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

Neiva, 06 de Abril de 2016

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Nicolás Manuel Cortés Arias , con C.C. No. 1075272493 ,

Oscar David Pabón Pascuas , con C.C. No. 1075277283 ,

_____, con C.C. No. _____,

_____, con C.C. No. _____,

autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA TDS (TIAB'S DIRECT SYNTHESIS) EN PRUEBAS DE PRESIÓN Y PRUEBAS DE CAUDAL PARA POZOS HORIZONTALES EN YACIMIENTOS HOMOGENEOS ANISOTRÓPICOS DE HIDROCARBUROS presentado y aprobado en el año 2016 como requisito para optar al título de Ingeniero de petróleos;

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

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

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

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

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



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

CARTA DE AUTORIZACIÓN



CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 2
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:






Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS				   		
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 5

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Cortés Arias	Nicolás Manuel
Pabón Pascuas	Oscar David

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Escobar Macualo	Freddy Humberto

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero de Petróleos

FACULTAD: Facultad de Ingeniería





PROGRAMA O POSGRADO: Programa de Ingeniería de Petróleos

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2016

NÚMERO DE PÁGINAS: 254

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS				 IC 7384-1	 GP 305-1	 CO-IC 7384-1
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 5

Diagramas x Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general x Grabados___ Láminas___
Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas o Cuadros x

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

MATERIAL ANEXO:

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

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:





<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Pozo Horizontal	Horizontal Well	6. Pruebas de caudal	Rate testing
2. Anisotropía	Anisotropy	7. Pruebas de Presión	Pressure testing
3. Flujo Hemilinear	Hemilinear Flow	8. _____	_____
4. Flujo Parabólico	Parabolic Flow	9. _____	_____
5. Técnica TDS	TDS Technique	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

La aplicación de pruebas de presión y pruebas de caudal radica en ofrecer al ingeniero una manera confiable de caracterizar su yacimiento, definiendo parámetros. Sin embargo, se evidencia la falta de métodos comprobados en la interpretación de estos tipos de pruebas en pozos horizontales.

Se lleva a cabo una ampliación de la metodología TDS en pruebas de presión y de la misma en pruebas de caudal para aplicación en pozos horizontales en yacimientos homogéneos anisotrópicos de hidrocarburos. Adicionalmente se generaron ecuaciones con la metodología TDS para pruebas presión y caudal de gas con pozos horizontales.





Habiendo generado las ecuaciones representativas para los distintos flujos en pozos horizontales dentro yacimientos de aceite tales como: 1.) Flujo Radial Temprano, 2) Flujo Lineal Temprano, 3) Flujo Elíptico, 4) Flujo Radial Tardío, 5) Flujo Lineal Tardío, 6) Flujo Hemilineal, 7) Flujo Parabólico, 8) Cinco Casos de Flujo Estable y 9) Flujo Pseudoestable para el caso de pruebas de caudal, y para el caso de pruebas de presión son generadas desde el Flujo Hemilineal en adelante;

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 5

para el caso de pozos horizontales en yacimientos de gas se generaron fórmulas para todos los flujos tanto para pruebas de presión como para pruebas de caudal. Se desarrollaron ejercicios sintéticos para verificar la confiabilidad de las mismas. Se encuentra que los resultados obtenidos poseían un bajo porcentaje de error con respecto a los valores reales y que pueden ser utilizadas en pruebas reales con una desviación poco significativa.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)





The application of Pressure testing and Rate testing lies in offering the engineer a reliable way to characterize the Reservoir, defining parameters. However, the lack of proven methods in the

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	4 de 5

interpretation of these types of tests in horizontal wells.

It is performed an extension of the TDS technique in pressure testing and development thereof in rate testing for application in horizontal wells in homogeneous anisotropic hydrocarbon reservoirs. Additionally, equations with the TDS technique for both pressure testing and rate testing in homogeneous anisotropic gas reservoirs with horizontal wells were generated, the same ones that currently exist and to be developed in oilfields.

Having generated the representative equations for the different flows in horizontal wells in oil fields such as: 1) Early Radial flow, 2) Early Linear Flow 3) Elliptic Flow 4) Late Radial Flow 5) Late Linear Flow, 6) Hemilineal Flow, 7) Parabolic Flow, 8) five cases of Steady Flow and 9) Pseudosteady Flow in the case of rate testing, in the case of pressure testing generated formulas for the Hemilineal flow onwards and in the case of horizontal wells in gas fields, formulas for all flows for both pressure testing as rate testing, synthetic examples for both pressure testing as Rate testing were generated in oil and gas reservoirs to verify their reliability. It is found that the results obtained with the equations possess a Low percentage of error for the actual values and can be used in actual tests with little significant deviation.

