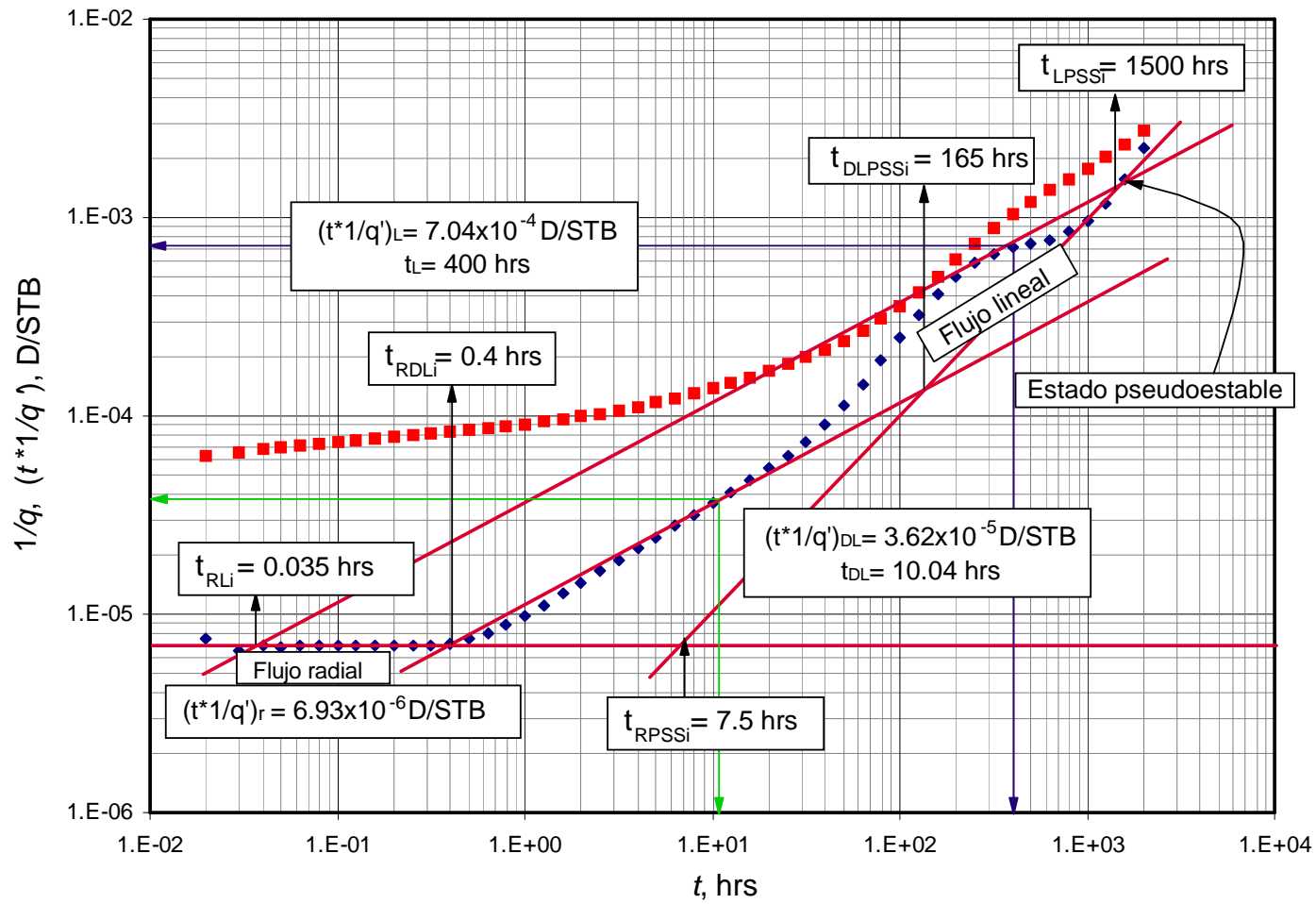


Fig. 28. Gráfico log-log del recíproco del caudal y derivada del recíproco del caudal para prueba simulada 2

4.3. EJEMPLO 3 SIMULADO (YACIMIENTO HOMOGÉNEO)

Se realizó una prueba de caudal en un pozo ubicado cerca a una frontera abierta dentro de un yacimiento rectangular con sus fronteras paralelas mixtas (Ver Cuadro 5) con los siguientes datos:

$$\begin{array}{llll} \Delta P = 5000 \text{ psi} & \mu = 2 \text{ cp} & \phi = 20 \% & B = 1.2 \text{ rb/STB} \\ c_i = 1 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1} & r_w = 0.5 \text{ ft} & h = 100 \text{ ft} & X_E = 16000 \text{ ft} \\ Y_E = 500 \text{ ft} & k = 50 \text{ md} & & \end{array}$$

- 1) Estime la permeabilidad del flujo radial
- 2) Determine el largo y ancho del yacimiento
- 3) Determine la distancia del pozo a la frontera

De la Fig. 30 se obtienen los siguientes datos:

$$\begin{array}{lll} (t^*1/q')_r = 6.92 \times 10^{-6} & t_{DL} = 20.04 \text{ hr} & (t^*1/q')_{DL} = 5.37 \times 10^{-5} \\ t_{RDLi} = 0.35 \text{ hr} & (t^*1/q')_{X1} = 7.14 \times 10^{-5} & t_{X1} = 50.35 \text{ hr} \\ t_{DLPBi} = 50.4 \text{ hr} & t_{RPBi} = 6004.8 \text{ hr} & t_{DLSSi} = 503 \text{ hr} \\ t_{RSSi} = 17000 \text{ hr} & (t^*1/q')_{X2} = 3.11 \times 10^{-5} & t_{X2} = 3004.74 \text{ hr} \end{array}$$

Se obtiene la permeabilidad del flujo radial de la Ec. (55).

$$k = \frac{70.6\mu B}{h\Delta P [t^*(1/q')]_r} = \frac{70.6(2)(1.2)}{100(5000)(6.92 \times 10^{-6})} = 48.9710 \text{ md}$$

Este resultado es muy cercano al valor dado en la simulación de 50 md.

De la Ec. (16) se determina el ancho del yacimiento.

$$Y_E = \frac{5.0801B}{h\Delta P [t^*(1/q')]_{DL} \sqrt{k}} \sqrt{\frac{\Delta t_{DL}\mu}{\phi c_i}} = \frac{5.0801(1.2)}{(100)(5000)(5.37 \times 10^{-5})(\sqrt{48.9710})} \sqrt{\frac{(2)(20.04)}{(0.2)(1 \times 10^{-6})}}$$

$$Y_E = 459.2916 \text{ ft}$$

Se determina el valor de b_x y se verifica con las dos Ecs. (50) y (51) para el primer punto máximo X_1 .

$$b_x = \left(\frac{1}{55.58} \right) \sqrt{\left(\frac{kt_{X1}}{\phi \mu c_i} \right)} = \left(\frac{1}{55.58} \right) \left(\sqrt{\frac{(50)(50.35)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}} \right) = 1427.3688 \text{ ft}$$

$$b_x = \frac{khY_E \Delta P [t_D^* (1/q_D)']_{x1}}{159.327 \mu B} = \frac{(50)(100)(500)(5000)(7.14 \times 10^{-5})}{159.327(2)(1.2)} = 2334.0362 \text{ ft}$$

Los valores de b_x obtenidos en las anteriores ecuaciones son relativamente cercanos al valor al valor verdadero $b_x = 2000$ ft.

Con la línea de pendiente -1 formada en el flujo estable se determinan los valores de largo del yacimiento X_E y se verifican con las dos ecuaciones de corte con el flujo dual lineal y radial.

$$X_E^3 = \frac{1}{9.02 \times 10^9} \left(\frac{kt_{DLSSi}}{\phi \mu c_t} \right)^3 \frac{1}{b_x^3} = \left(\frac{1}{9.02 \times 10^9} \right) \left(\frac{(50)(503)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})} \right)^3 \left(\frac{1}{(2000)^3} \right)$$

$$X_E = 15102.39 \text{ ft}$$

$$X_E^3 = \frac{1}{4.66 \times 10^7} \left(\frac{kt_{RSSi}}{\phi \mu c_t} \right)^2 \frac{Y_E^2}{b_x^3} = \left(\frac{1}{4.66 \times 10^7} \right) \left(\frac{(50)(17000)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})} \right)^2 \left(\frac{(500)^2}{(2000)^3} \right)$$

$$X_E = 14467.51 \text{ ft}$$

Se verifica el ancho del yacimiento con el segundo punto maximo:

$$X_E = 637.3 \left(\frac{b_x^2}{Y_E} \right) \left(\frac{\mu B}{\Delta P kh} \right) \left(\frac{1}{[t_D^* (1/q_D)']_{x2}} \right) = 637.3 \left(\frac{2000^2}{500} \right) \left(\frac{(2)(1.2)}{(5000)(50)(100)} \right) \left(\frac{1}{3.11 \times 10^{-5}} \right)$$

$$X_E = 15737.8263 \text{ ft}$$

Estos valores obtenidos son relativamente cercanos al dato simulado de $X_E = 16000$ ft.

Se calcula el daño del flujo radial de la Ec. (56):

$$s = 0.5 \left[\frac{1/q_r}{[t^*(1/q)']_r} - \ln \left(\frac{kt_r}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 7.43 \right]$$

$$s = 0.5 \left[\frac{(7.08 \times 10^{-5})}{(6.92 \times 10^{-6})} - \ln \left(\frac{(50)(0.063)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})(0.5^2)} \right) + 7.43 \right] = 1.35$$

Se determina el daño por la convergencia del flujo pseudo hemisferico a dual lineal Ec. (22) y de flujo dua lineal a radial Ec. (18).

$$s_{DL} = \left(\frac{1/q}{[t^*(1/q)']_{DL}} - 2 \right) \frac{1}{27.7945 Y_E} \sqrt{\frac{kt_{DL}}{\phi \mu c_t}}$$

$$s_{DL} = \left(\frac{1.68 \times 10^{-4}}{5.37 \times 10^{-5}} - 2 \right) \frac{1}{27.7945(500)} \sqrt{\frac{(50)(20.04)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}} = 4.064$$

$$s_{PB} = \left(\frac{1/q}{[t^*(1/q)']_{PB}} + 2 \right) \frac{54.5745 b_x}{Y_E} \sqrt{\frac{\phi \mu c_t}{kt_{PB}}}$$

$$s_{PB} = \left(\frac{2.87 \times 10^{-4}}{5.41 \times 10^{-5}} + 2 \right) \frac{54.5745(2000)}{(500)} \sqrt{\frac{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}{(50)(126.49)}} = 0.0126$$

El daño total es la sumatoria de todos los daños

$$s_t = s_r + s_{DL} + s_{PB}$$

$$s_t = 1.35 + 4.064 + 0.0126 = 5.426$$

| t,hr | 1/q, D/STB | t*(1/q)' |
|------------|------------|----------|
| 0.01 | 5.81E-05 | 0 |
| 0.02 | 6.29E-05 | 7.59E-06 |
| 0.03 | 6.57E-05 | 6.56E-06 |
| 0.04 | 6.77E-05 | 7.00E-06 |
| 0.05035702 | 6.92E-05 | 6.86E-06 |
| 0.06339573 | 7.08E-05 | 6.92E-06 |
| 0.07981049 | 7.24E-05 | 6.91E-06 |
| 0.10047546 | 7.40E-05 | 6.92E-06 |
| 0.12649111 | 7.56E-05 | 6.93E-06 |
| 0.15924287 | 7.72E-05 | 6.94E-06 |
| 0.20047489 | 7.88E-05 | 6.93E-06 |
| 0.25238294 | 8.04E-05 | 6.94E-06 |
| 0.31773129 | 8.20E-05 | 6.99E-06 |
| 0.4 | 8.36E-05 | 7.15E-06 |
| 0.50357017 | 8.53E-05 | 7.46E-06 |
| 0.63395728 | 8.71E-05 | 8.00E-06 |
| 0.79810493 | 8.90E-05 | 8.80E-06 |
| 1.00475457 | 9.12E-05 | 9.85E-06 |

| | | |
|------------|----------|----------|
| 1.26491106 | 9.36E-05 | 1.11E-05 |
| 1.59242868 | 9.63E-05 | 1.27E-05 |
| 2.00474894 | 9.94E-05 | 1.44E-05 |
| 2.52382938 | 1.03E-04 | 1.65E-05 |
| 3.17731294 | 1.07E-04 | 1.88E-05 |
| 4 | 1.12E-04 | 2.14E-05 |
| 5.03570165 | 1.17E-04 | 2.44E-05 |
| 6.33957277 | 1.23E-04 | 2.78E-05 |
| 7.98104926 | 1.30E-04 | 3.17E-05 |
| 10.0475457 | 1.38E-04 | 3.62E-05 |
| 12.6491106 | 1.46E-04 | 4.14E-05 |
| 15.9242868 | 1.57E-04 | 4.73E-05 |
| 20.0474894 | 1.68E-04 | 5.37E-05 |
| 25.2382938 | 1.81E-04 | 6.03E-05 |
| 31.7731294 | 1.96E-04 | 6.62E-05 |
| 40 | 2.12E-04 | 7.02E-05 |
| 50.3570165 | 2.28E-04 | 7.14E-05 |
| 63.3957277 | 2.44E-04 | 6.95E-05 |
| 79.8104926 | 2.60E-04 | 6.52E-05 |
| 100.475457 | 2.74E-04 | 5.96E-05 |
| 126.491106 | 2.87E-04 | 5.41E-05 |
| 159.242868 | 2.99E-04 | 4.92E-05 |
| 200.474894 | 3.10E-04 | 4.51E-05 |
| 252.382938 | 3.20E-04 | 4.17E-05 |
| 317.731294 | 3.29E-04 | 3.87E-05 |
| 400 | 3.38E-04 | 3.59E-05 |
| 503.570165 | 3.46E-04 | 3.32E-05 |
| 633.957277 | 3.53E-04 | 3.07E-05 |
| 798.104926 | 3.60E-04 | 2.86E-05 |
| 1004.75457 | 3.67E-04 | 2.74E-05 |
| 1264.91106 | 3.73E-04 | 2.73E-05 |
| 1592.42868 | 3.79E-04 | 2.83E-05 |
| 2004.74894 | 3.86E-04 | 2.98E-05 |
| 2504.74894 | 3.93E-04 | 3.10E-05 |
| 3004.74894 | 3.98E-04 | 3.11E-05 |
| 3504.74894 | 4.03E-04 | 3.04E-05 |
| 4004.74894 | 4.07E-04 | 2.90E-05 |
| 4504.74894 | 4.10E-04 | 2.71E-05 |
| 5004.74894 | 4.13E-04 | 2.50E-05 |
| 5504.74894 | 4.15E-04 | 2.29E-05 |
| 6004.74894 | 4.17E-04 | 2.07E-05 |
| 6504.74894 | 4.19E-04 | 1.86E-05 |
| 7004.74894 | 4.20E-04 | 1.67E-05 |
| 7504.74894 | 4.21E-04 | 1.49E-05 |

| | | |
|------------|----------|----------|
| 8004.74894 | 4.22E-04 | 1.31E-05 |
| 8504.74894 | 4.23E-04 | 1.16E-05 |
| 9004.74894 | 4.23E-04 | 1.03E-05 |
| 9504.74894 | 4.24E-04 | 8.95E-06 |
| 10004.7489 | 4.24E-04 | 7.73E-06 |
| 10504.7489 | 4.25E-04 | 6.77E-06 |
| 11004.7489 | 4.25E-04 | 5.92E-06 |
| 11504.7489 | 4.25E-04 | 5.16E-06 |
| 12004.7489 | 4.26E-04 | 4.62E-06 |
| 12504.7489 | 4.26E-04 | 4.15E-06 |
| 13004.7489 | 4.26E-04 | 3.62E-06 |
| 13504.7489 | 4.26E-04 | 3.17E-06 |
| 14004.7489 | 4.26E-04 | 2.75E-06 |
| 14504.7489 | 4.26E-04 | 2.38E-06 |
| 15004.7489 | 4.26E-04 | 2.03E-06 |
| 15504.7489 | 4.26E-04 | 1.71E-06 |
| 16004.7489 | 4.26E-04 | 1.44E-06 |
| 16504.7489 | 4.26E-04 | 1.20E-06 |
| 17004.7489 | 4.26E-04 | 9.93E-07 |
| 17504.7489 | 4.26E-04 | 8.07E-07 |
| 18004.7489 | 4.27E-04 | 6.50E-07 |
| 18504.7489 | 4.27E-04 | 4.97E-07 |
| 19004.7489 | 4.27E-04 | 4.34E-07 |
| 19504.7489 | 4.27E-04 | 3.96E-07 |
| 20004.7489 | 4.27E-04 | 2.95E-07 |

Cuadro 5. Datos del recíproco del caudal y derivada del recíproco del caudal para el ejemplo de un yacimiento rectangular.

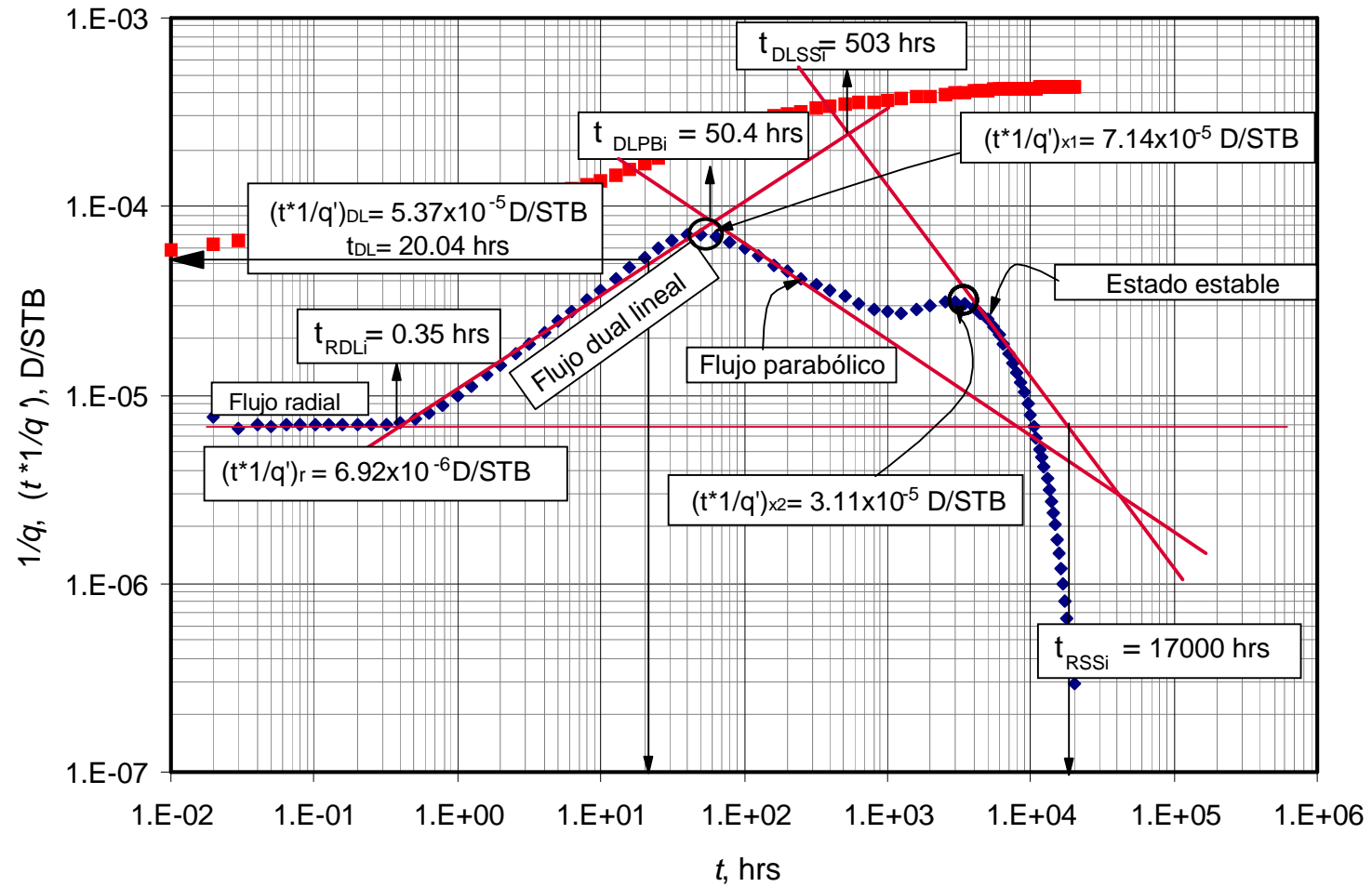


Fig. 29. Gráfico log-log del recíproco del caudal y derivada del recíproco del caudal para prueba simulada 3

4.4. EJEMPLO REAL (YACIMIENTO HOMOGÉNEO)

El presente ejemplo se tomó de una prueba de caudal generada en un pozo de petróleo que produce de la formación Tiger Ridge ubicado en Montana, los datos del recíproco del caudal y su derivada se presentan en el Cuadro 6, y los de roca y fluido se presentan a continuación.