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	5 de 5

APROBACION DE LA TESIS

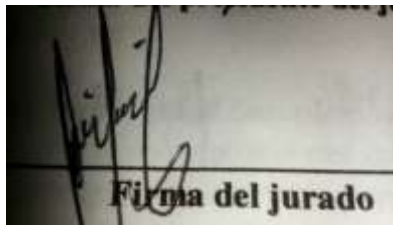
Nombre Presidente Jurado: Freddy Humberto Escobar Macualo



Firma del presidente del jurado

Firma:

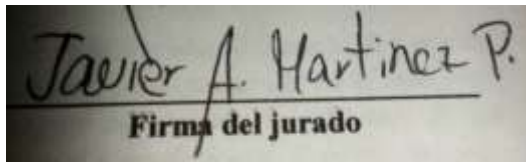
Nombre Jurado: Jairo Antonio Sepúlveda Gaona



Firma del jurado

Firma:

Nombre Jurado: Javier Andrés Martínez Pérez



Firma del jurado

Firma:

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



**APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA TDS (TIAB'S DIRECT SYNTHESIS) EN
PRUEBAS DE PRESIÓN Y PRUEBAS DE CAUDAL PARA POZOS
HORIZONTALES EN YACIMIENTOS HOMOGÉNEOS ANISOTRÓPICOS DE
HIDROCARBUROS.**

PRESENTADO POR:

**NICOLÁS MANUEL CORTÉS ARIAS
OSCAR DAVID PABÓN PASCUAS**

Neiva, Huila Marzo de 2016

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Neiva, 14 de Marzo de 2016

DEDICATORIA

Es para mí muy importante, y antes aue todO, quiero agradecer a Dios por darme la vida, la salud, la fuerza, la constancia y la disciplina necesaria para culminar este proyecto, fruto de mi tezonero esfuerzo y un gran logro para mi proyecto de vida, gracias al apoyo permanente mi familia quienes son partícipes de esta meta.

Mi padre Omar Pabón Monroy, siempre fue mi guía, a los largo de todos mis años siempre a estado a mi lado para darme el apoyo, siempre con amor. Gracias a ti papá, por tu respaldo en este propósito, por su apoyo continuo y compromiso total. A mi madre, Esperanza Pascuas Perdomo, por guiarme en la vida con amor y ternura, por todos y cada uno de sus sacrificios en este largo camino, por su paciencia y soporte constante en cada momento de dificultad.

A mi hermana, Natalia Esperanza por su compañía continua, por enseñarme con cariño la nobleza de la hermandad, por cada palabra de aliento y sus valiosas muestras de afecto. A mi hermano Omar Sebastian por su preocupación y sus buenas energías aún desde la lejanía. A toda mi familia por haberme apoyado durante toda la carrera con sus palabras de ánimo y motivación constante. A mi mascota Cook por su compañía en las largas noches de trabajo y a su predecesora Manuela quien también me acompañó durante mucho tiempo, (QEPD).

A mi compañero de tesis Nicolás Manuel Cortés, por su amistad, disciplina y compromiso con el desarrollo de esta tesis, Manuel, durante todo el proceso fuimos un gran equipo, éste es nuestro sueño y no lo hubiese logrado sin ti.

Agradezco a mis compañeros de código y Amigos de la Universidad Surcolombiana, por hacer de este trayecto un agradable y entretenido viaje, y a mis Amigos del colegio La Fragua, quienes siempre se tomaron un momento de preocupación e interés para ofrecer palabras de apoyo y llenar de motivación y buenas energías mi camino.

Ha sido para mí motivo de orgullo que el doctor Freddy Escobar Macualo, haya sido nuestro director de tesis, gracias por su apoyo permanente y su paciencia en el adelanto de este trabajo, con usted se aprende y mi visión seguir sus pasos. A cada uno de los profesores que han contribuido en mi formación personal y profesional, gracias, muchas gracias.

Oscar David Pabón

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios, quien me acompaña durante todo mi camino y siempre me da la fuerza para nunca darme por vencido a seguir luchando por mis metas.