Presión de Yacimiento, $P_i = 1706$ psi
Presión en cabeza de pozo, $P_{wf} = 1500$ psi
Espesor de la formación, $h = 30$ Pies
Permeabilidad, $k = 5$ md
Compresibilidad de la formación, $c_f = 5.2 \times 10^{-4}$ psi⁻¹
Radio del pozo, $r_w = 0.51$ pies
Porosidad, $\phi = 15$ %
Factor volumétrico, $B_o = 1.151$ bbl
Viscosidad del aceite, $\mu = 2$ cp

Calcular:

- 1) Estime la derivada del flujo radial
- 2) Determine el ancho del yacimiento
- 3) Determine el daño dual lineal

Para el análisis del método de la síntesis directa de Tiab se tienen los siguientes datos:

- De la Fig. 30 se obtienen los siguientes datos:

$$t_{RDLi} = 0.042 \text{ hr} \qquad (t^* I/q')_L = 8.06 \times 10^{-2} \text{ hr} \qquad t_L = 11.3 \text{ hr}$$

Se obtiene el valor de la derivada del flujo radial de la Ec. (55)

$$k = \frac{70.6 \mu B}{h \Delta P [t^* (1/q)']_r} \rightarrow [t^* (1/q)']_r = \frac{70.6 \mu \beta}{h \Delta P k} = \frac{70.6(2)(1.151)}{(30)(206)(5)} = 0.005259$$

Debido a que no se observa el flujo radial, pero se cuenta con el valor de la permeabilidad se puede calcular la derivada en dicho flujo.

De la Ec. (31) se determina el ancho del yacimiento:

$$Y_E = 0.07195 \sqrt{\frac{k t_{RDLi}}{\phi \mu c_f}} = 0.07195 \sqrt{\frac{(5)(0.042)}{(0.15)(2)(5.2 \times 10^{-4})}} = 2.639 \text{ ft}$$

Se verifica Y_E con la Ec. (17)

$$Y_E = \frac{5.0801B}{h\Delta P [t^*(1/q)']_{DL} \sqrt{k}} \sqrt{\frac{\Delta t_{DL} \mu}{\phi c_t}} = \frac{5.0801(1.151)}{(30)(206)(8.06 \times 10^{-2})(\sqrt{5})} \sqrt{\frac{(11.3)(2)}{(0.15)(5.2 \times 10^{-4})}}$$

$$Y_E = 2.825 \text{ ft}$$

Se determina el daño por la convergencia del flujo dual lineal Ec. (18).

$$s_{DL} = \left(\frac{1/q}{[t^*(1/q)']_{DL}} - 2 \right) \frac{1}{27.7945 Y_E} \sqrt{\frac{kt_{DL}}{\phi \mu c_t}}$$

$$s_{DL} = \left(\frac{0.273}{8.06 \times 10^{-2}} - 2 \right) \frac{1}{27.7945(2.825)} \sqrt{\frac{(5)(11.3)}{(0.15)(2)(5.2 \times 10^{-4})}} = 10.63$$

| t , hr | $1/q$, D/STB | (t^*1/q') , D/STB |
|----------|---------------|---------------------|
| 0.072 | 5.58E-04 | 1 |
| 0.09 | 0.596 | 0.256626747 |
| 0.113 | 0.64 | 7.25E-02 |
| 0.143 | 0.687 | 0.261613088 |
| 0.18 | 0.739 | 8.13E-02 |
| 0.226 | 0.795 | -0.139157414 |
| 0.285 | 0.8056 | -0.416855875 |
| 0.359 | 0.921 | -0.740882391 |
| 0.152 | 0.993 | 0.217764255 |
| 0.569 | 1.07E-03 | -0.34279819 |
| 0.716 | 0.115 | -0.120027219 |
| 0.903 | 0.124 | 0.137843207 |
| 1.13 | 0.134 | 4.22E-02 |
| 1.43 | 0.144 | 4.44E-02 |
| 1.8 | 0.155 | 4.68E-02 |
| 2.26 | 0.167 | 5.14E-02 |
| 2.85 | 0.179 | 5.50E-02 |
| 3.59 | 0.193 | 5.84E-02 |
| 4.52 | 0.207 | 0.062862132 |
| 5.69 | 0.222 | 0.066505409 |
| 7.16 | 0.238 | 7.11E-02 |
| 9.03 | 0.255 | 7.53E-02 |
| 11.3 | 0.273 | 8.06E-02 |
| 14.3 | 0.292 | 0.090664059 |
| 18 | 0.312 | 9.05E-02 |

| | | |
|------|----------|--------------|
| 22.6 | 0.34 | 5.38E-02 |
| 28.5 | 0.357 | -0.197125818 |
| 35.9 | 0.381 | -0.220490526 |
| 45.2 | 0.107 | -0.378402682 |
| 56.9 | 0.135 | -0.576037066 |
| 71.6 | 1.64E-03 | -0.577706165 |

Cuadro 6. Datos del recíproco del caudal y derivada del recíproco del caudal para el ejemplo real de un yacimiento rectangular homogéneo.

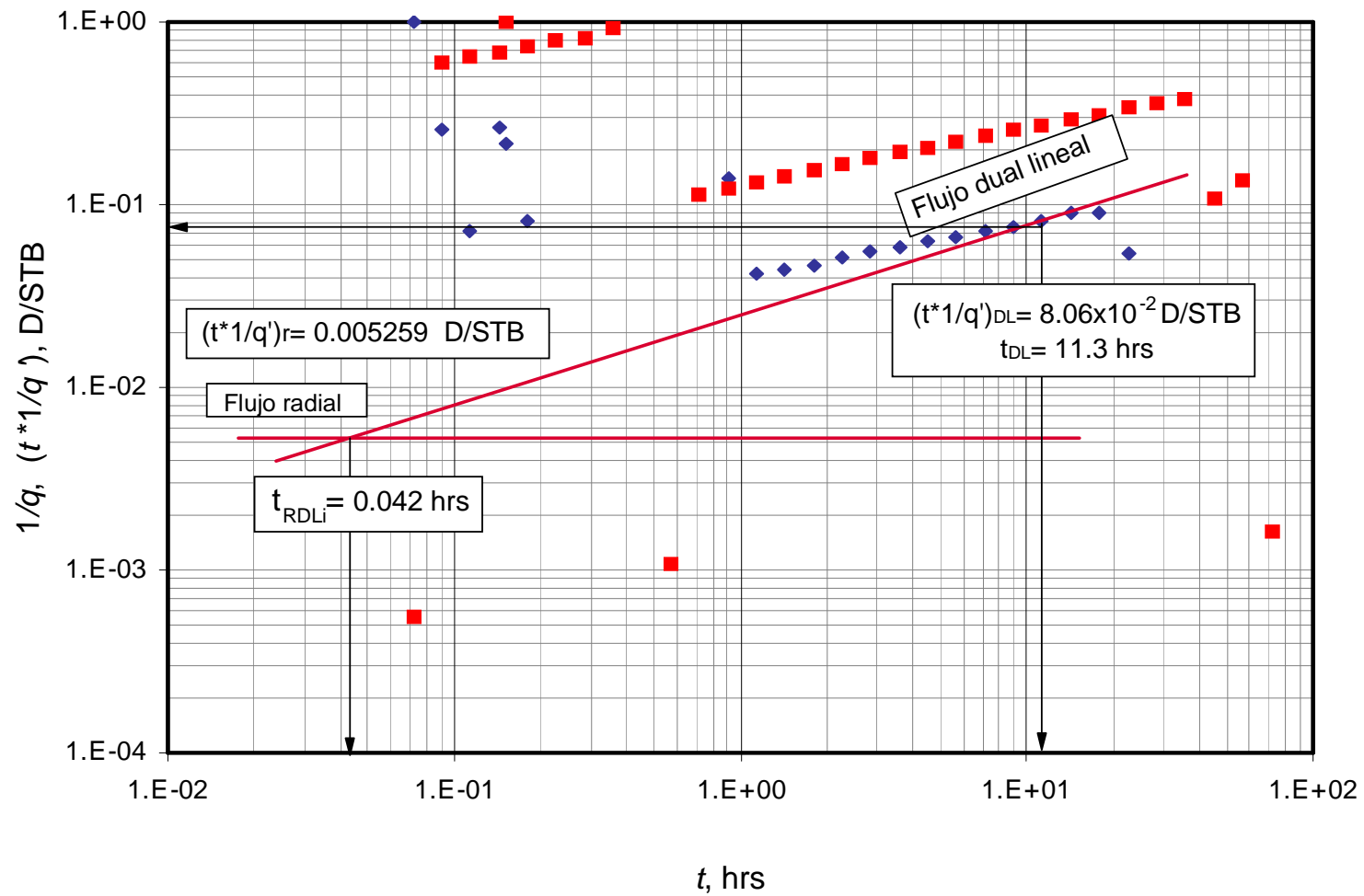


Fig. 30. Gráfico log-log del recíproco del caudal y derivada del recíproco del caudal para ejemplo real

4.5. EJEMPLO 1 SIMULADO (YACIMIENTO HETEROGÉNEO)

Los datos de la simulación de una prueba de caudal para un yacimiento naturalmente fracturado alargado, se muestran en el Cuadro 7. Del yacimiento y del pozo se conocen los siguientes datos:

| | | | |
|--|----------------|------------------------------|------------------|
| $\Delta P = 2500$ psi | $\mu = 2$ cp | $\phi = 20$ % | $B = 1.2$ rb/STB |
| $c_t = 1 \times 10^{-6}$ psi ⁻¹ | $r_w = 0.5$ ft | $h = 100$ ft | $X_E = 20000$ ft |
| $Y_E = 1000$ ft | $k = 50$ md | $\lambda = 5 \times 10^{-8}$ | $\omega = 0.02$ |

Determine:

- 1) La permeabilidad.
- 2) Parámetro de flujo interporoso.
- 3) Coeficiente de almacenamiento adimensional.
- 4) Factor de daño.
- 5) El área del yacimiento.

- De la Fig. 28 se obtienen los siguientes datos:

$$(t * 1/q')_r = 1.30 \times 10^{-5} \text{ D/STB}$$

$$(\Delta P')_r = 1.12 \times 10^{-4} \text{ D/STB}$$

$$t_r = 0.03 \text{ hr}$$

$$t_{RDLi} = 0.035 \text{ hr}$$

$$(t * 1/q')_{DL} = 3.16 \times 10^{-5} \text{ D/STB}$$

$$(1/q)_{DL} = 1.55 \times 10^{-4} \text{ hr}$$

$$t_{DL} = 0.2523 \text{ hr}$$

$$t_{DLPSSi} = 6000 \text{ hr}$$

$$(t * 1/q')_{\max} = 4.68 \times 10^{-5} \text{ D/STB}$$

$$(t * 1/q')_{\min} = 8.19 \times 10^{-5} \text{ D/STB}$$

La permeabilidad se calcula de la Ec. (55):

$$k = \frac{70.6\mu B}{h\Delta P [t * (1/q)']_r} = \frac{70.6(2)(1.2)}{100(2500)(1.30 \times 10^{-5})} = 52.1353 \text{ md}$$

El largo del yacimiento con la ecuación (67), y tomando el punto de intersección de la línea de flujo radial con la línea de flujo dual lineal:

$$Y_E = 0.0648256 \sqrt{\frac{(52.1353)(0.035)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})(0.02)}} = 979.208 \text{ ft}$$

Se verifica el valor de la permeabilidad despejando k de la Ec. (59)

$$k = \left[\frac{(4.162115)(1.2)}{979.208(100)(2500)(3.16 \times 10^{-5})} \sqrt{\frac{(2)(0.2523)}{(0.2)(1 \times 10^{-6})(0.0198)}} \right]^2 = 53.117 \text{ md}$$

Se calcula el valor del coeficiente de almacenamiento utilizando la correlación que aplica para los puntos mínimos del periodo de transición durante el estado dual lineal utilizando el punto mínimo $(t^*1/q')_{min}$, como la correlación esta expresada en termino adimensionales se calcula el valor de $(t^*1/q_D')_{min}$ con la Ec. (6) así:

$$[t_D^*(1/q_D')]_{min} = \frac{53.117 \times 100 \times 2500}{141.2 \times 2 \times 1.2} * (8.19 \times 10^{-6}) = 0.3209$$

Por lo tanto al reemplazar este valor en la correlación y sabiendo que el valor de λ es 5×10^{-8} el valor de ω es:

$$\omega = \frac{a + b \ln(0.3209) + c(\ln(0.3209))^2 + d(\ln(0.3209))^3 + e \ln 5 \times 10^{-8}}{1 + f \ln(0.3209) + g(\ln(0.3209))^2 + h(\ln(0.3209))^3 + i \ln 5 \times 10^{-8}} = 0.0214$$

Las constantes son definidas:

$$a = -0.15407418$$

$$b = -0.0039050889$$

$$c = 0.0022251207$$

$$d = 4.2193304 \times 10^{-4}$$

$$e = -0.0079273861$$

$$f = 0.2804578$$

$$g = -0.072289158$$

$$h = 0.023141728$$

$$i = 0.07200547$$

El área del reservorio la podemos hallar mediante la Ec. (65):

$$A = 0.140998 \sqrt{\frac{(1000^2)(0.0198)(52.1353)(6000)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})}} = 17545151 \text{ ft}^2$$

El parámetro de flujo interporoso λ se calcula con la Ec. (64), y tomando el valor de la derivada máxima:

$$\lambda = \left[\frac{(0.05472912)(300)(2)(1.2)}{52.1353(100)(2500)(4.68 \times 10^{-5})} \right]^2 = 4.64 \times 10^{-8}$$

Se calcula el daño del flujo radial mediante la ecuación (56):

$$s_r = 0.5 \left(\frac{1.12 \times 10^{-4}}{1.30 \times 10^{-5}} - \ln \left(\frac{(52.1353)(0.03)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})(0.5^2)} \right) + 7.43 \right) = -0.26$$

Se calcula el daño del flujo dual lineal mediante la ecuación (61):

$$s_{DL} = \left(\frac{1.55 \times 10^{-4}}{3.16 \times 10^{-5}} - 2 \right) \frac{1}{54.738732(1000)} \sqrt{\frac{(52.1353)(0.2523)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})(0.0198)}} = 6.738$$

Por lo tanto, el daño es:

$$s_t = s_r + s_{DL}$$

$$s_t = -0.26 + 6.738 = 6.478$$

| m | $1/q$, D/STB | $(t*1/q')$, D/STB | t , hr | $1/q$, D/STB | $(t*1/q')$, D/STB |
|----------|---------------|--------------------|-------------|---------------|--------------------|
| 0.020000 | 1.07E-04 | 1.49E-05 | 4100.474893 | 5.78E-03 | 1.37E-02 |
| 0.030000 | 1.12E-04 | 1.30E-05 | 4150.474893 | 5.95E-03 | 1.43E-02 |
| 0.040000 | 1.16E-04 | 1.43E-05 | 4200.474893 | 6.13E-03 | 1.49E-02 |
| 0.050357 | 1.19E-04 | 1.47E-05 | 4250.474893 | 6.31E-03 | 1.55E-02 |
| 0.063396 | 1.23E-04 | 1.61E-05 | 4300.474893 | 6.49E-03 | 1.61E-02 |
| 0.079810 | 1.27E-04 | 1.77E-05 | 4350.474893 | 6.68E-03 | 1.68E-02 |
| 0.100475 | 1.31E-04 | 1.99E-05 | 4400.474893 | 6.88E-03 | 1.75E-02 |
| 0.126491 | 1.36E-04 | 2.24E-05 | 4450.474893 | 7.08E-03 | 1.82E-02 |
| 0.159243 | 1.42E-04 | 2.52E-05 | 4500.474893 | 7.29E-03 | 1.90E-02 |
| 0.200475 | 1.48E-04 | 2.83E-05 | 4550.474893 | 7.50E-03 | 1.98E-02 |
| 0.252383 | 1.55E-04 | 3.16E-05 | 4600.474893 | 7.72E-03 | 2.06E-02 |