A mis padres Jorge Eliecer Cortés y Transito Arias, quienes les debo todo lo que soy ahora, muchas gracias por su infinito amor, apoyo, compañía, comprensión hacia a mí, son y siempre serán mi ejemplo y mi orgullo. Los amo mucho.

A mi hermanito Juan Diego y Sobrina Laura Sofía, a quienes amo mucho y siempre están acompañándome y apoyándome sin importar las adversidades.

A Tatiana Ortiz, quien me apoya todo el tiempo sin importar la situación, gracias por tu amor, respeto, confianza y compañía, te dedico esta meta y muchas más que compartiremos juntos. Dios te bendiga hoy y siempre.

A mis abuelitos Tulia Prieto y Jorge Cortés por ser personas que siempre han confiado en mí y han estado para apoyarme en las adversidades y darme alientos en todo momento. Los amo mucho, Que Dios los bendiga.

A mi compañero de tesis, Oscar David Pabón, a quien considero como un hermano, gracias por todo. Desde transición como amigos, Dios mediante nuestra amistad perdurará hasta el final.

Agradezco a mis mejores Amigos del colegio (Jorge, Harold, Oscar, Freddy, Herny, Yiyi, Villeloco, Marin, Fefe, Tix,) por su amistad y palabras de apoyo.

Agradezco mis mejores amigos de la Universidad Juan Pablo y Juan Luis, Quienes compartimos muchas aventuras estudiando arduamente.

A mi excelente profesor y Director de tesis Freddy Humberto Escobar Macualo, gracias por su paciencia y por siempre darnos la mano cuando la necesitábamos, siento mucha gratitud y aprecio mucho su amistad.

Nicolás Manuel Cortés

RESUMEN

La aplicación de pruebas de presión y pruebas de caudal radica en ofrecer al ingeniero una manera confiable de caracterizar su yacimiento, definiendo parámetros tales como: permeabilidad en (x, y, z), área, presión promedio, daños, etc. Sin embargo, se evidencia la falta de métodos comprobados en la interpretación de estos tipos de pruebas en pozos horizontales para los cuales la geometría de flujo, área de drene y dirección de los flujos son distintos a los de los pozos verticales.

Se lleva a cabo una ampliación de la metodología TDS en pruebas de presión y de la misma en pruebas de caudal para aplicación en pozos horizontales en yacimientos homogéneos anisotrópicos de hidrocarburos. Adicionalmente se generaron ecuaciones con la metodología TDS para pruebas PTA y RTA en yacimientos homogéneos anisotrópicos de gas con pozos horizontales, las mismas que actualmente ya existen y que se desarrollarán en yacimientos de petróleo.

Habiendo generado las ecuaciones representativas para los distintos flujos en pozos horizontales dentro yacimientos de aceite tales como: 1.) Flujo Radial Temprano, 2) Flujo Lineal Temprano, 3) Flujo Elíptico, 4) Flujo Radial Tardío, 5) Flujo Lineal Tardío, 6) Flujo Hemilineal, 7) Flujo Parabólico, 8) Cinco Casos de Flujo Estable y 9) Flujo Pseudoestable para el caso de pruebas de caudal, y para el caso de pruebas de presión son generadas desde el Flujo Hemilineal en adelante; para el caso de pozos horizontales en yacimientos de gas se generaron fórmulas para todos los flujos tanto para pruebas de presión como para pruebas de caudal. Se desarrollaron ejercicios sintéticos tanto de pruebas de presión como de pruebas de caudal generadas tanto para yacimientos de aceite como para yacimientos de gas, para verificar la confiabilidad de las mismas. Se encuentra que los resultados obtenidos con las ecuaciones poseían un alto grado de tolerancia con respecto a los valores reales y que pueden ser utilizadas en pruebas reales con una desviación poco significativa.

ABSTRACT

The application of transient-pressure testing and transient-rate testing lies in offering the engineer a reliable way to characterize the deposit, defining parameters such as permeability (x, y, z), area, average pressure, skin factor, etc. However, the lack of proven methods in the interpretation of these types of tests for horizontal wells for which the flow geometry, draining area and direction of flows are different from those of vertical wells is evident.

It is performed an extension of the TDS methodology in pressure testing and development thereof in flow testing for application in horizontal wells in homogeneous anisotropic hydrocarbon deposits. Additionally, equations with the TDS methodology for both PTA testing and RTA testing in homogeneous anisotropic gas reservoirs with horizontal wells were generated, the same ones that currently exist and to be developed in oilfields.

Having generated the representative equations for the different flows in horizontal wells in oil fields such as: 1) Early Radial flow, 2) Early Linear Flow 3) Elliptic Flow 4) Late Radial Flow 5) Late Linear Flow, 6) Hemilineal Flow, 7) Parabolic Flow, 8) five cases of Steady Flow and 9) Pseudosteady Flow in the case of flow testing, in the case of pressure testing generated formulas for the Hemilineal flow onwards and in the case of horizontal wells in gas fields, formulas for all flows for both pressure testing as flow testing, synthetic examples for both transient-pressure testing as transient-rate testing were generated in oil and gas deposits to verify their reliability. It is found that the results obtained with the equations possess a high degree of tolerance for the actual values and can be used in actual tests with little significant deviation.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. CAPÍTULO I. ANÁLISIS DE TRASIENTE DE PRESIÓN.	15
1.1. ANÁLISIS DE TRASIENTE DE PRESIÓN EN YACIMIENTOS DE ACEITE.	16
1.1.1. ECUACIONES DE FLUJO EN POZOS HORIZONTALES EN YACIMIENTOS DE ACEITE (PTA).	16
1.1.1.1. Flujo Radial Temprano (Early Radial (er)):	16
1.1.1.2. Flujo Lineal Temprano (Early Linear (el)):	17
1.1.1.3. Flujo Elíptico (Elliptical (Ell)):	18
1.1.1.4. Flujo Pseudorradial o Flujo Radial Tardío (Pseudorradial (pr)):	19
1.1.1.5. Flujo Lineal Tardío (Late linear (ll)):	20
1.1.1.6. Flujo Hemilineal (Hemilinear (hl)).	21
1.1.1.7. Flujo Parabólico (Parabolic (PB)).	25
1.1.1.8. Flujo Estable (Steady State (ss)).	30
1.1.1.9. Flujo Pseudoestable (Pseudosteady State (pss)).	43
1.1.2. INTERSECCIONES YACIMIENTOS DE ACEITE (PTA).	45
1.1.2.1. Intersecciones con el Flujo Radial Temprano.	45
1.1.2.2. Intersecciones con el Primer Caso de Flujo Estable.	53
1.1.2.3. Intersecciones con el Segundo Caso de Flujo Estable.	58
1.1.2.4. Intersecciones con el Tercer Caso de Flujo Estable.	62
1.1.2.5. Intersecciones con el Cuarto Caso de Flujo Estable.	66
1.1.2.6. Intersecciones con el Quinto Caso de Flujo Estable.	71
1.1.2.7. Intersecciones con el Flujo Pseudoestable.	75
1.2. ANÁLISIS DE TRASIENTE DE PRESIÓN EN YACIMIENTOS DE GAS.	79
1.2.1. ECUACIONES DE FLUJO EN POZOS HORIZONTALES EN YACIMIENTOS DE GAS (PTA).	81
1.2.1.1. Flujo Radial Temprano (Early Radial (er)):	81
1.2.1.2. Flujo Lineal Temprano (Early Linear(el)):	83
1.2.1.3. Flujo Elíptico (Elliptical (Ell)).	85
1.2.1.4. Flujo Pseudorradial o Radial Tardío (Pseudorradial (pr)):	87
1.2.1.5. Flujo Dual Lineal o Lineal Tardío (Late linear (ll)):	88