| | | | | | |
|------------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| 0.317731 | 1.62E-04 | 3.49E-05 | 4650.474893 | 7.95E-03 | 2.14E-02 |
| 0.400000 | 1.71E-04 | 3.83E-05 | 4700.474893 | 8.18E-03 | 2.23E-02 |
| 0.503570 | 1.80E-04 | 4.14E-05 | 4750.474893 | 8.42E-03 | 2.32E-02 |
| 0.633957 | 1.90E-04 | 4.41E-05 | 4800.474893 | 8.67E-03 | 2.40E-02 |
| 0.798105 | 2.00E-04 | 4.60E-05 | 4850.474893 | 8.92E-03 | 2.48E-02 |
| 1.004755 | 2.11E-04 | 4.68E-05 | 4900.474893 | 9.18E-03 | 2.58E-02 |
| 1.264911 | 2.21E-04 | 4.62E-05 | 4950.474893 | 9.45E-03 | 2.69E-02 |
| 1.592429 | 2.32E-04 | 4.39E-05 | 5000.474893 | 9.72E-03 | 2.79E-02 |
| 2.004749 | 2.42E-04 | 3.99E-05 | 5050.474893 | 1.00E-02 | 2.91E-02 |
| 2.523829 | 2.50E-04 | 3.46E-05 | 5100.474893 | 1.03E-02 | 3.02E-02 |
| 3.177313 | 2.57E-04 | 2.83E-05 | 5150.474893 | 1.06E-02 | 3.14E-02 |
| 4.000000 | 2.63E-04 | 2.20E-05 | 5200.474893 | 1.09E-02 | 3.27E-02 |
| 5.035702 | 2.68E-04 | 1.64E-05 | 5250.474893 | 1.12E-02 | 3.40E-02 |
| 6.339573 | 2.71E-04 | 1.20E-05 | 5300.474893 | 1.16E-02 | 3.53E-02 |
| 7.981049 | 2.73E-04 | 9.31E-06 | 5350.474893 | 1.19E-02 | 3.67E-02 |
| 10.047546 | 2.75E-04 | 8.19E-06 | 5400.474893 | 1.22E-02 | 3.82E-02 |
| 12.649111 | 2.77E-04 | 8.46E-06 | 5450.474893 | 1.26E-02 | 3.97E-02 |
| 15.924287 | 2.79E-04 | 9.86E-06 | 5500.474893 | 1.30E-02 | 4.13E-02 |
| 20.047489 | 2.82E-04 | 1.22E-05 | 5550.474893 | 1.34E-02 | 4.30E-02 |
| 25.238294 | 2.85E-04 | 1.54E-05 | 5600.474893 | 1.37E-02 | 4.47E-02 |
| 31.773129 | 2.89E-04 | 1.94E-05 | 5650.474893 | 1.42E-02 | 4.65E-02 |
| 40.000000 | 2.94E-04 | 2.46E-05 | 5700.474893 | 1.46E-02 | 4.83E-02 |
| 50.357016 | 3.00E-04 | 3.11E-05 | 5750.474893 | 1.50E-02 | 5.03E-02 |
| 63.395728 | 3.08E-04 | 3.94E-05 | 5800.474893 | 1.54E-02 | 5.23E-02 |
| 79.810493 | 3.19E-04 | 4.98E-05 | 5850.474893 | 1.59E-02 | 5.44E-02 |
| 100.475457 | 3.32E-04 | 6.31E-05 | 5900.474893 | 1.64E-02 | 5.65E-02 |
| 126.491106 | 3.48E-04 | 7.98E-05 | 5950.474893 | 1.69E-02 | 5.88E-02 |
| 159.242868 | 3.69E-04 | 1.01E-04 | 6000.474893 | 1.74E-02 | 6.11E-02 |
| 200.474894 | 3.95E-04 | 1.27E-04 | 6050.474893 | 1.79E-02 | 6.31E-02 |
| 250.474894 | 4.26E-04 | 1.58E-04 | 6100.474893 | 1.84E-02 | 6.55E-02 |
| 300.474894 | 4.58E-04 | 1.87E-04 | 6150.474893 | 1.90E-02 | 6.81E-02 |
| 350.474894 | 4.89E-04 | 2.16E-04 | 6200.474893 | 1.95E-02 | 7.08E-02 |
| 400.474894 | 5.19E-04 | 2.44E-04 | 6250.474893 | 2.01E-02 | 7.36E-02 |
| 450.474894 | 5.50E-04 | 2.72E-04 | 6300.474893 | 2.07E-02 | 7.65E-02 |
| 500.474894 | 5.80E-04 | 3.00E-04 | 6350.474893 | 2.13E-02 | 7.95E-02 |
| 550.474894 | 6.10E-04 | 3.28E-04 | 6400.474893 | 2.19E-02 | 8.27E-02 |
| 600.474894 | 6.39E-04 | 3.56E-04 | 6450.474893 | 2.26E-02 | 8.60E-02 |
| 650.474894 | 6.69E-04 | 3.85E-04 | 6500.474893 | 2.33E-02 | 8.94E-02 |
| 700.474894 | 6.99E-04 | 4.16E-04 | 6550.474893 | 2.40E-02 | 9.30E-02 |
| 750.474894 | 7.28E-04 | 4.47E-04 | 6600.474893 | 2.47E-02 | 9.68E-02 |

| | | | | | |
|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| 800.474894 | 7.58E-04 | 4.80E-04 | 6650.474893 | 2.54E-02 | 1.01E-01 |
| 850.474894 | 7.88E-04 | 5.14E-04 | 6700.474893 | 2.62E-02 | 1.05E-01 |
| 900.474894 | 8.19E-04 | 5.50E-04 | 6750.474893 | 2.70E-02 | 1.09E-01 |
| 950.474894 | 8.49E-04 | 5.89E-04 | 6800.474893 | 2.78E-02 | 1.13E-01 |
| 1000.474893 | 8.81E-04 | 6.29E-04 | 6850.474893 | 2.87E-02 | 1.18E-01 |
| 1050.474893 | 9.12E-04 | 6.71E-04 | 6900.474893 | 2.95E-02 | 1.23E-01 |
| 1100.474893 | 9.45E-04 | 7.16E-04 | 6950.474893 | 3.05E-02 | 1.28E-01 |
| 1150.474893 | 9.77E-04 | 7.62E-04 | 7000.474893 | 3.14E-02 | 1.33E-01 |
| 1200.474893 | 1.01E-03 | 8.13E-04 | 7050.474893 | 3.24E-02 | 1.39E-01 |
| 1250.474893 | 1.05E-03 | 8.66E-04 | 7100.474893 | 3.34E-02 | 1.44E-01 |
| 1300.474893 | 1.08E-03 | 9.20E-04 | 7150.474893 | 3.44E-02 | 1.50E-01 |
| 1350.474893 | 1.12E-03 | 9.78E-04 | 7200.474893 | 3.55E-02 | 1.57E-01 |
| 1400.474893 | 1.15E-03 | 1.04E-03 | 7250.474893 | 3.66E-02 | 1.63E-01 |
| 1450.474893 | 1.19E-03 | 1.10E-03 | 7300.474893 | 3.77E-02 | 1.70E-01 |
| 1500.474893 | 1.23E-03 | 1.17E-03 | 7350.474893 | 3.89E-02 | 1.77E-01 |
| 1550.474893 | 1.27E-03 | 1.24E-03 | 7400.474893 | 4.01E-02 | 1.85E-01 |
| 1600.474893 | 1.31E-03 | 1.31E-03 | 7450.474893 | 4.14E-02 | 1.92E-01 |
| 1650.474893 | 1.35E-03 | 1.39E-03 | 7500.474893 | 4.27E-02 | 2.01E-01 |
| 1700.474893 | 1.39E-03 | 1.47E-03 | 7550.474893 | 4.41E-02 | 2.09E-01 |
| 1750.474893 | 1.44E-03 | 1.56E-03 | 7600.474893 | 4.55E-02 | 2.18E-01 |
| 1800.474893 | 1.48E-03 | 1.64E-03 | 7650.474893 | 4.69E-02 | 2.28E-01 |
| 1850.474893 | 1.53E-03 | 1.73E-03 | 7700.474893 | 4.84E-02 | 2.37E-01 |
| 1900.474893 | 1.58E-03 | 1.83E-03 | 7750.474893 | 5.00E-02 | 2.48E-01 |
| 1950.474893 | 1.62E-03 | 1.94E-03 | 7800.474893 | 5.16E-02 | 2.59E-01 |
| 2000.474893 | 1.67E-03 | 2.04E-03 | 7850.474893 | 5.33E-02 | 2.70E-01 |
| 2050.474893 | 1.73E-03 | 2.15E-03 | 7900.474893 | 5.51E-02 | 2.82E-01 |
| 2100.474893 | 1.78E-03 | 2.27E-03 | 7950.474893 | 5.69E-02 | 2.95E-01 |
| 2150.474893 | 1.83E-03 | 2.38E-03 | 8000.474893 | 5.88E-02 | 3.08E-01 |
| 2200.474893 | 1.89E-03 | 2.51E-03 | 8050.474893 | 6.08E-02 | 3.22E-01 |
| 2250.474893 | 1.95E-03 | 2.64E-03 | 8100.474893 | 6.28E-02 | 3.37E-01 |
| 2300.474893 | 2.01E-03 | 2.77E-03 | 8150.474893 | 6.49E-02 | 3.52E-01 |
| 2350.474893 | 2.07E-03 | 2.92E-03 | 8200.474893 | 6.71E-02 | 3.69E-01 |
| 2400.474893 | 2.13E-03 | 3.06E-03 | 8250.474893 | 6.94E-02 | 3.86E-01 |
| 2450.474893 | 2.20E-03 | 3.22E-03 | 8300.474893 | 7.18E-02 | 4.04E-01 |
| 2500.474893 | 2.26E-03 | 3.38E-03 | 8350.474893 | 7.43E-02 | 4.23E-01 |
| 2550.474893 | 2.33E-03 | 3.54E-03 | 8400.474893 | 7.69E-02 | 4.43E-01 |
| 2600.474893 | 2.40E-03 | 3.72E-03 | 8450.474893 | 7.96E-02 | 4.64E-01 |
| 2650.474893 | 2.47E-03 | 3.90E-03 | 8500.474893 | 8.24E-02 | 4.87E-01 |
| 2700.474893 | 2.55E-03 | 4.09E-03 | 8550.474893 | 8.53E-02 | 5.11E-01 |
| 2750.474893 | 2.63E-03 | 4.28E-03 | 8600.474893 | 8.83E-02 | 5.36E-01 |

| | | | | | |
|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| 2800.474893 | 2.70E-03 | 4.49E-03 | 8650.474893 | 9.15E-02 | 5.63E-01 |
| 2850.474893 | 2.79E-03 | 4.70E-03 | 8700.474893 | 9.48E-02 | 5.91E-01 |
| 2900.474893 | 2.87E-03 | 4.92E-03 | 8750.474893 | 9.83E-02 | 6.21E-01 |
| 2950.474893 | 2.96E-03 | 5.15E-03 | 8800.474893 | 1.02E-01 | 6.53E-01 |
| 3000.474893 | 3.04E-03 | 5.39E-03 | 8850.474893 | 1.06E-01 | 6.87E-01 |
| 3050.474893 | 3.14E-03 | 5.62E-03 | 8900.474893 | 1.10E-01 | 7.23E-01 |
| 3100.474893 | 3.23E-03 | 5.88E-03 | 8950.474893 | 1.14E-01 | 7.61E-01 |
| 3150.474893 | 3.33E-03 | 6.14E-03 | 9000.474893 | 1.18E-01 | 8.02E-01 |
| 3200.474893 | 3.42E-03 | 6.42E-03 | 9050.474893 | 1.23E-01 | 8.46E-01 |
| 3250.474893 | 3.53E-03 | 6.71E-03 | 9100.474893 | 1.28E-01 | 8.92E-01 |
| 3300.474893 | 3.63E-03 | 7.01E-03 | 9150.474893 | 1.33E-01 | 9.42E-01 |
| 3350.474893 | 3.74E-03 | 7.33E-03 | 9200.474893 | 1.38E-01 | 9.95E-01 |
| 3400.474893 | 3.85E-03 | 7.65E-03 | 9250.474893 | 1.43E-01 | 1.05E+00 |
| 3450.474893 | 3.96E-03 | 7.99E-03 | 9300.474893 | 1.49E-01 | 1.11E+00 |
| 3500.474893 | 4.08E-03 | 8.35E-03 | 9350.474893 | 1.55E-01 | 1.18E+00 |
| 3550.474893 | 4.20E-03 | 8.71E-03 | 9400.474893 | 1.62E-01 | 1.25E+00 |
| 3600.474893 | 4.33E-03 | 9.09E-03 | 9450.474893 | 1.69E-01 | 1.33E+00 |
| 3650.474893 | 4.45E-03 | 9.49E-03 | 9500.474893 | 1.76E-01 | 1.41E+00 |
| 3700.474893 | 4.59E-03 | 9.90E-03 | 9550.474893 | 1.84E-01 | 1.52E+00 |
| 3750.474893 | 4.72E-03 | 1.03E-02 | 9600.474893 | 1.92E-01 | 1.65E+00 |
| 3800.474893 | 4.86E-03 | 1.07E-02 | 9650.474893 | 2.01E-01 | 1.76E+00 |
| 3850.474893 | 5.00E-03 | 1.11E-02 | 9700.474893 | 2.10E-01 | 1.88E+00 |
| 3900.474893 | 5.15E-03 | 1.16E-02 | 9750.474893 | 2.20E-01 | 2.02E+00 |
| 3950.474893 | 5.30E-03 | 1.21E-02 | 9800.474893 | 2.31E-01 | 2.17E+00 |
| 4000.474893 | 5.46E-03 | 1.26E-02 | 9850.474893 | 2.42E-01 | 2.35E+00 |
| 4050.474893 | 5.62E-03 | 1.31E-02 | 9900.474893 | 2.55E-01 | 2.61E+00 |

Cuadro 7. Datos del recíproco del caudal y la derivada del recíproco del caudal para el ejemplo 1 simulado (yacimientos heterogéneos)

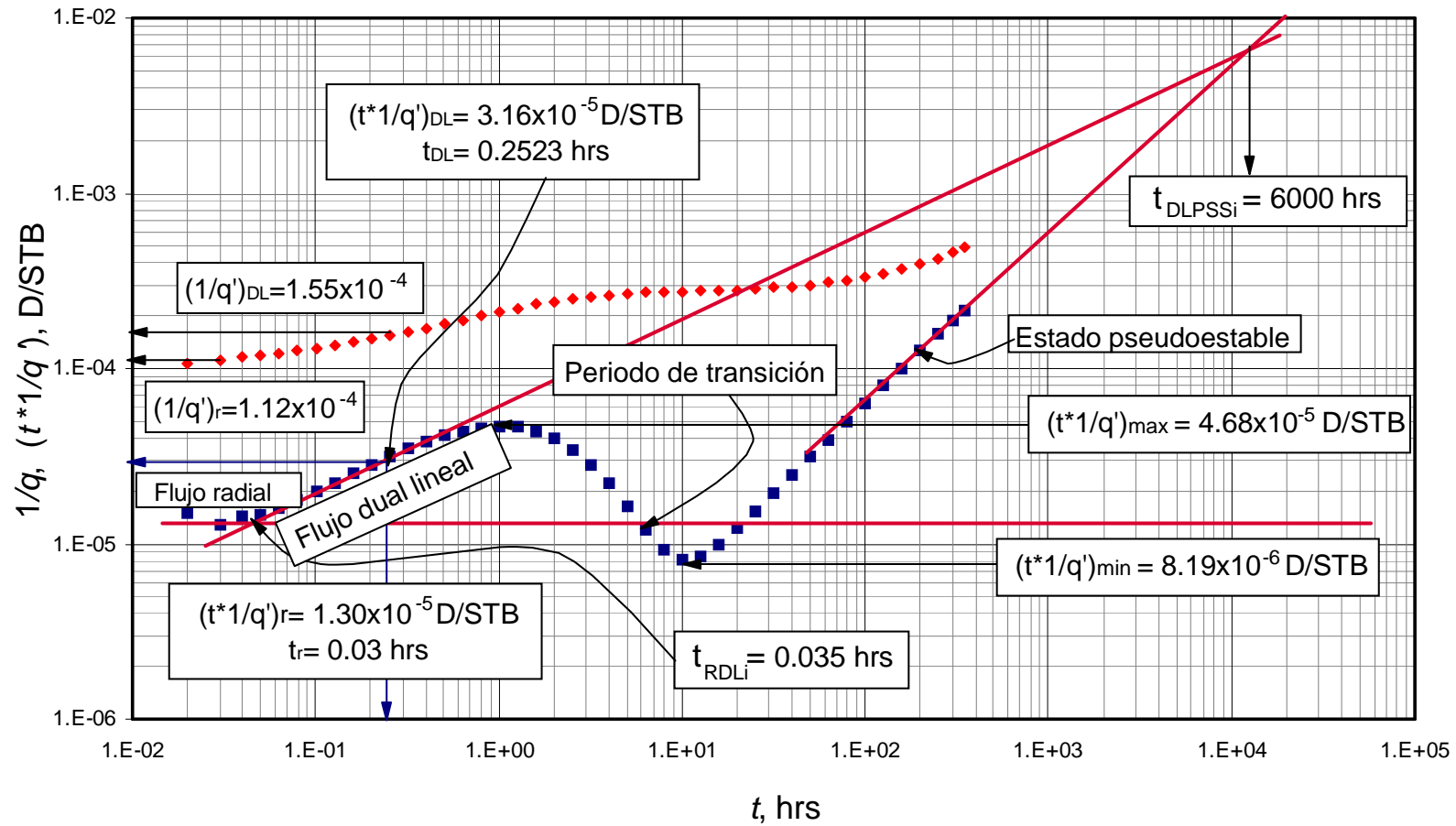


Fig. 31. Gráfico log-log del recíproco del caudal y derivada del recíproco del caudal para prueba simulada 1 (yacimento homogéneo)

4.6. EJEMPLO 2 SIMULADO (YACIMIENTO HETEROGÉNEO)

Se tiene una prueba de caudal en un pozo dentro de un yacimiento cerrado rectangular, (Ver Cuadro 8) Con los siguientes datos:

| | | | |
|--|----------------|-------------------------------|-------------------|
| $\Delta P = 5000$ psi | $\mu = 2$ cp | $\phi = 20$ % | $B = 1.2$ rb/STB |
| $c_t = 1 \times 10^{-6}$ psi ⁻¹ | $r_w = 0.5$ ft | $h = 100$ ft | $X_E = 680000$ ft |
| $Y_E = 1000$ ft | $k = 50$ md | $\lambda = 4 \times 10^{-11}$ | $\omega = 0.1$ |

Determine:

- 1) La permeabilidad.
- 2) Parámetro de flujo interporoso.
- 3) Coeficiente de almacenamiento adimensional.
- 4) Factor de daño.
- 5) El área del yacimiento.