1.2.1.6.	Flujo Hemilineal (Hemilinear (hl)):	90
1.2.1.7.	Flujo Parabólico (Parabolic (PB)).	92
1.2.1.8.	Flujo Estable (Steady State (ss)).	93
1.2.1.9.	Flujo Pseudoestable (Pseudosteady State (pss)).	97
1.2.2.	INTERSECCIONES YACIMIENTOS DE GAS (PTA).	98
1.2.2.1.	Intersecciones con el Flujo Radial Temprano.	98
1.2.2.2.	Intersecciones con el Primer Caso de Flujo Estable.	102
1.2.2.3.	Intersecciones con el Segundo Caso de Flujo Estable.	105
1.2.2.4.	Intersecciones con el Tercer Caso de Flujo Estable.	107
1.2.2.5.	Intersecciones con el Cuarto Caso de Flujo Estable.	110
1.2.2.6.	Intersecciones con el Quinto Caso de Flujo Estable.	112
1.2.2.7.	Intersecciones con el Flujo Pseudoestable.	115
2.	CAPÍTULO II. ANÁLISIS DE TRASIENTE DE CAUDAL.	118
2.1.	ANÁLISIS DE TRASIENTE DE CAUDAL EN YACIMIENTOS DE ACEITE.	118
2.1.1.	ECUACIONES DE FLUJO EN POZOS HORIZONTALES EN YACIMIENTOS DE ACEITE (RTA).	119
2.1.1.1.	Flujo Radial Temprano (Early Radial (er)):	119
2.1.1.2.	Flujo Lineal Temprano (Early Linear(el)):	120
2.1.1.3.	Flujo Elíptico (Elliptical (Ell)).	122
2.1.1.4.	Flujo Pseudorradial o Radial Tardío (Pseudorradial (pr)):	124
2.1.1.5.	Flujo Dual Lineal o Lineal Tardío (Late linear (ll)):	125
2.1.1.6.	Flujo Hemilineal (Hemilinear (hl)):	127
2.1.1.7.	Flujo Parabólico (Parabolic (PB)).	130
2.1.1.8.	Flujo Estable (Steady State (ss)).	132
2.1.1.9.	Flujo Pseudoestable (Pseudosteady State (pss)).	138
2.1.2.	INTERSECCIONES YACIMIENTOS DE ACEITE (RTA).	139
2.1.2.1.	Intersecciones con el Flujo Radial Temprano.	139
2.1.2.2.	Intersecciones con el Primer Caso de Flujo Estable.	148
2.1.2.3.	Intersecciones con el Segundo Caso de Flujo Estable	153
2.1.2.4.	Intersecciones con el Tercer Caso de Flujo Estable.	158
2.1.2.5.	Intersecciones con el Cuarto Caso de Flujo Estable.	163

2.1.2.6.	Intersecciones con el Quinto Caso de Flujo Estable.	168
2.1.2.7.	Intersecciones con el Flujo Pseudoestable.	173
2.2.	ANÁLISIS DE TRASIENTE DE CAUDAL EN YACIMIENTOS DE GAS.	178
2.2.1.	ECUACIONES DE FLUJO EN POZOS HORIZONTALES EN YACIMIENTOS DE GAS (RTA).	179
2.2.1.1.	Flujo Radial Temprano (Early Radial (er)):	179
2.2.1.2.	Flujo Lineal Temprano (Early Linear (el)).	181
2.2.1.3.	Flujo Elíptico (Elliptical (Ell)).	183
2.2.1.4.	Flujo Pseudorradial o Radial Tardío (pseudorradial (pr)).	184
2.2.1.5.	Flujo Lineal Tardío (Late Linear (ll)).	186
2.2.1.6.	Flujo Hemilineal (Hemilinear (hl)).	188
2.2.1.7.	Flujo Parabólico (Parabolic (PB)).	189
2.2.1.8.	Flujo Estable (Steady State (ss)).	191
2.2.1.9.	Flujo Pseudoestable (Pseudosteady State (pss)).	195
2.2.2.	INTERSECCIONES YACIMIENTOS DE GAS (RTA).	196
2.2.2.1.	Intersecciones con el Flujo Radial Temprano.	196
2.2.2.2.	Intersecciones con el Primer Caso de Flujo Estable.	200
2.2.2.3.	Intersecciones con el Segundo Caso de Flujo Estable.	203
2.2.2.4.	Intersecciones con el Tercer Caso de Flujo Estable.	205
2.2.2.5.	Intersecciones con el Cuarto Caso de Flujo Estable.	208
2.2.2.6.	Intersecciones con el Quinto Caso de Flujo Estable.	210
2.2.2.7.	Intersecciones con el Flujo Pseudoestable.	213
CAPÍTULO III. EJERCICIOS DE APLICACIÓN		216
CONCLUSIONES		238
RECOMENDACIONES		239
NOMENCLATURA		240
BIBLIOGRAFÍA		245
ANEXOS		246