- De la Fig. 30 se obtienen los siguientes datos:

$$(t * 1 / q')_r = 6.95 \times 10^{-6} \text{ D/STB}$$

$$(\Delta P')_r = 8.84 \times 10^{-5} \text{ D/STB}$$

$$t_r = 0.07981 \text{ hr}$$

$$t_{RPSSi} = 402 \text{ hr}$$

$$(t * 1 / q')_L = 6.24 \times 10^{-4} \text{ D/STB}$$

$$(1 / q)_L = 1.26 \times 10^{-3} \text{ hr}$$

$$t_L = 200 \text{ hr}$$

$$t_{LPSSi} = 2000000 \text{ hr}$$

$$(t * 1 / q')_{\max} = 1.61 \times 10^{-3} \text{ D/STB}$$

$$(t * 1 / q')_{\min} = 9.11 \times 10^{-4} \text{ D/STB}$$

La permeabilidad se calcula de la Ec. (55):

$$k = \frac{70.6 \mu B}{h \Delta P [t * (1 / q')]_r} = \frac{70.6(2)(1.2)}{100(2500)(1.30 \times 10^{-5})} = 48.7597 \text{ md}$$

Se calcula el valor del coeficiente de almacenamiento utilizando la correlación que aplica para los puntos mínimos del periodo de transición durante el estado dual lineal utilizando el punto mínimo $(t * 1 / q')_{\min}$, como la correlación esta expresada en termino adimensionales se calcula el valor de $(t * 1 / q_D')_{\min}$ con la Ec. (6) así:

$$[t_D * (1/q_D)]'_{\min} = \frac{48.7597(100)(5000)}{141.2(2)(1.2)} * (9.11 \times 10^{-4}) = 65.5395$$

Por lo tanto al reemplazar el valor en la correlación y sabiendo que el valor de λ es 4×10^{-11} el valor de ω es:

$$\omega = \frac{a + b \ln 4 \times 10^{-11} + c \ln(4 \times 10^{-11})^2 + d * 65.5395 + e(65.5395)^2 + f(65.5395)^3}{1 + g \ln 4 \times 10^{-11} + h * 65.5395 + i(65.5395)^2 + j(65.5395)^3} = 0.0996$$

$$a = 0.14646803$$

$$b = 0.013342717$$

$$c = 0.00030434555$$

$$d = -0.00026701191$$

$$e = 2.4497641 \times 10^{-6}$$

$$f = -9.2559594 \times 10^{-9}$$

$$g = 0.049793248$$

$$h = 0.0021617165$$

$$i = -8.3473003 \times 10^{-6}$$

$$j = 8.9505062 \times 10^{-9}$$

El largo del yacimiento con la Ec. (72), y tomando un tiempo conveniente durante el flujo lineal:

$$Y_E = \frac{42.480763(1.2)}{(100)(5000)(6.24 \times 10^{-4})} \sqrt{\frac{(2)(200)}{48.7597(0.2)(1 \times 10^{-6})(0.996)}} = 1048.51 \text{ ft}$$

El área del reservorio la podemos hallar mediante la Ec. (69):

$$A = \frac{48.7597(402)}{75.486(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})} = 649173336.8 \text{ ft}^2$$

El parámetro de flujo interporoso λ se calcula con la Ec. (64), y tomando el valor de la derivada máxima:

$$\lambda = \left[\frac{0.105335(2)(1.2)}{48.7597(100)(5000)(1.61 \times 10^{-3})} \right]^2 = 4.1481 \times 10^{-11}$$

Se calcula el daño del flujo radial mediante la ecuación (56):

$$S_r = 0.5 \left(\frac{1.26 \times 10^{-3}}{6.24 \times 10^{-4}} - \ln \left(\frac{48.7597(0.07981)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})(0.5^2)} \right) + 7.43 \right) = -4.013$$

Se calcula el daño del flujo dual lineal mediante la ecuación (61):

$$S_L = \left(\frac{1.26 \times 10^{-3}}{6.24 \times 10^{-4}} - 2 \right) \frac{1}{29.32416(1000)} \sqrt{\frac{48.7597(200)}{(0.2)(2)(1 \times 10^{-6})(0.0996)}} = 0.3244$$

Por lo tanto, el daño es:

$$s_t = s_r + s_L$$

$$s_t = -4.013 + 0.3244 = -3.6894$$

| t , hr | $1/q$, D/STB | $(t*1/q')$, D/STB | t , hr | $1/q$, D/STB | $(t*1/q')$, D/STB |
|----------|---------------|--------------------|----------|---------------|--------------------|
| 0.020000 | 7.88E-05 | 7.68E-06 | 3350000 | 5.39E-02 | 3.52E-02 |
| 0.030000 | 8.16E-05 | 6.63E-06 | 3400000 | 5.44E-02 | 3.59E-02 |
| 0.040000 | 8.36E-05 | 7.07E-06 | 3450000 | 5.50E-02 | 3.65E-02 |
| 0.050357 | 8.52E-05 | 6.92E-06 | 3500000 | 5.55E-02 | 3.72E-02 |
| 0.063396 | 8.68E-05 | 6.98E-06 | 3550000 | 5.60E-02 | 3.79E-02 |
| 0.079810 | 8.84E-05 | 6.95E-06 | 3600000 | 5.66E-02 | 3.86E-02 |
| 0.100475 | 9.00E-05 | 6.97E-06 | 3650000 | 5.71E-02 | 3.93E-02 |
| 0.126491 | 9.16E-05 | 7.01E-06 | 3700000 | 5.76E-02 | 4.00E-02 |
| 0.159243 | 9.32E-05 | 7.16E-06 | 3750000 | 5.82E-02 | 4.07E-02 |
| 0.200475 | 9.49E-05 | 7.46E-06 | 3800000 | 5.87E-02 | 4.16E-02 |
| 0.252383 | 9.67E-05 | 7.98E-06 | 3850000 | 5.93E-02 | 4.25E-02 |
| 0.317731 | 9.86E-05 | 8.74E-06 | 3900000 | 5.98E-02 | 4.32E-02 |
| 0.400000 | 1.01E-04 | 9.75E-06 | 3950000 | 6.04E-02 | 4.40E-02 |
| 0.503570 | 1.03E-04 | 1.10E-05 | 4000000 | 6.09E-02 | 4.48E-02 |
| 0.633957 | 1.06E-04 | 1.26E-05 | 4050000 | 6.15E-02 | 4.57E-02 |
| 0.798105 | 1.09E-04 | 1.47E-05 | 4100000 | 6.21E-02 | 4.65E-02 |

| | | | | | |
|--------------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 1.004755 | 1.13E-04 | 1.73E-05 | 4150000 | 6.26E-02 | 4.73E-02 |
| 1.264911 | 1.17E-04 | 2.08E-05 | 4200000 | 6.32E-02 | 4.82E-02 |
| 1.592429 | 1.22E-04 | 2.55E-05 | 4250000 | 6.38E-02 | 4.91E-02 |
| 2.004749 | 1.29E-04 | 3.16E-05 | 4300000 | 6.44E-02 | 4.99E-02 |
| 2.523829 | 1.37E-04 | 3.96E-05 | 4350000 | 6.49E-02 | 5.08E-02 |
| 3.177313 | 1.47E-04 | 4.97E-05 | 4400000 | 6.55E-02 | 5.18E-02 |
| 4.000000 | 1.60E-04 | 6.24E-05 | 4450000 | 6.61E-02 | 5.27E-02 |
| 5.035702 | 1.76E-04 | 7.78E-05 | 4500000 | 6.67E-02 | 5.36E-02 |
| 6.339573 | 1.96E-04 | 9.60E-05 | 4550000 | 6.73E-02 | 5.46E-02 |
| 7.981049 | 2.21E-04 | 1.17E-04 | 4600000 | 6.79E-02 | 5.55E-02 |
| 10.047546 | 2.50E-04 | 1.40E-04 | 4650000 | 6.85E-02 | 5.65E-02 |
| 12.649111 | 2.85E-04 | 1.64E-04 | 4700000 | 6.91E-02 | 5.75E-02 |
| 15.924287 | 3.26E-04 | 1.89E-04 | 4750000 | 6.97E-02 | 5.86E-02 |
| 20.047489 | 3.72E-04 | 2.15E-04 | 4800000 | 7.04E-02 | 5.98E-02 |
| 25.238294 | 4.25E-04 | 2.40E-04 | 4850000 | 7.10E-02 | 6.09E-02 |
| 31.773129 | 4.83E-04 | 2.67E-04 | 4900000 | 7.16E-02 | 6.20E-02 |
| 40.000000 | 5.48E-04 | 2.96E-04 | 4950000 | 7.22E-02 | 6.31E-02 |
| 50.357016 | 6.20E-04 | 3.29E-04 | 5000000 | 7.29E-02 | 6.42E-02 |
| 63.395728 | 7.00E-04 | 3.65E-04 | 5050000 | 7.35E-02 | 6.53E-02 |
| 79.810493 | 7.88E-04 | 4.06E-04 | 5100000 | 7.42E-02 | 6.64E-02 |
| 100.475457 | 8.87E-04 | 4.52E-04 | 5150000 | 7.48E-02 | 6.75E-02 |
| 126.491106 | 9.97E-04 | 5.03E-04 | 5200000 | 7.55E-02 | 6.87E-02 |
| 159.242868 | 1.12E-03 | 5.61E-04 | 5250000 | 7.62E-02 | 6.99E-02 |
| 200.474894 | 1.26E-03 | 6.24E-04 | 5300000 | 7.68E-02 | 7.11E-02 |
| 252.382938 | 1.41E-03 | 6.93E-04 | 5350000 | 7.75E-02 | 7.23E-02 |
| 317.731294 | 1.58E-03 | 7.69E-04 | 5400000 | 7.82E-02 | 7.35E-02 |
| 400.000000 | 1.76E-03 | 8.51E-04 | 5450000 | 7.89E-02 | 7.47E-02 |
| 503.570165 | 1.97E-03 | 9.39E-04 | 5500000 | 7.95E-02 | 7.60E-02 |
| 633.957277 | 2.19E-03 | 1.03E-03 | 5550000 | 8.02E-02 | 7.73E-02 |
| 798.104926 | 2.44E-03 | 1.13E-03 | 5600000 | 8.09E-02 | 7.86E-02 |
| 1004.754573 | 2.71E-03 | 1.23E-03 | 5650000 | 8.16E-02 | 7.99E-02 |
| 1264.911064 | 3.01E-03 | 1.32E-03 | 5700000 | 8.23E-02 | 8.12E-02 |
| 1592.428682 | 3.32E-03 | 1.42E-03 | 5750000 | 8.31E-02 | 8.25E-02 |
| 2004.748935 | 3.66E-03 | 1.50E-03 | 5800000 | 8.38E-02 | 8.39E-02 |
| 2523.829378 | 4.01E-03 | 1.56E-03 | 5850000 | 8.45E-02 | 8.53E-02 |
| 3177.312939 | 4.38E-03 | 1.61E-03 | 5900000 | 8.52E-02 | 8.67E-02 |
| 4000.000000 | 4.75E-03 | 1.62E-03 | 5950000 | 8.60E-02 | 8.81E-02 |
| 5035.701647 | 5.12E-03 | 1.60E-03 | 6000000 | 8.67E-02 | 8.96E-02 |
| 6339.572770 | 5.49E-03 | 1.55E-03 | 6050000 | 8.75E-02 | 9.12E-02 |
| 7981.049260 | 5.83E-03 | 1.46E-03 | 6100000 | 8.82E-02 | 9.28E-02 |
| 10047.545730 | 6.15E-03 | 1.34E-03 | 6150000 | 8.90E-02 | 9.43E-02 |
| 12649.110640 | 6.45E-03 | 1.21E-03 | 6200000 | 8.98E-02 | 9.58E-02 |
| 15924.286820 | 6.71E-03 | 1.08E-03 | 6250000 | 9.05E-02 | 9.74E-02 |
| 20047.489350 | 6.95E-03 | 9.76E-04 | 6300000 | 9.13E-02 | 9.89E-02 |

| | | | | | |
|--------------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 25238.293780 | 7.16E-03 | 9.13E-04 | 6350000 | 9.21E-02 | 1.00E-01 |
| 31773.129390 | 7.37E-03 | 9.11E-04 | 6400000 | 9.29E-02 | 1.02E-01 |
| 40000.000000 | 7.59E-03 | 9.82E-04 | 6450000 | 9.37E-02 | 1.04E-01 |
| 50357.016470 | 7.83E-03 | 1.14E-03 | 6500000 | 9.45E-02 | 1.05E-01 |
| 63395.727700 | 8.12E-03 | 1.38E-03 | 6550000 | 9.53E-02 | 1.07E-01 |
| 79810.492600 | 8.48E-03 | 1.76E-03 | 6600000 | 9.61E-02 | 1.09E-01 |
| 100000 | 8.93E-03 | 2.25E-03 | 6650000 | 9.70E-02 | 1.10E-01 |
| 126000 | 9.51E-03 | 2.81E-03 | 6700000 | 9.78E-02 | 1.12E-01 |
| 159000 | 1.03E-02 | 3.64E-03 | 6750000 | 9.86E-02 | 1.14E-01 |
| 200000 | 1.12E-02 | 4.67E-03 | 6800000 | 9.95E-02 | 1.16E-01 |
| 250000 | 1.24E-02 | 5.83E-03 | 6850000 | 1.00E-01 | 1.17E-01 |
| 300000 | 1.35E-02 | 6.97E-03 | 6900000 | 1.01E-01 | 1.19E-01 |
| 350000 | 1.47E-02 | 8.02E-03 | 6950000 | 1.02E-01 | 1.21E-01 |
| 400000 | 1.58E-02 | 8.98E-03 | 7000000 | 1.03E-01 | 1.23E-01 |
| 450000 | 1.69E-02 | 9.86E-03 | 7050000 | 1.04E-01 | 1.25E-01 |
| 500000 | 1.80E-02 | 1.06E-02 | 7100000 | 1.05E-01 | 1.27E-01 |
| 550000 | 1.91E-02 | 1.14E-02 | 7150000 | 1.06E-01 | 1.29E-01 |
| 600000 | 2.01E-02 | 1.20E-02 | 7200000 | 1.07E-01 | 1.31E-01 |
| 650000 | 2.11E-02 | 1.26E-02 | 7250000 | 1.07E-01 | 1.33E-01 |
| 700000 | 2.20E-02 | 1.31E-02 | 7300000 | 1.08E-01 | 1.35E-01 |
| 750000 | 2.29E-02 | 1.36E-02 | 7350000 | 1.09E-01 | 1.37E-01 |
| 800000 | 2.38E-02 | 1.40E-02 | 7400000 | 1.10E-01 | 1.39E-01 |
| 850000 | 2.47E-02 | 1.44E-02 | 7450000 | 1.11E-01 | 1.41E-01 |
| 900000 | 2.55E-02 | 1.48E-02 | 7500000 | 1.12E-01 | 1.43E-01 |
| 950000 | 2.63E-02 | 1.52E-02 | 7550000 | 1.13E-01 | 1.45E-01 |
| 1000000 | 2.71E-02 | 1.55E-02 | 7600000 | 1.14E-01 | 1.47E-01 |
| 1050000 | 2.79E-02 | 1.59E-02 | 7650000 | 1.15E-01 | 1.49E-01 |
| 1100000 | 2.86E-02 | 1.62E-02 | 7700000 | 1.16E-01 | 1.52E-01 |
| 1150000 | 2.94E-02 | 1.65E-02 | 7750000 | 1.17E-01 | 1.54E-01 |
| 1200000 | 3.01E-02 | 1.68E-02 | 7800000 | 1.18E-01 | 1.56E-01 |
| 1250000 | 3.08E-02 | 1.71E-02 | 7850000 | 1.19E-01 | 1.58E-01 |
| 1300000 | 3.15E-02 | 1.74E-02 | 7900000 | 1.20E-01 | 1.61E-01 |
| 1350000 | 3.21E-02 | 1.77E-02 | 7950000 | 1.21E-01 | 1.63E-01 |
| 1400000 | 3.28E-02 | 1.80E-02 | 8000000 | 1.22E-01 | 1.65E-01 |
| 1450000 | 3.34E-02 | 1.83E-02 | 8050000 | 1.23E-01 | 1.68E-01 |
| 1500000 | 3.40E-02 | 1.86E-02 | 8100000 | 1.24E-01 | 1.70E-01 |
| 1550000 | 3.46E-02 | 1.89E-02 | 8150000 | 1.25E-01 | 1.73E-01 |
| 1600000 | 3.52E-02 | 1.92E-02 | 8200000 | 1.26E-01 | 1.75E-01 |
| 1650000 | 3.58E-02 | 1.95E-02 | 8250000 | 1.27E-01 | 1.78E-01 |
| 1700000 | 3.64E-02 | 1.98E-02 | 8300000 | 1.28E-01 | 1.80E-01 |
| 1750000 | 3.70E-02 | 2.02E-02 | 8350000 | 1.29E-01 | 1.83E-01 |
| 1800000 | 3.76E-02 | 2.05E-02 | 8400000 | 1.31E-01 | 1.85E-01 |
| 1850000 | 3.82E-02 | 2.08E-02 | 8450000 | 1.32E-01 | 1.88E-01 |
| 1900000 | 3.87E-02 | 2.12E-02 | 8500000 | 1.33E-01 | 1.91E-01 |

| | | | | | |
|---------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 1950000 | 3.93E-02 | 2.15E-02 | 8550000 | 1.34E-01 | 1.93E-01 |
| 2000000 | 3.98E-02 | 2.19E-02 | 8600000 | 1.35E-01 | 1.96E-01 |
| 2050000 | 4.04E-02 | 2.22E-02 | 8650000 | 1.36E-01 | 1.99E-01 |
| 2100000 | 4.09E-02 | 2.26E-02 | 8700000 | 1.37E-01 | 2.02E-01 |
| 2150000 | 4.14E-02 | 2.30E-02 | 8750000 | 1.39E-01 | 2.04E-01 |
| 2200000 | 4.20E-02 | 2.33E-02 | 8800000 | 1.40E-01 | 2.07E-01 |
| 2250000 | 4.25E-02 | 2.37E-02 | 8850000 | 1.41E-01 | 2.10E-01 |
| 2300000 | 4.30E-02 | 2.41E-02 | 8900000 | 1.42E-01 | 2.13E-01 |
| 2350000 | 4.35E-02 | 2.46E-02 | 8950000 | 1.43E-01 | 2.16E-01 |
| 2400000 | 4.41E-02 | 2.50E-02 | 9000000 | 1.44E-01 | 2.19E-01 |
| 2450000 | 4.46E-02 | 2.55E-02 | 9050000 | 1.46E-01 | 2.22E-01 |
| 2500000 | 4.51E-02 | 2.59E-02 | 9100000 | 1.47E-01 | 2.25E-01 |
| 2550000 | 4.56E-02 | 2.64E-02 | 9150000 | 1.48E-01 | 2.28E-01 |
| 2600000 | 4.61E-02 | 2.68E-02 | 9200000 | 1.49E-01 | 2.31E-01 |
| 2650000 | 4.67E-02 | 2.73E-02 | 9250000 | 1.51E-01 | 2.35E-01 |
| 2700000 | 4.72E-02 | 2.78E-02 | 9300000 | 1.52E-01 | 2.38E-01 |
| 2750000 | 4.77E-02 | 2.83E-02 | 9350000 | 1.53E-01 | 2.41E-01 |
| 2800000 | 4.82E-02 | 2.88E-02 | 9400000 | 1.55E-01 | 2.44E-01 |
| 2850000 | 4.87E-02 | 2.93E-02 | 9450000 | 1.56E-01 | 2.48E-01 |
| 2900000 | 4.92E-02 | 2.98E-02 | 9500000 | 1.57E-01 | 2.51E-01 |
| 2950000 | 4.97E-02 | 3.04E-02 | 9550000 | 1.58E-01 | 2.54E-01 |
| 3000000 | 5.03E-02 | 3.09E-02 | 9600000 | 1.60E-01 | 2.57E-01 |
| 3050000 | 5.08E-02 | 3.16E-02 | 9650000 | 1.61E-01 | 2.61E-01 |
| 3100000 | 5.13E-02 | 3.22E-02 | 9700000 | 1.63E-01 | 2.64E-01 |
| 3150000 | 5.18E-02 | 3.27E-02 | 9750000 | 1.64E-01 | 2.68E-01 |
| 3200000 | 5.23E-02 | 3.34E-02 | 9800000 | 1.65E-01 | 2.71E-01 |
| 3250000 | 5.28E-02 | 3.40E-02 | 9850000 | 1.67E-01 | 2.75E-01 |
| 3300000 | 5.34E-02 | 3.46E-02 | 9900000 | 1.68E-01 | 2.80E-01 |

Cuadro 8. Datos del recíproco del caudal y la derivada del recíproco del caudal para el ejemplo 2 simulado (yacimientos heterogéneos)

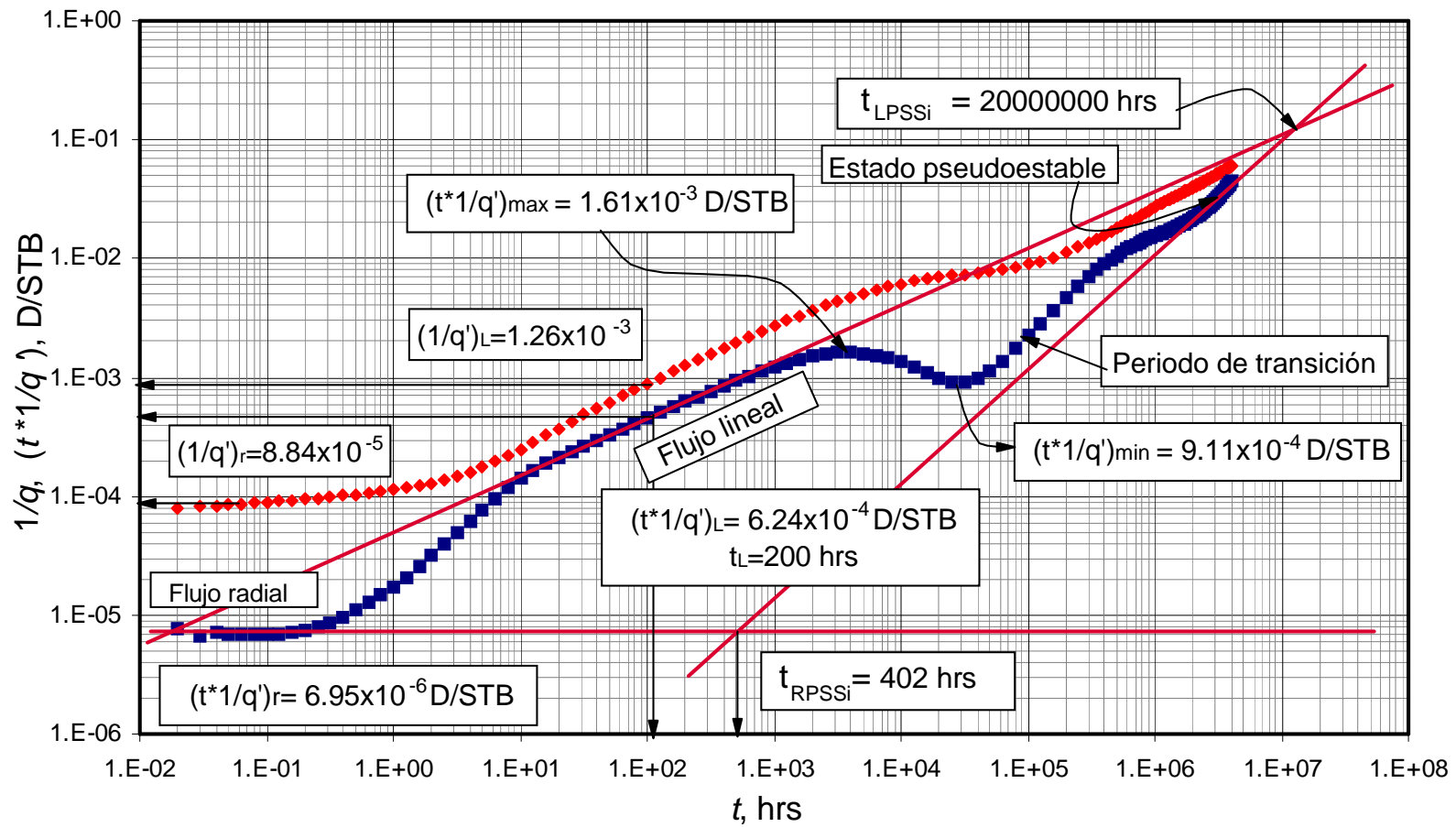


Fig. 32. Gráfico log-log del recíproco del caudal y derivada del recíproco del caudal para prueba simulada 2 (yacimieento heterogéneo)

5. CONCLUSIONES

- Para yacimientos homogéneos y heterogéneos alargados, se desarrollaron y modificaron las ecuaciones gobernantes para interpretar los datos obtenidos en pruebas de caudal a presión constante mediante el método TDS en cada tipo de flujo, siendo el dual lineal y el lineal los más representativos.
- Las pruebas de caudal tardan más tiempo que las pruebas de presión, y debido a esto se presenta una transición entre el paso del flujo dual lineal al flujo lineal en yacimientos homogéneos y heterogéneos cuando el pozo se encuentra descentrado.
- Se extendió la técnica TDS, para caracterizar yacimientos homogéneos y heterogéneos (geometría rectangular) para pozos verticales de petróleo. La técnica propuesta se verificó satisfactoriamente aplicándola a pruebas sintéticas.

6. RECOMENDACIONES

- Cuando la línea de pendiente cero que representa al régimen de flujo radial no se visualiza, el valor de la permeabilidad k se puede calcular a partir del flujo dual lineal si el ancho del yacimiento se conoce de otras fuentes.

NOMENCLATURA

| | |
|---------------|---|
| A | Área de drenaje, ft ² |
| B | Factor de volumen de formación del aceite, rb/STB |
| c_t | Compresibilidad, 1/psi |
| h | Espesor de la formación, ft |
| k | Permeabilidad de la formación, md |
| $1/q$ | Recíproco del caudal, D/STB |
| $1/q_D'$ | Derivada del recíproco del caudal adimensional |
| $1/q_D$ | Recíproco del caudal adimensional en el pozo |
| P_i | Presión inicial del yacimiento, psia |
| P_{wf} | Presión de fondo fluyente, psi |
| P | Presión, psi |
| r_e | Radio de drenaje, ft |
| r_w | Radio de pozo, ft |
| s | Factor de daño |
| t | Tiempo de prueba, hr |
| t_D | Tiempo adimensional |
| b_x | Distancia a la discontinuidad, ft |
| t_D^*1/q_D' | Derivada del recíproco del caudal adimensional |
| t^*1/q' | Derivada del recíproco del caudal, psi |

Griego

| | |
|-----------|--|
| ω | Coefficiente adimensional de almacenaje de un yacimiento naturalmente fracturado, $(\phi c_t)_f / [(\phi c_t)_m + (\phi c_t)_f]$ |
| Δ | Cambio |
| ϕ | Porosidad, fracción |
| λ | Parámetro de flujo interporoso |
| ρ | Densidad, lbm/ft ³ |
| μ | Viscosidad del aceite, cp |

Sufijos

| | |
|-------------|------------------------------------|
| $1, 1r, er$ | Primer régimen de flujo o temprano |
| $2L1$ | Flujo lineal tardío a 1 hr |
| b | Comienzo, intercepto |
| $erf2$ | Comienzo del flujo pseudorradial |
| D | Adimensional |
| l | Lineal |

| | |
|----------------------|---|
| <i>m</i> | Mecánico |
| <i>max</i> | Máximo |
| <i>min</i> | Mínimo |
| <i>L1</i> | Lineal temprano a 1 hr |
| <i>r1</i> | Radial a 1 hr |
| <i>pr1</i> | Pseudorradial a 1 hr |
| <i>2L1</i> | Flujo lineal tardío a 1 hr |
| <i>r</i> | Radial o pseudorradial |
| <i>S_T</i> | Almacenaje total, $(\phi c_i)_m + (\phi c_i)_f$ |
| <i>w</i> | Pozo |

REFERENCIAS

Ehlig-Economides, C., and Economides, M.J., 1985: “*Pressure Transient Analysis in an Elongated Linear Flow Systems*,” SPEJ pp. 839-847.

Mattar, L., 1997, “*Derivative Analysis without Type Curves*”. The Petroleum Society. Paper 97-51, 48th Annual Technical Meeting of the Petroleum Society, Calgary, Alberta, Canada.

Nutakki, R. and Mattar, L., 1982, “*Pressure Transient Analysis of Wells in Very Long Narrow reservoirs*” Paper SPE 11221, presented at the 57th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in Dallas, TX.

Wong, D.W., Mothersele, C.D., Harrington, A.G. and Cinco-Ley, H., 1986, “*Pressure Transient Analysis in Finite Linear Reservoirs Using Derivative and Conventional Techniques: Field Examples*,” Paper SPE 15421, 61st Annual technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in New Orleans, LA.

Escobar, F.H., Munoz, O.F., Sepulveda, J.A. and Montealegre, M., 2005. “*New Finding on Pressure Response In Long, Narrow Reservoirs*”. CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro. Vol. 2, No. 6.

Escobar, F.H. and Montealegre-M., M., 2006. “*Effect of Well Stimulation on the Skin Factor in Elongated Reservoirs*”. CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro. Vol. 3, No. 2. p. 109-119. Dec. 2006.

Escobar, F.H., Hernández, Y.A. and Hernández, C.M., 2007a. “*Pressure Transient Analysis for Long Homogeneous Reservoirs using TDS Technique*”. Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 58, Issue 1-2, pages 68-82.

Escobar, F.H., Tiab, D., and Tovar, L.V., 2007b. “*Determination of Areal Anisotropy from a single vertical Pressure Test and Geological Data in Elongated Reservoirs*”. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2(11). p. 1627-1639.

Escobar, F.H. and Montealegre, M., 2007. “*A Complementary Conventional Analysis For Channelized Reservoirs*”. CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro. Vol. 3, No. 3. p. 137-146.. Dec.

Escobar, F.H., 2008. “*Petroleum Science Research Progress*”. Nova Publishers. Edited by Korin L. Montclair. Chapter title “*Recent Advances in Well Test Analysis for Long an Narrow Reservoirs*”.

Resurreicao C.E.S., Fernando R. 1991. “*Transient Rate Behavior of Finite-Conductivity Asymmetrically Fractured Wells Producing at Constant Pressure*. SPE 22657.

Escobar, F.H., Hernandez, D.P. and Saavedra, J.A. "Pressure and Pressure Derivative Analysis for Long Naturally Fractured Reservoirs Using The TDS Technique". Accepted for publication. Journal Dyna. Universidad Nacional de Colombia. 2009.

Escobar, F.H., Montealegre-M., M., and Martínez, J.A. "Conventional Pressure Analysis for Naturally Fractured Reservoirs with Transition Period before and After the Radial Flow Regime". CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro. Vol. 3, No. 5. p. 85-106. ISSN 0122-5383. Dic. 2009.

Escobar, F.H., Montealegre-M., M., and Carrillo-Moreno, D., "Straight Line Methods for Estimating Permeability or Width for Two-Zone Composite Channelized Reservoirs". CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro. Vol. 3, No. 5. p. 107-124. ISSN 0122-5383. Dic. 2009.

Escobar, F.H., Hernandez, Y.A. and Tiab, D. "Determination of reservoir drainage area for constant-pressure systems using well test data". CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro. Vol. 4, No. 1. p. 1-12. ISSN 0122-5383. June 2010.

Escobar, F.H., Montealegre-M, M. and Carrillo_Moreno, Daniel. "Pressure and Pressure Derivative Transient Analysis Without Type-Curve Matching For Elongated Reservoirs With Changes in Permeability or Width". CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro. Vol. 4, No. 1. p. 1-12. ISSN 0122-5383. June 2010.

El-Banbi, A.H., and Wattenberger, R.A., 1998 "*Analysis of Linear Flow in Gas Well Production*". Paper SPE 39972 presented at the 1998 Gas Technology Symposium held in Calgary, Alberta, Canada, 15-18 March.

Tiab, D. and Escobar, F.H., 2003. "*Determinación del Parámetro de Flujo Interporoso a Partir de un Gráfico Semilogarítmico*". X Congreso Colombiano del petróleo (Colombian Petroleum Symposium). Oct. 14-17, 2003. Bogotá (Colombia).

ANEXOS
ANEXO A. MÈTODO CONVENCIONAL

**ANÁLISIS DE FLUJO TRANSITORIO EN FORMACIONES HOMOGÉNEAS
ALARGADAS**

El método propuesto en el presente estudio no puede ser comprobado mediante una aplicación, ya que no existe ninguna que realice el análisis de flujo transitorio, por lo tanto se adaptará el método convencional para verificar la validez de las ecuaciones y las correlaciones propuestas.

Para el desarrollo matemático se tienen en cuenta los siguientes parámetros adimensionales:

Tiempo adimensional:

$$t_D = \frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_t r_w^2} \quad (1)$$

Tiempo adimensional en términos de área, A:

$$t_{DA} = \frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_t A} \quad (2)$$

Recíproco del caudal adimensional:

$$\frac{1}{q_D} = \frac{kh\Delta P}{141.2\mu B} \frac{1}{q} \quad (3)$$

Tiempo adimensional para flujo lineal:

$$t_{DL} = \frac{t_D}{W_D^2} \quad (4)$$

Ancho adimensional:

$$W_D = \frac{Y_E}{r_w} \quad (5)$$

Posición del Pozo:

$$X_D = \frac{2b_x}{X_E} \quad (7)$$

$$Y_D = \frac{2b_y}{Y_E} \quad (8)$$

Flujo Lineal

Cuando las fronteras paralelas del yacimiento son de no flujo (cerradas), y el pozo se encuentra localizado sobre la frontera, se observa que el régimen de flujo dominante es el flujo lineal caracterizado por una pendiente de 0.5. La ecuación gobernante obtenida para este comportamiento es:

$$\frac{1}{q_D} = \frac{4\pi\sqrt{t_D}}{W_D} + s_L \quad (9)$$

Siendo s_L el daño causado por el cambio de flujo lineal a dual lineal.

$$\frac{kh\Delta P}{141.2\mu B} \frac{1}{q} = \frac{4\pi\sqrt{\frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_i r_w^2}}}{\frac{Y_E}{r_w}} + s_L$$

$$\frac{kh\Delta P}{\mu B} \frac{1}{q} = 28.8137 \sqrt{\frac{kt}{\phi\mu c_i Y_E^2}} + \frac{141.2\mu B}{kh\Delta P} s_L$$

$$\frac{1}{q} = \frac{28.8137B}{h\Delta P} \sqrt{\frac{\mu t}{\phi k c_i Y_E^2}} + \frac{141.2\mu B}{kh\Delta P} s_L \quad (10)$$

Un gráfico Cartesiano de $1/q$ vs. $t^{0.5}$ proporcionará una recta de pendiente m_{LF} e intercepto b_{LF} , que permiten hallar:

$$Y_E = \frac{28.8137B}{h\Delta P m_{LF}} \sqrt{\frac{\mu}{\phi k c_i}} \quad (11)$$

$$s_L = \frac{kh\Delta P b_{LF}}{141.2\mu B} \quad (12)$$

Flujo Dual Lineal

Este flujo se presenta para todos los casos, fronteras cerradas, fronteras abiertas y fronteras mixtas y toma lugar cuando el pozo se encuentra localizado a cualquier distancia de la frontera más cercana a él.

Se encontró en este estudio que la ecuación gobernante para este régimen de flujo es:

$$\frac{kh\Delta P}{141.2\mu B} \frac{1}{q} = \frac{5}{2} \sqrt{\frac{\pi \frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_t r_w^2}}{\frac{Y_E}{r_w}}} + s_{DL}$$

$$\frac{kh\Delta P}{141.2\mu B} \frac{1}{q} = \frac{5}{2} \sqrt{\frac{\pi \frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_t r_w^2}}{\frac{Y_E}{r_w}}} + s_{DL}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{10.1602B}{h\Delta P} \sqrt{\frac{\mu t}{\phi k c_t Y_E^2}} + \frac{141.2\mu B}{kh\Delta P} s_{DL} \quad (13)$$

Un gráfico Cartesiano de $1/q$ vs. $t^{0.5}$ proporcionará una recta de pendiente m_{DLF} e intercepto b_{DLF} , que permiten hallar:

$$Y_E = \frac{10.1602B}{h\Delta P m_{DLF}} \sqrt{\frac{\mu}{\phi k c_t}} \quad (14)$$

$$s_{DL} = \frac{kh\Delta P b_{DLF}}{141.2\mu B} \quad (15)$$

Flujo Parabólico (Pendiente -1/2)

El flujo parabólico (PB), es el resultado de la acción simultánea de la frontera de flujo estable y del flujo lineal.

La ecuación dimensional que gobierna este régimen de flujo es:

$$\frac{kh\Delta P}{141.2\mu B} \frac{1}{q} = -\frac{\sqrt{\pi}}{4} \frac{Y_E}{r_w} \left(\frac{2b_x}{X_E}\right)^2 \left(\frac{X_E}{Y_E}\right)^2 \left(\frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_t r_w^2}\right)^{-0.5} + s_{PB}$$

$$\frac{kh\Delta P}{\mu B} \frac{1}{q} = -15411.843b_x^2 \left(\frac{\phi\mu c_t}{kY_E^2}\right) t^{-0.5} + s_{PB}$$

$$\frac{1}{q} = -\frac{15411.843Bb_x^2}{h\Delta P} \sqrt{\frac{\phi\mu^3 c_t}{k^3 Y_E^2}} t^{-0.5} + \frac{141.2\mu B}{kh\Delta P} s_{PB} \quad (16)$$

Un gráfico Cartesiano de $1/q$ vs. $1/t^{0.5}$ proporcionará una recta de pendiente m_{PBF} e intercepto b_{PBF} , que permiten hallar:

$$b_x = -\frac{m_{PBF}^2}{124.1444} \sqrt{\frac{h\Delta P}{B}} \frac{k^3 Y_E^2}{\phi \mu^3 c_t} \quad (17)$$

$$s_{PBF} = \frac{kh\Delta P b_{PBF}}{141.2\mu B} \quad (18)$$

ANÁLISIS DE FLUJO TRANSITORIO EN FORMACIONES HETEROGÉNEAS ALARGADAS

Régimen de Flujo Dual Lineal

El flujo dual lineal es identificado por una tendencia de pendiente positiva de valor 0.5 en el gráfico de la derivada. Este régimen se presenta en pozos hidráulicamente fracturados, pozos horizontales y yacimientos alargados el cual es el tema de este capítulo. Puesto que las líneas de corriente convergen a un plano, los parámetros asociados con el flujo lineal son la permeabilidad de la formación en la dirección de las líneas de flujo y el área de flujo normal a las líneas de corriente.

Se encontró que la ecuación que representa el flujo dual lineal es:

$$1/q_D = \frac{9}{4} \frac{\sqrt{\pi t_D}}{\sqrt{\omega W_D}} + s_{DL} \quad (19)$$

Siendo s_{DL} el daño causado por la convergencia del flujo radial al dual lineal.

$$\frac{1}{q} = \frac{9.1442B}{h\Delta P} \sqrt{\frac{\mu t}{\omega k \phi c_t Y_E^2}} + \frac{141.2\mu B}{kh\Delta P} s_{DL} \quad (20)$$

Un gráfico Cartesiano de $1/q$ vs. $t^{0.5}$ proporcionará una recta de pendiente m_{DLF} e intercepto b_{DLF} , que permiten hallar:

$$Y_E = \frac{9.1442B}{h\Delta P m_{DLF}} \sqrt{\frac{\mu}{\omega \phi k c_t}} \quad (21)$$

$$s_{DL} = \frac{kh\Delta P b_{DLF}}{141.2\mu B} \quad (22)$$

Régimen de flujo lineal ocurre después del periodo de transición

Cuando el periodo de transición se presenta después del régimen de flujo radial dicho flujo se comporta como un yacimiento homogéneo, la ecuación gobernante es:

$$\frac{1}{q_D} = \frac{4\pi\sqrt{t_D}}{W_D} + s_L \quad (23)$$

$$\frac{kh\Delta P}{141.2\mu B} \frac{1}{q} = \frac{4\pi\sqrt{\frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_i r_w^2}}}{\frac{Y_E}{r_w}} + s_L$$

$$\frac{1}{q} = \frac{28.8137B}{h\Delta P} \sqrt{\frac{\mu t}{\phi k c_i Y_E^2}} + \frac{141.2\mu B}{kh\Delta P} s_L \quad (24)$$

Un gráfico Cartesiano de $1/q$ vs. $t^{0.5}$ proporcionará una recta de pendiente m_{LF} e intercepto b_{LF} , que permiten hallar:

$$Y_E = \frac{28.8137B}{h\Delta P m_{LF}} \sqrt{\frac{\mu}{\phi k c_i}} \quad (25)$$

$$s_L = \frac{kh\Delta P b_{LF}}{141.2\mu B} \quad (26)$$

El régimen de flujo lineal ocurre antes del periodo de transición

Cuando el régimen de flujo lineal se da antes del período de transición el comportamiento de dicho flujo es el de un yacimiento fracturado naturalmente, las ecuaciones gobernantes son:

$$\frac{1}{q_D} = \frac{21}{5} \frac{\sqrt{\pi t_D}}{W_D \sqrt{\omega}} + s_L \quad (27)$$

$$\frac{kh\Delta P}{141.2\mu B} \frac{1}{q} = \frac{21}{5} \sqrt{\frac{\pi \frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_i r_w^2}}{\frac{Y_E}{r_w} \sqrt{\omega}}} + s_L$$

$$\frac{1}{q} = \frac{17.0692B}{h\Delta P} \sqrt{\frac{\mu t}{\omega k \phi c_i Y_E^2}} + \frac{141.2\mu B}{kh\Delta P} s_L \quad (28)$$

Un gráfico Cartesiano de $1/q$ vs. $t^{0.5}$ proporcionará una recta de pendiente m_{LF} e intercepto b_{LF} , que permiten hallar:

$$Y_E = \frac{17.0692B}{h\Delta P m_{LF}} \sqrt{\frac{\mu}{\omega\phi k c_t}} \quad (29)$$

$$s_L = \frac{kh\Delta P b_{LF}}{141.2\mu B} \quad (30)$$

En yacimientos alargados donde la transferencia de masa entre la matriz y la fractura es retrasada debido a valores del parámetro de flujo interporoso muy bajos, por el orden de 1×10^{-7} , el periodo de transición toma lugar una vez el régimen de flujo radial ha terminado. De la misma forma el flujo dual lineal y el lineal pueden ser interrumpidos por el periodo de transición. Aunque para el caso de este estudio, este comportamiento puede ser mostrado durante el periodo de estado pseudoestable para tiempos tardíos.

En la Fig. 1 se muestra una gráfica semilogarítmica del recíproco del caudal adimensional por la raíz del parámetro de flujo interporoso en función del tiempo adimensional para diferentes valores de λ y ω . Como era de esperar, una tendencia lineal se observa lo que indica el comportamiento transitorio infinito. Posteriormente, el flujo dual lineal aparece y durante el periodo de estado pseudoestable tardío, todas las líneas para los diferentes λ y ω coinciden.

La Fig. 2 corresponde a una gráfica semilogarítmica del recíproco del caudal adimensional en función del tiempo adimensional para diferentes valores del parámetro de flujo interporoso. Parte del periodo de transición se muestra en la gráfica. Se observa una correlación entre ω y la intersección de la gráfica semilogarítmica la cual es:

$$\omega = \frac{a + bx + cx^2 + dy}{1 + ex + fy + gy^2 + hy^3} \quad (31)$$

$$r^2 = 0.9999206624489242$$

$$\sigma = 0.0003518047465261433$$

$$a = -0.0293872506829593$$

$$b = 0.01814676521142132$$

$$c = -0.00294633229989956$$

$$d = 0.0002169782577669551$$

$$e = 0.005170615590574063$$

$$f = -0.9359970165469937$$

$$g = 0.2912087778421929$$

$$h = -0.03102476190262259$$

Donde:

$$x = \frac{0.0002637k}{\phi\mu c_t r_w^2}$$

$$s_r = 1.1513 \left[\frac{(1/q)_{1hr}}{m} - \log \left(\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2} \right) + 3.23 \right]$$

$$y = \frac{kh\Delta P}{141.2\mu B} \left(\frac{1}{q} \right)_{1hr} + 1.0515s_r$$

$$-4 \leq s_r \leq 4 \text{ y } 0.01 \leq \omega \leq 0.1$$

Como se muestra en la Fig. 3, el intercepto de la gráfica semilogarítmica es función del factor de daño. La correlación entre el factor de daño y el intercepto es mostrado en la Fig. 4.

El parámetro de flujo interporoso puede ser dado por la ecuación de Tiab y Escobar (2003)

$$\lambda = \frac{3792(\phi c_t)_i \mu r_w^2}{k \Delta t_{inf}} \left[\omega \ln \left(\frac{1}{\omega} \right) \right] \quad (32)$$

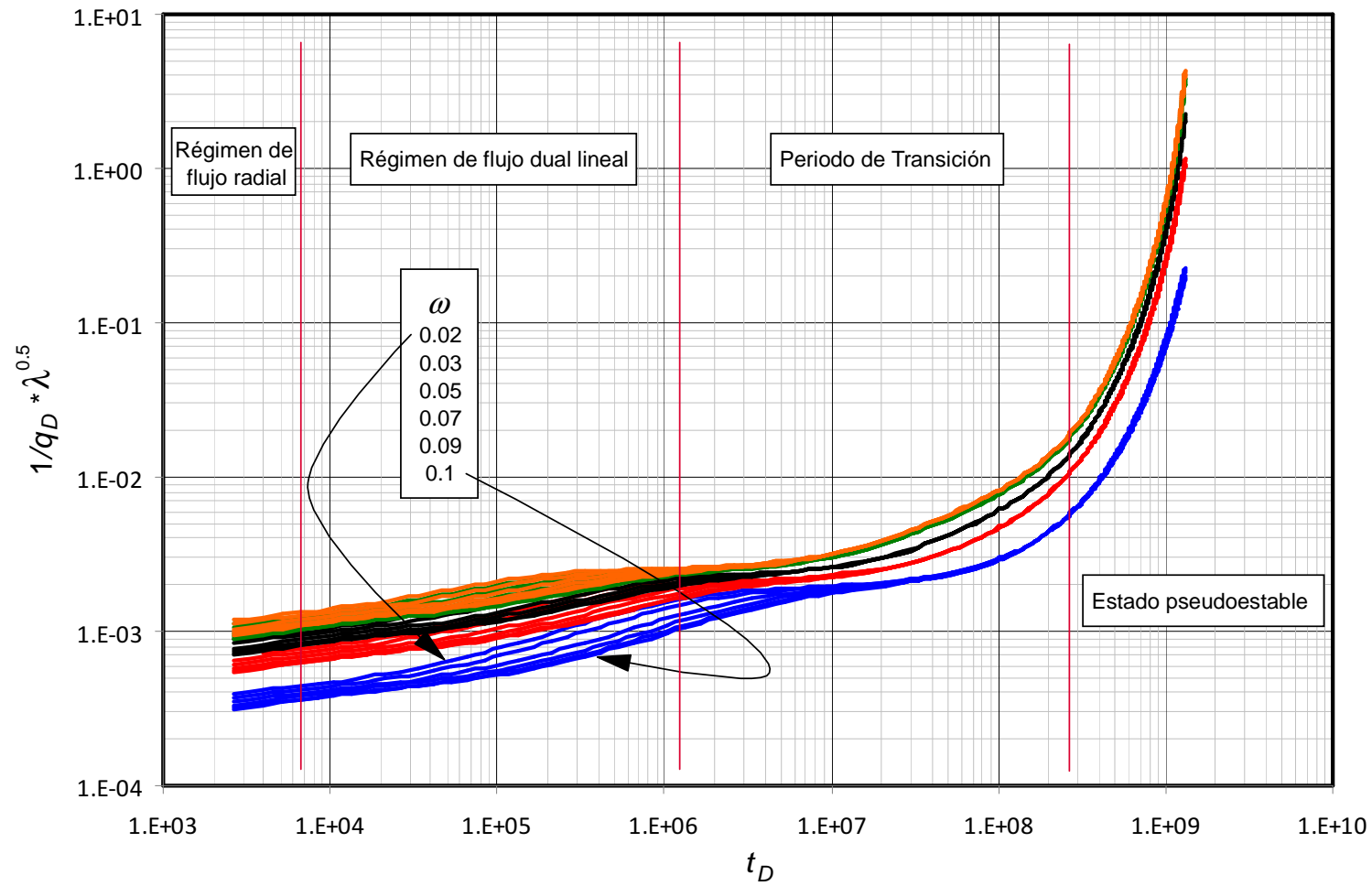


Fig. 1. Gráfica semilogarítmica del recíproco del caudal adimensional por la raíz del parámetro de flujo interporoso en función del tiempo adimensional para diferentes valores de λ y ω

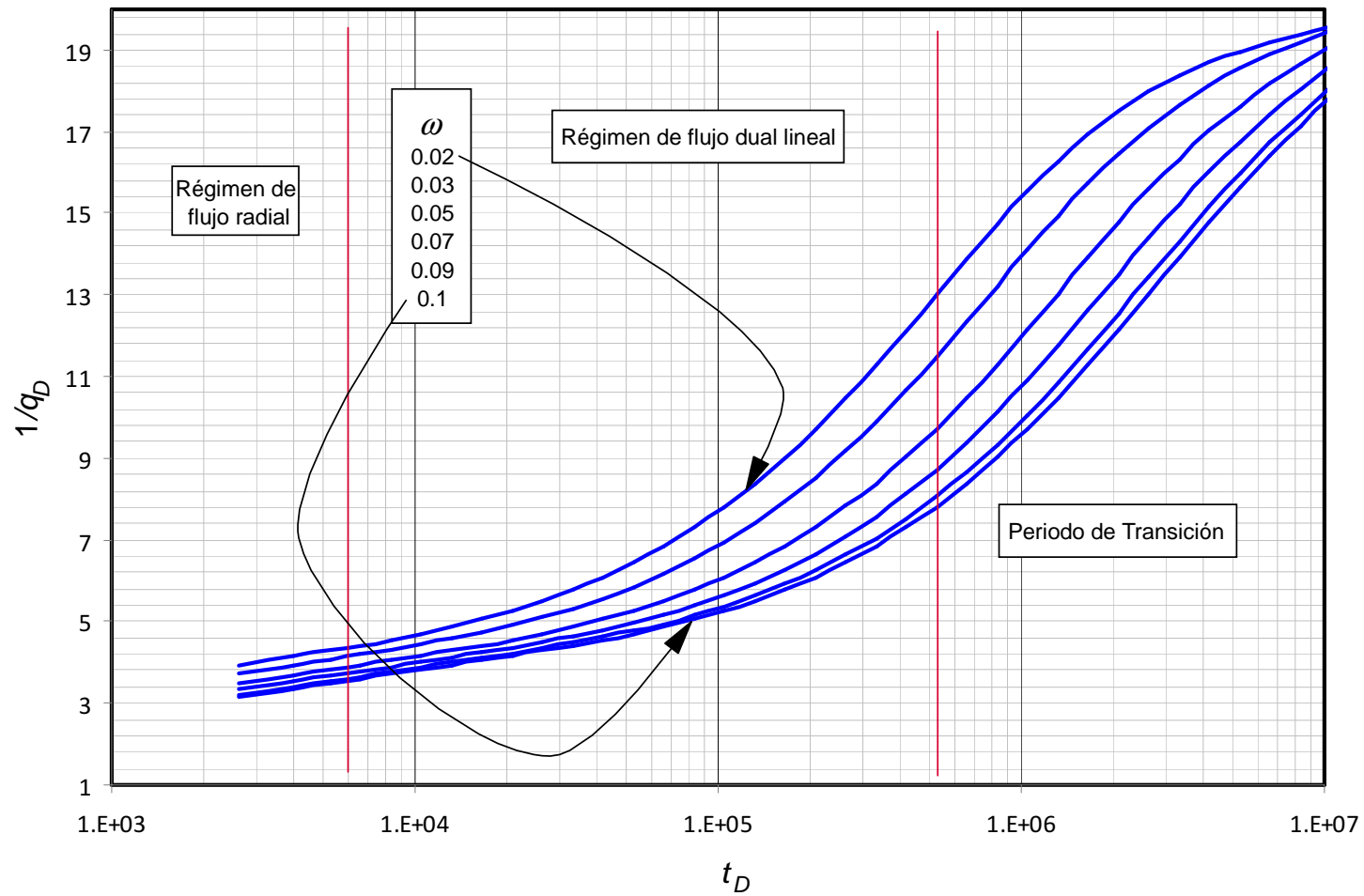


Fig. 2. Gráfica semilogarítmica del recíproco del caudal adimensional por la raíz del parámetro de flujo interporoso en función del tiempo adimensional para diferentes valores de λ y ω

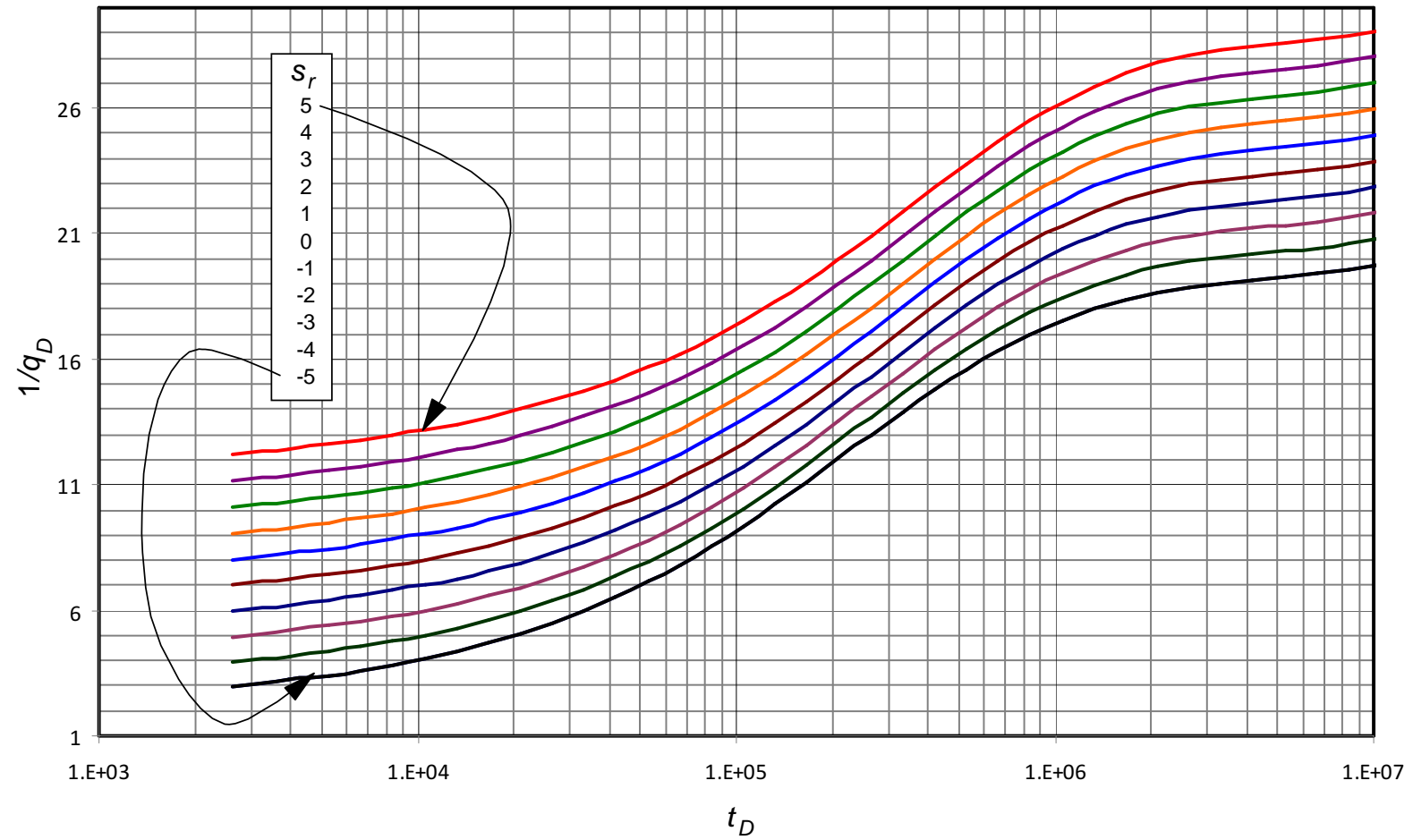


Fig. 3. Gráfica semilogarítmica del recíproco del caudal adimensional en función del tiempo adimensional para $\omega = 0.01$ and $\lambda = 1 \times 10^{-8}$ con diferentes factores de daño.

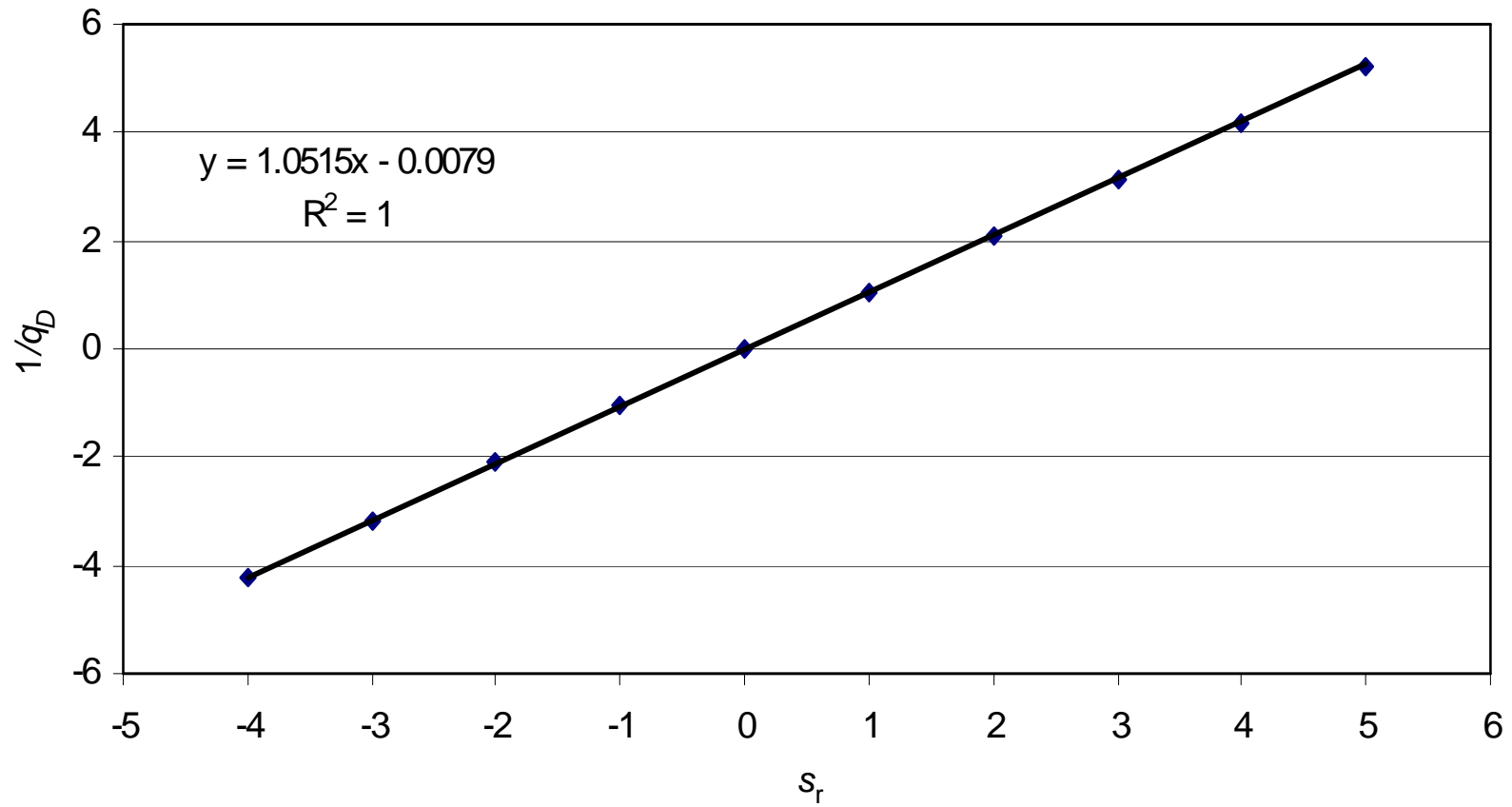


Fig. 4. Relación entre el recíproco del caudal adimensional con el factor de daño para $\omega = 0.01$ and $\lambda = 1 \times 10^{-8}$

EJEMPLO SIMULADO 1 (YACIMIENTO HOMOGÉNEO)

Se simuló una prueba de caudal en un pozo ubicado cerca a una frontera abierta dentro de un yacimiento rectangular con los siguientes datos:

$$\begin{array}{llll} \Delta P = 5000 \text{ psi} & \mu = 2 \text{ cp} & \phi = 20 \% & B = 1.2 \text{ rb/STB} \\ c_t = 1 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1} & r_w = 0.5 \text{ ft} & h = 100 \text{ ft} & X_E = 4000 \text{ ft} \\ Y_E = 500 \text{ ft} & k = 50 \text{ md} & & \end{array}$$

De la Fig. 5 se determinaron los siguientes datos:

$$\begin{array}{ll} m_{DLF} = 2.01024 \times 10^{-5} & b_{DLF} = 7.0995 \times 10^{-5} \\ m_{PBF} = -0.000338377 & b_{PBF} = 0.000235614 \end{array}$$

Se encuentra el valor del ancho del yacimiento con la siguiente ecuación, teniendo el valor de m_{DLF} que es la pendiente del gráfico del recíproco del caudal en función de $t^{0.5}$.

$$Y_E = \frac{10.1602B}{h\Delta P m_{DLF}} \sqrt{\frac{\mu}{\phi k c_t}} = \frac{10.1602(1.2)}{(100)(5000)(2.01024 \times 10^{-5})} \sqrt{\frac{2}{(0.2)(50)(1 \times 10^{-6})}} = 542.4760 \text{ ft}$$

El daño se determina con el valor del corte con el eje Y, b_{DLF} de la gráfica del recíproco del caudal en función de $t^{0.5}$.

$$s_{DL} = \frac{kh\Delta P b_{DLF}}{141.2\mu B} = \frac{(50)(100)(5000)(7.0995 \times 10^{-5})}{141.2(2)(1.2)} = 5.23$$

Al comparar con los resultados de la simulación con los obtenidos por el método de TDST y el del método convencional se puede observar que los datos son similares y que no existe una diferencia grande.

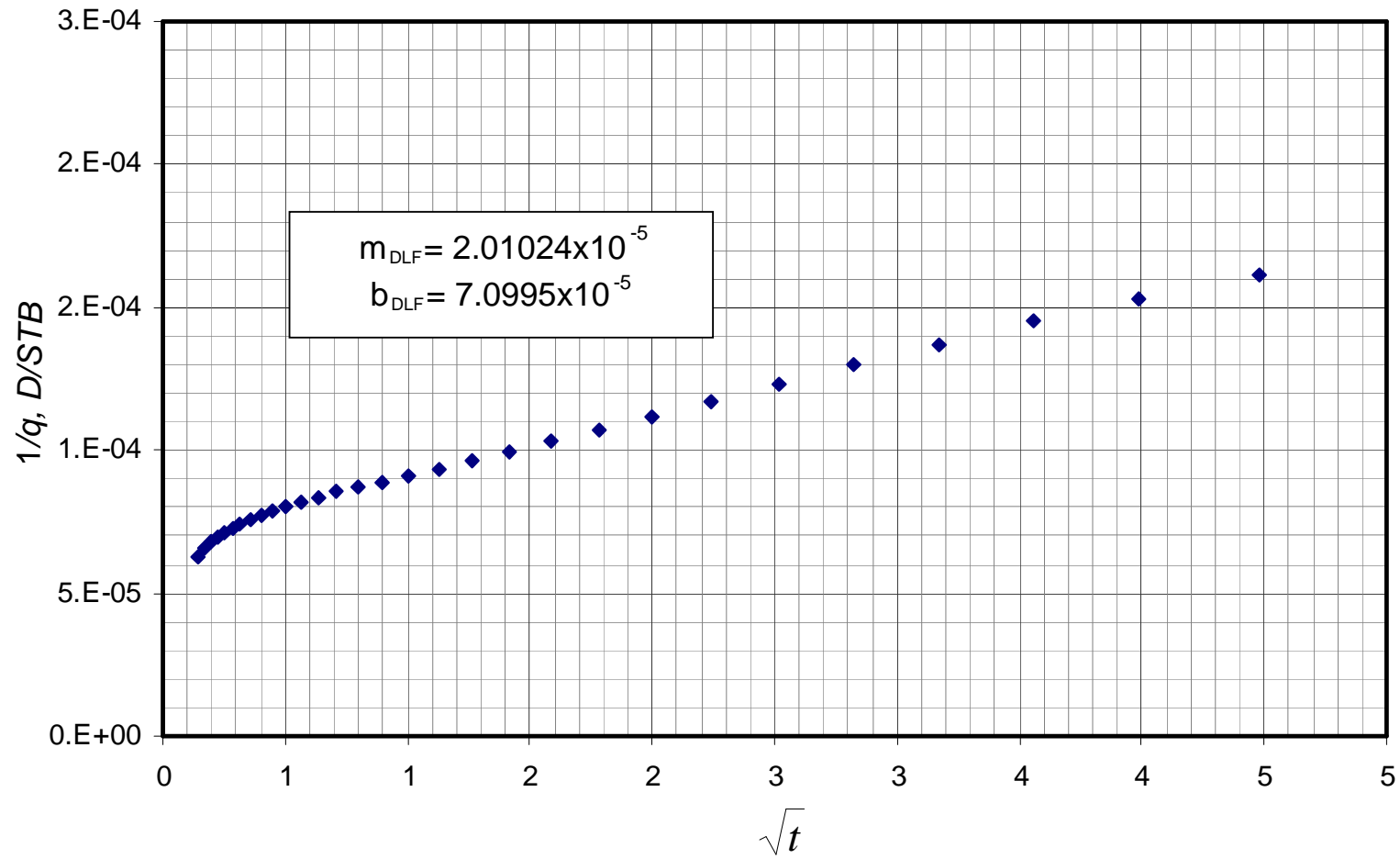


Fig. 5. Gráfico cartesiano del recíproco del caudal en función de la raíz del tiempo para el ejemplo simulado 1 (yacimientos homogéneos)

EJEMPLO SIMULADO 2 (YACIMIENTO HOMOGÉNEO)

Se simuló una prueba de caudal en un pozo dentro de un yacimiento rectangular cerrado con los siguientes datos:

| | | | |
|--|----------------|-----------------|------------------------------|
| $\Delta P = 5000$ psi | $\mu = 2$ cp | $\phi = 20$ % | $B = 1.2$ rb/STB |
| $c_t = 1 \times 10^{-6}$ psi ⁻¹ | $r_w = 0.5$ ft | $h = 100$ ft | $X_E = 16000$ ft |
| $Y_E = 500$ ft | $k = 50$ md | $\omega = 0.01$ | $\lambda = 1 \times 10^{-8}$ |

De la Fig. 6 se determinaron los siguientes datos:

| | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| $m_{DLF} = 2.2866 \times 10^{-5}$ | $b_{DLF} = 6.5353 \times 10^{-5}$ |
| $m_{LF} = 7.3243 \times 10^{-5}$ | $b_{LF} = -0.0004232$ |

Se encuentra el valor del ancho del yacimiento con la siguiente ecuación, teniendo el valor de m_{DLF} y m_{LF} que son la pendiente del gráfico del recíproco del caudal en función de $t^{0.5}$.

$$Y_E = \frac{10.1602B}{h\Delta P m_{DLF}} \sqrt{\frac{\mu}{\phi k c_t}} = \frac{10.1602(1.2)}{(100)(5000)(2.2866 \times 10^{-5})} \sqrt{\frac{2}{(0.2)(50)(1 \times 10^{-6})}} = 476.91 \text{ ft}$$

$$Y_E = \frac{28.8137B}{h\Delta P m_{LF}} \sqrt{\frac{\mu}{\phi k c_t}} = \frac{28.8137(1.2)}{(100)(5000)(7.3243 \times 10^{-5})} \sqrt{\frac{2}{(0.2)(50)(1 \times 10^{-6})}} = 422.23 \text{ ft}$$

El daño se determina con el valor del corte con el eje Y, b_{DLF} y b_{LF} de la gráfica del recíproco del caudal en función de $t^{0.5}$.

$$s_{DL} = \frac{kh\Delta P b_{DLF}}{141.2\mu B} = \frac{(50)(100)(5000)(6.5353 \times 10^{-5})}{141.2(2)(1.2)} = 4.82$$

$$s_L = \frac{kh\Delta P b_{LF}}{141.2\mu B} = \frac{(50)(100)(5000)(-0.0004232)}{141.2(2)(1.2)} = -31.22$$

Al comparar con los resultados de la simulación con los obtenidos por el método de TDST y el del método convencional existe una diferencia en cuanto a los valores del ancho de yacimiento ya que los flujos presentes no se encuentran muy bien definidos.

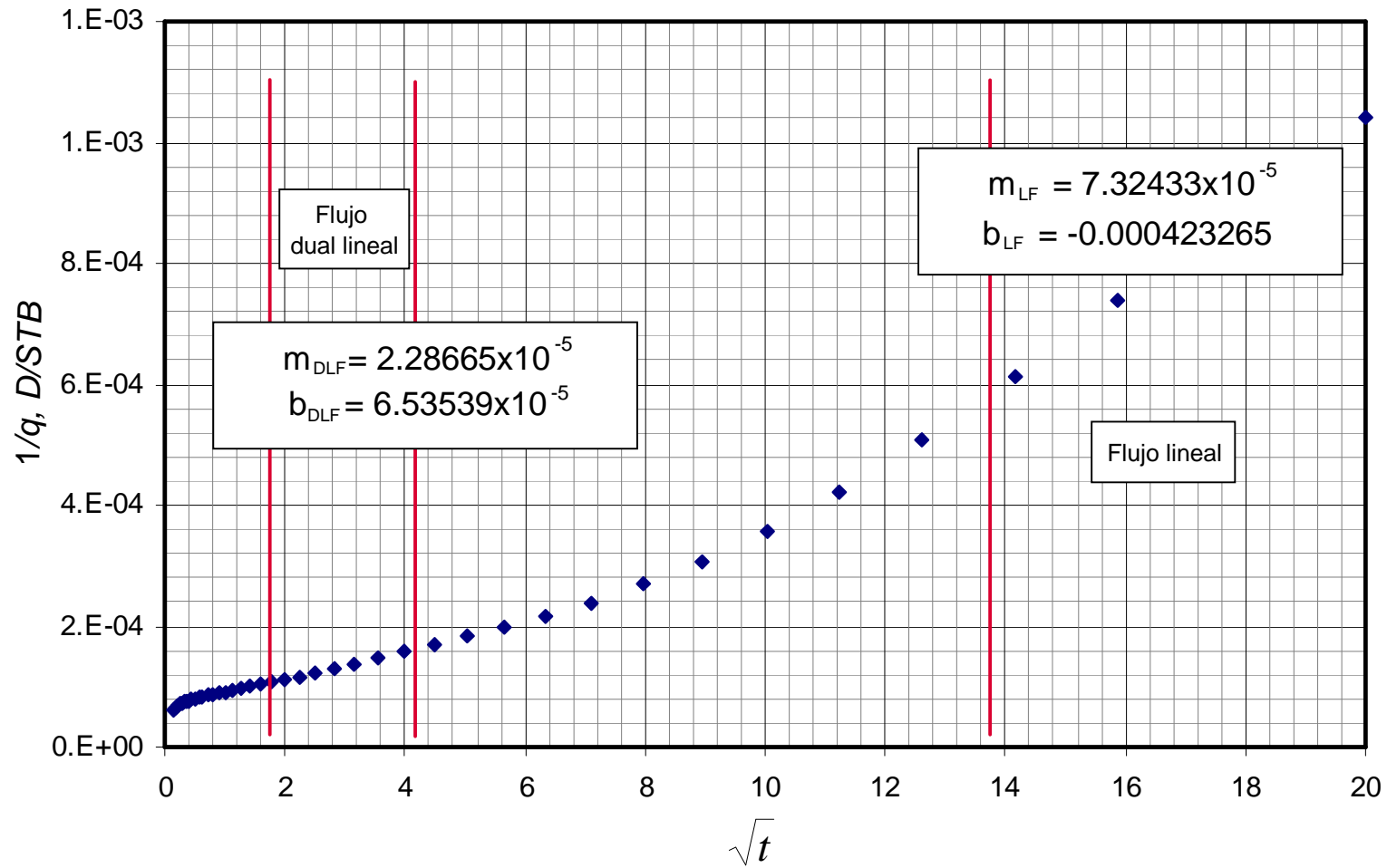


Fig. 6. Gráfico cartesiano del recíproco del caudal en función de la raíz del tiempo para el ejemplo simulado 2 (yacimientos homogéneos)

EJEMPLO REAL (YACIMIENTOS HOMOGÉNEOS)

El presente ejemplo se tomó de una prueba de caudal generada en un pozo de petróleo que produce de la formación Tiger Ridge ubicado en Montana, los datos de roca y fluido se presentan a continuación.

Presión de Yacimiento, $P_i = 1706$ psi
Presión en cabeza de pozo, $P_{wf} = 1500$ psi
Espesor de la formación, $h = 30$ Pies
Permeabilidad, $k = 5$ md
Compresibilidad de la formación, $c_t = 5.2 \times 10^{-4}$ psi⁻¹
Radio del pozo, $r_w = 0.51$ pies
Porosidad, $\phi = 15$ %
Factor volumétrico, $B_o = 1.151$ rb/STB
Viscosidad del aceite, $\mu = 2$ cp

De la Fig. 7 se determinaron los siguientes datos:

$$m_{DLF} = 0.047577$$

$$b_{DLF} = 0.112396$$

Se encuentra el valor del ancho del yacimiento con la siguiente ecuación, teniendo el valor de m_{DLF} que es la pendiente del gráfico del recíproco del caudal en función de $t^{0.5}$.

$$Y_E = \frac{10.1602B}{h\Delta P m_{DLF}} \sqrt{\frac{\mu}{\phi k c_t}} = \frac{10.1602(1.151)}{(30)(206)(0.047577)} \sqrt{\frac{2}{(0.15)(5)(5.2 \times 10^{-4})}} = 2.848 \text{ ft}$$

El daño se determina con el valor del corte con el eje Y , b_{DLF} de la gráfica del recíproco del caudal en función de $t^{0.5}$.

$$s_{DL} = \frac{kh\Delta P b_{DLF}}{141.2\mu B} = \frac{(5)(30)(206)(0.112396)}{141.2(2)(1.151)} = 10.684$$

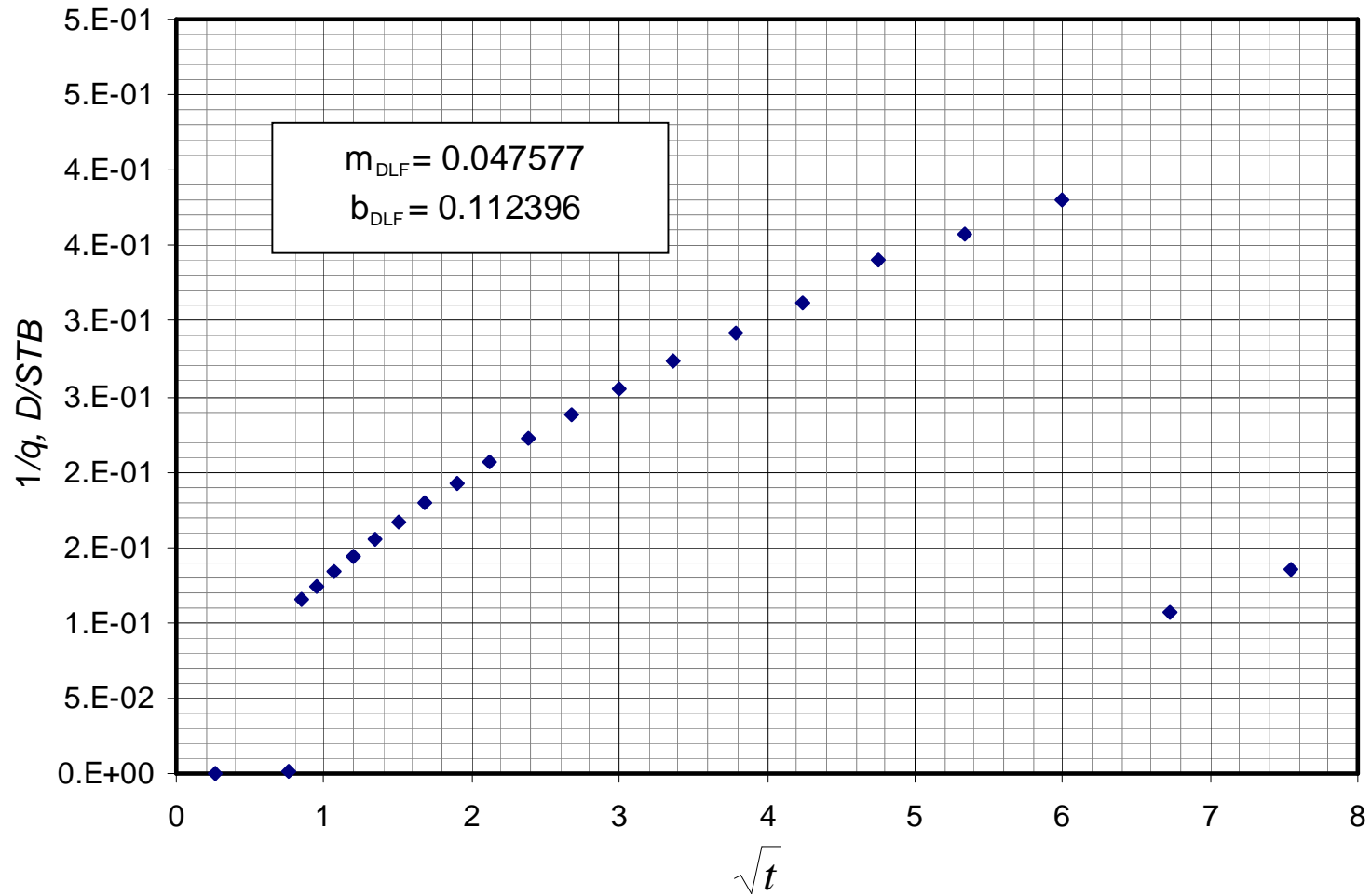


Fig. 7. Gráfico cartesiano del recíproco del caudal en función de la raíz del tiempo para el ejemplo real (yacimientos homogéneos)

EJEMPLO SIMULADO 1 (YACIMIENTO HETEROGÉNEO)

Del yacimiento y del pozo se conocen los siguientes datos:

| | | | |
|--------------------------------|----------------|------------------------------|------------------|
| $\Delta P = 2500$ psi | $\mu = 2$ cp | $\phi = 20$ % | $B = 1.2$ rb/STB |
| $c_t = 1 \times 10^{-6}$ psi-1 | $r_w = 0.5$ ft | $h = 100$ ft | $X_E = 20000$ ft |
| $Y_E = 1000$ ft | $k = 50$ md | $\lambda = 5 \times 10^{-8}$ | $\omega = 0.02$ |

De la Fig. 8 y 9 se determinaron los siguientes datos:

$$m_{DLF} = 0.000128792 \qquad b_{DLF} = 9.03618 \times 10^{-5}$$

Se calcula el ancho de yacimiento:

$$Y_E = \frac{9.1442B}{h\Delta P m_{DLF}} \sqrt{\frac{\mu}{\omega\phi k c_t}} = \frac{9.1442(1.2)}{(100)(2500)(0.000128792)} \sqrt{\frac{2}{(0.02)(0.2)(50)(1 \times 10^{-6})}} = 1077.70 \text{ ft}$$

El daño se determina con el valor del corte con el eje Y , b_{DLF} de la gráfica del recíproco del caudal en función de $t^{0.5}$.

$$s_{DL} = \frac{kh\Delta P b_{DLF}}{141.2\mu B} = \frac{(50)(100)(2500)(9.03618 \times 10^{-5})}{141.2(2)(1.2)} = 3.33$$

$$\omega = \frac{a + bx + cx^2 + dy}{1 + ex + fy + gy^2 + hy^3}$$

$$\omega = 0.0283$$

Donde: $x = 5.120045$ y $y = 5.5872$

$$\lambda = \frac{3792(\phi c_t)_i \mu r_w^2}{k \Delta t_{inf}} \left[\omega \ln \left(\frac{1}{\omega} \right) \right]$$

$$\lambda = \frac{3792 \times 0.2 \times 1 \times 10^{-6} \times 2 \times 0.5^2}{50 \times 10.047546} \left[0.02 \ln \left(\frac{1}{0.02} \right) \right] = 5.06 \times 10^{-8}$$

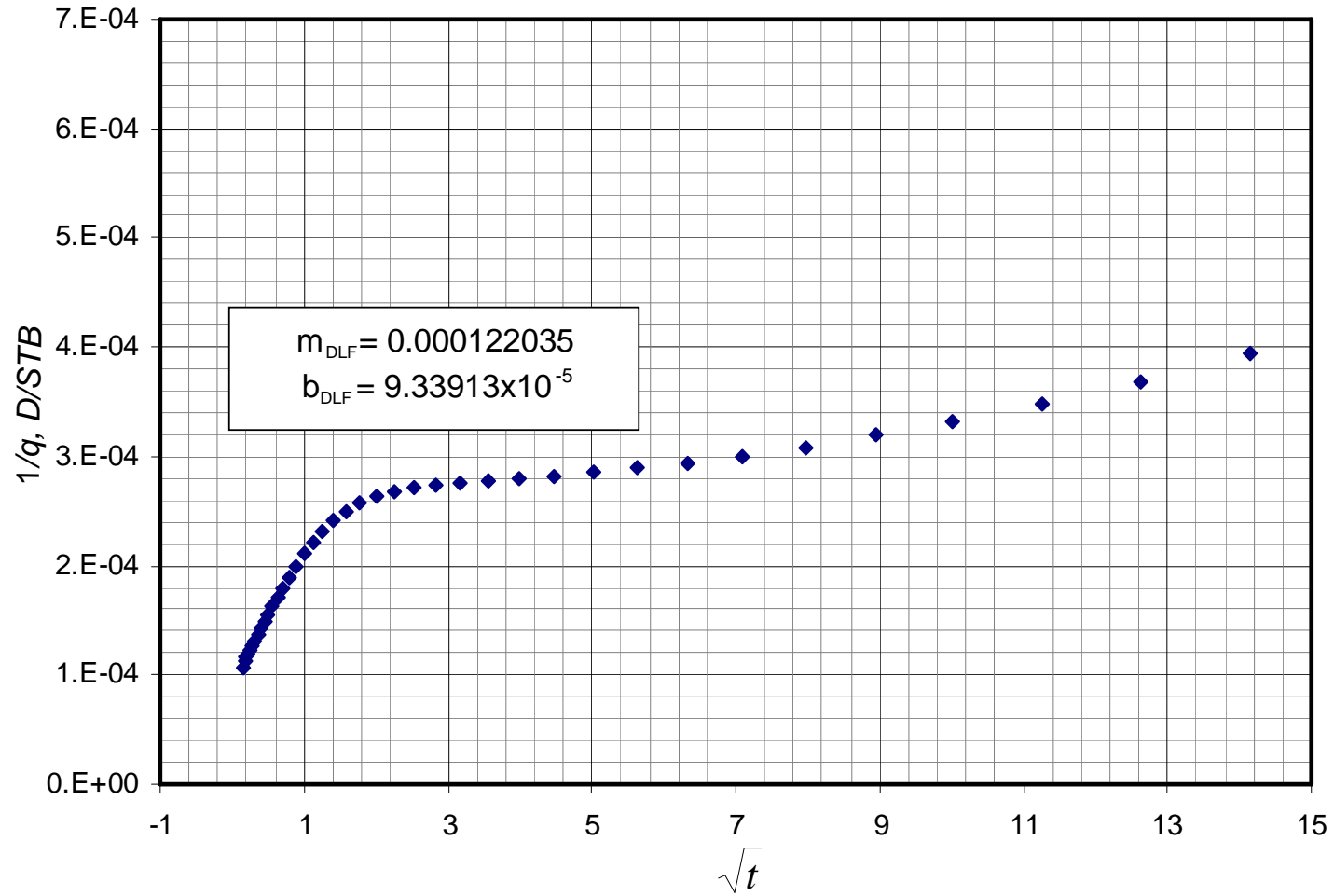


Fig. 8. Gráfico cartesiano del recíproco del caudal en función de la raíz del tiempo para el ejemplo simulado 1 (yacimientos heterogéneos)

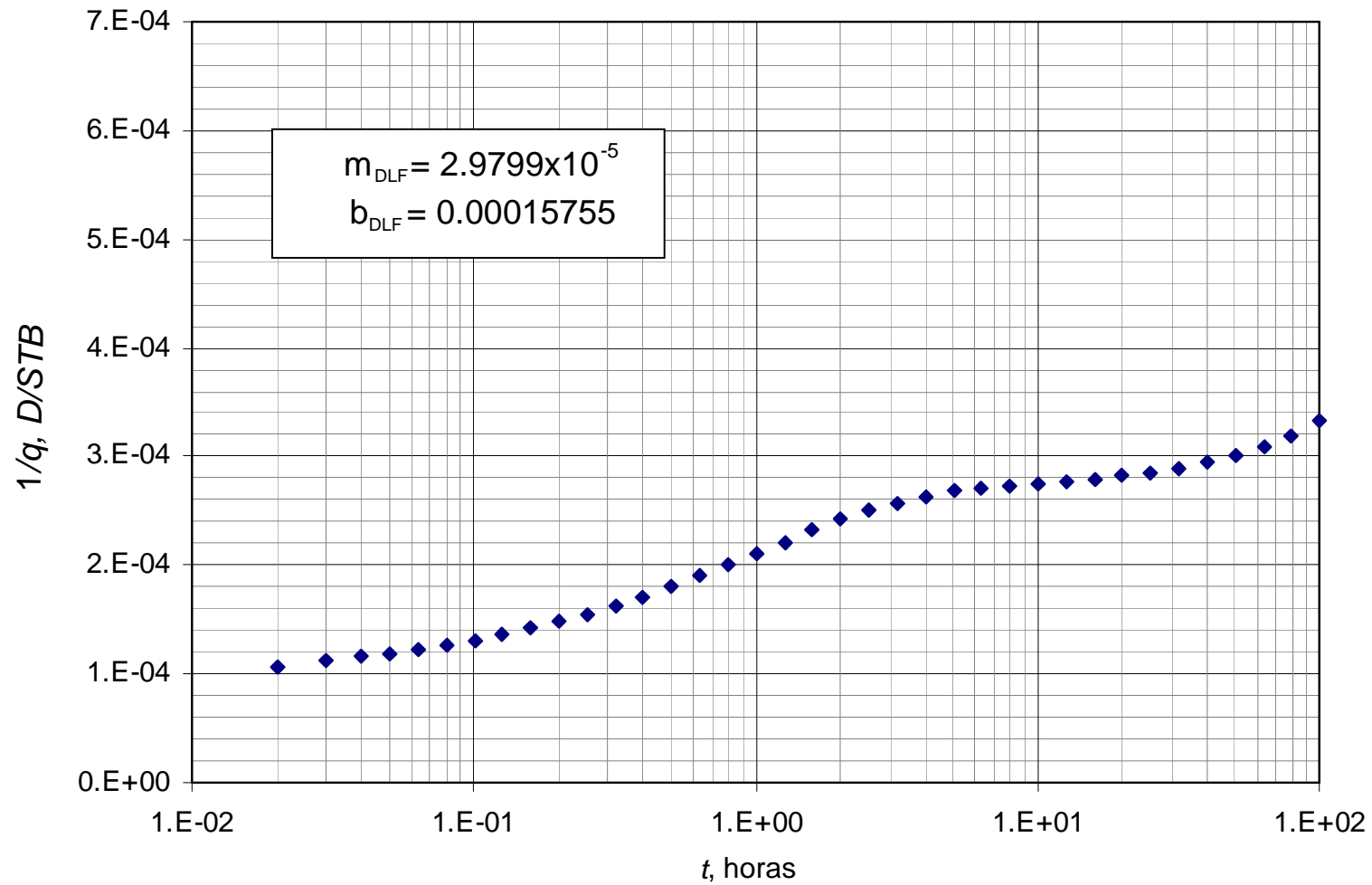


Fig. 9. Gráfico semilogarítmico del recíproco del caudal en función del tiempo para el ejemplo simulado 1 (yacimientos heterogéneos)

EJEMPLO SIMULADO 2 (YACIMIENTO HETEROGÉNEO)

Se tiene una prueba de caudal en un pozo dentro de un yacimiento cerrado rectangular. Con los siguientes datos:

| | | | |
|--|----------------|-------------------------------|-------------------|
| $\Delta P = 2500$ psi | $\mu = 2$ cp | $\phi = 20$ % | $B = 1.2$ rb/STB |
| $c_i = 1 \times 10^{-6}$ psi ⁻¹ | $r_w = 0.5$ ft | $h = 100$ ft | $X_E = 680000$ ft |
| $Y_E = 1000$ ft | $k = 50$ md | $\lambda = 4 \times 10^{-11}$ | $\omega = 0.1$ |

De la Fig. 10 y 11 se determinaron los siguientes datos:

$$m_{LF} = 9.4782 \times 10^{-5} \qquad b_{LF} = -5.185 \times 10^{-5}$$

Se encuentra el valor del ancho del yacimiento con la siguiente ecuación, teniendo el valor de m_{LF} que es la pendiente del grafico del recíproco del caudal en función de $t^{0.5}$.

$$Y_E = \frac{17.0692B}{h\Delta P m_{LF}} \sqrt{\frac{\mu}{\omega\phi k c_i}} = \frac{17.0692(1.2)}{(100)(2500)(9.4782 \times 10^{-5})} \sqrt{\frac{2}{(0.1)(0.2)(50)(1 \times 10^{-6})}} = 1222.48 \text{ ft}$$

El daño se determina con el valor del corte con el eje Y, b_{LF} de la gráfica del recíproco del caudal versus $t^{0.5}$.

$$s_L = \frac{kh\Delta P b_{LF}}{141.2\mu B} = \frac{(50)(100)(5000)(-5.185 \times 10^{-5})}{141.2(2)(1.2)} = -1.92$$

$$\omega = \frac{a + bx + cx^2 + dy}{1 + ex + fy + gy^2 + hy^3}$$

$$\omega = 0.004$$

Donde: $x = 5.120045$ y $y = 9.524$

$$\lambda = \frac{3792(\phi c_i)_t \mu r_w^2}{k \Delta t_{inf}} \left[\omega \ln \left(\frac{1}{\omega} \right) \right]$$

$$\lambda = \frac{3792 \times 0.2 \times 1 \times 10^{-6} \times 2 \times 0.5^2}{50 \times 64} \left[0.1 \ln \left(\frac{1}{0.1} \right) \right] = 3.9467 \times 10^{-10}$$

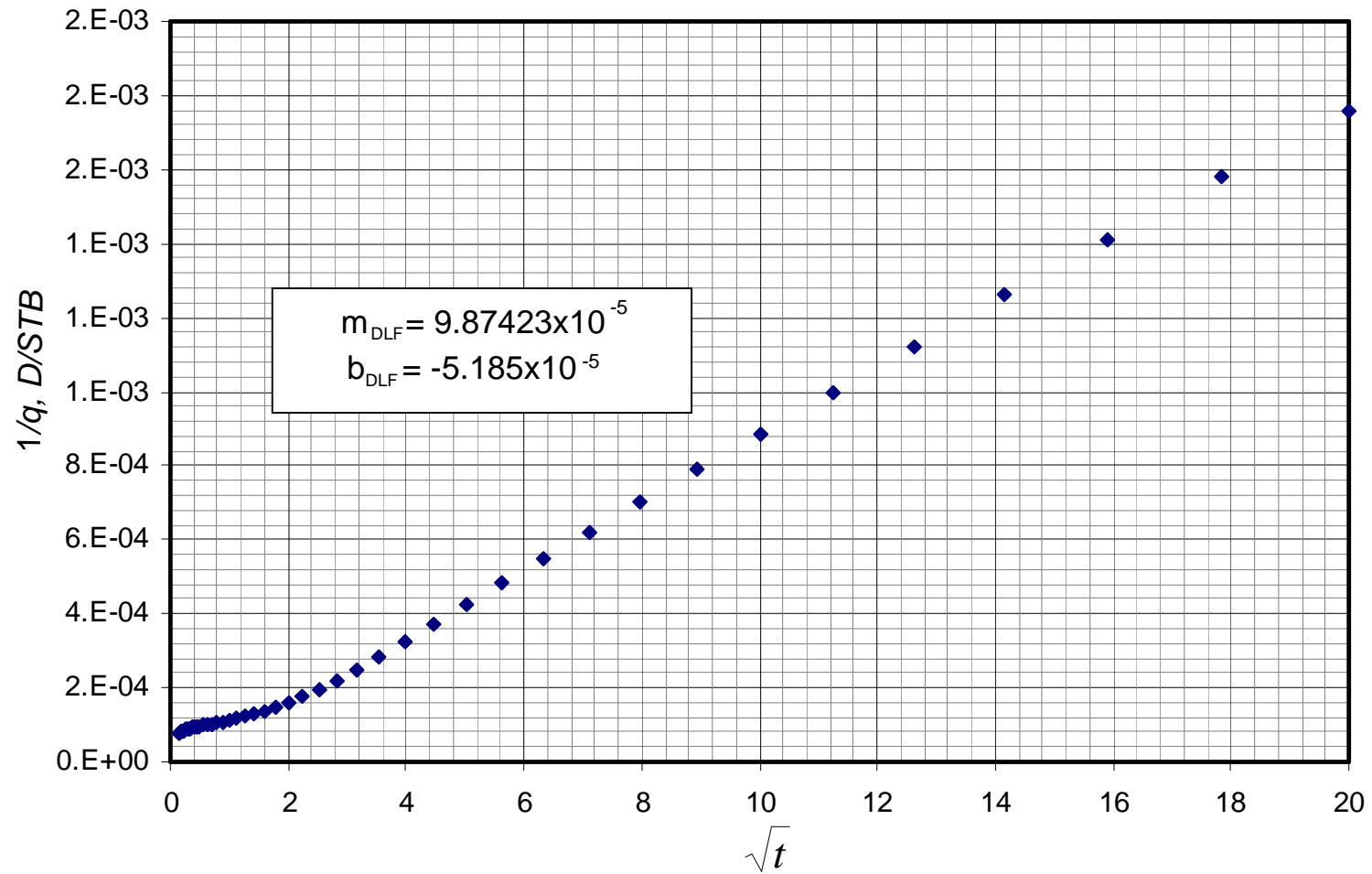


Fig. 10. Gráfico cartesiano del recíproco del caudal en función de la raíz del tiempo para el ejemplo simulado 2 (yacimientos heterogéneos)

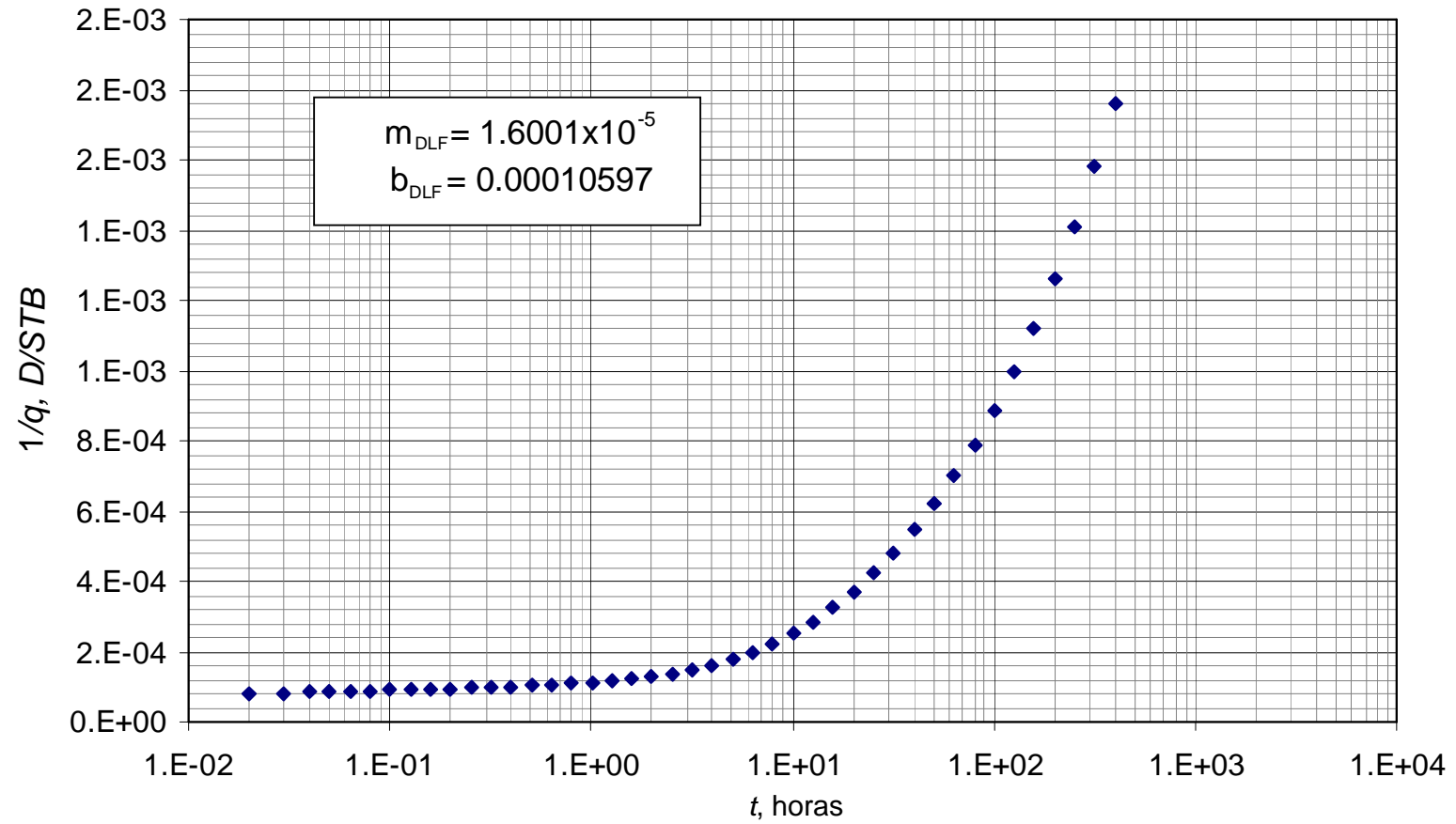


Fig. 11. Gráfico semilogarítmico del recíproco del caudal en función del tiempo para el ejemplo simulado 2 (yacimientos heterogéneos)