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Flujo Hemilineal, Gráfica $(r_w/h_x)^2 t_D$ vs $(h_z/L_w) t_D * P_D'$	22
Gráfica 2. Flujo Parabólico, Gráfica $Y_D^{-1.6} (r_w/h_y)^{2.5} (L_w/h_z)^{0.11} t_D$ vs $(h_y/b_y)^{1.5} (L_w/h_z)^{0.675} t_D * P_D'$	28
Gráfica 3. Flujo Estable 1, Gráfica $Y_D^{-0.5} L_w^{0.5} h_z^{0.08} t_{DA}$ vs $Y_D^{-2.5} (h_z/L_w)^{0.67} t_D * P_D'$	31
Gráfica 4. Flujo Estable 2, Gráfica $(h_z^{0.05} L_w^{0.5} h_y^{0.55} / b_y^{0.67}) t_{DA}$ vs $(h_y/b_y)^{2.4} (h_z / L_w)^{0.65} t_D * P_D'$	33
Gráfica 5. Flujo Estable 3, Gráfica $(1/h_y^{0.7})(L_w^{0.15} / h_z^{0.25}) t_{DA}$ vs $(h_z / L_w)(h_x/h_y)^{0.8} t_D * P_D'$	36
Gráfica 6. Flujo Estable 4, Gráfica $(1/h_y^{0.7})(L_w^{0.15} / h_z^{0.25}) t_{DA}$ vs $(h_z / L_w)(h_x/h_y)^{0.8} t_D * P_D'$	39
Gráfica 7. Flujo Estable 5, Gráfica $(1/h_y^{0.7})(L_w^{0.15} / h_z^{0.25}) t_{DA}$ vs $(h_z / L_w)(h_x/h_y)^{0.8} t_D * P_D'$	41
Gráfica 8. Flujo Pseudoestable, Gráfica $(h_y^{-0.5} L_w^{0.08} / h_z^{0.25}) t_{DA}$ vs $(h_x h_z / h_y L_w) t_D * P_D'$	44
Gráfica 9. Prueba sintética 1, Gráfica t vs $\Delta P, t * \Delta P'$	229
Gráfica 10. Prueba sintética 2, Gráfica t vs $(1/q), t * (1/q)'$	234
Gráfica 11. Prueba sintética 3, Gráfica $t_d(P)$ vs $\Delta m(P), t * \Delta m(P)'$	238
Gráfica 12. Correlación del Punto Mínimo de la Derivada de Presión.	252
Gráfica 13. Correlación del Punto Mínimo de la Derivada del Recíproco del caudal	253

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Casos de Flujo Hemilineal, A) Fronteras cerradas, estado pseudoestable, B) Frontera lejana abierta, estado estable	21
Figura 2. Casos de Flujo Parabólico. A) Una frontera abierta, estado estable, B) Fronteras abiertas, estado estable	25
Figura 3. Primer caso de flujo estable. Pozo cerca de la frontera abierta y la frontera lejana abierta	30
Figura 4. Segundo caso de flujo estable. Pozo cerca de la frontera abierta y la frontera lejana cerrada	32
Figura 5. Tercer caso de flujo estable. Pozo cerca de la frontera cerrada y la frontera lejana abierta	35
Figura 6. Cuarto caso de flujo estable Pozo centrado con una frontera abierta	38
Figura 7. Quinto caso de flujo estable. Pozo centrado con ambas fronteras abiertas	40
Figura 8. Casos de Flujo Pseudoestable. Fronteras Cerradas. A) Pozo Centrado (Lineal Tardío y Pseudoestable), B) Pozo Descentrado (Hemilineal y Pseudoestable)	43

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1.a. Puntos característicos de los regímenes de flujo. Ejercicio sintético 1	219
Tabla 3.1.b. Tiempo de intersección entre regímenes de flujo. Ejercicio sintético 1	219
Tabla 3.1.c. Puntos Máximos Característicos	219
Tabla 3.1.d. Resumen de los parámetros calculados en el ejercicio sintético 1	228
Tabla 3.2.a. Puntos característicos de los regímenes de flujo. Ejercicio sintético 2	232
Tabla 3.2.b. Tiempo de intersección entre regímenes de flujo. Ejercicio sintético 2	232
Tabla 3.2.c. Puntos Máximos Característicos. Ejercicio sintético 2	232
Tabla 3.2.d. Resumen de los parámetros calculados en el ejercicio sintético 2	233
Tabla 3.3.a. Puntos característicos de los regímenes de flujo. Ejercicio sintético 3	236
Tabla 3.3.b. Resumen de los parámetros calculados en el ejercicio sintético 3	237

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. Data de la prueba de presión en yacimiento de aceite usada en el Ejemplo Sintético 1	245
ANEXO 2: Data de la prueba de caudal en yacimiento de aceite usada en el Ejemplo Sintético 2	247
ANEXO 3: Data de la prueba de presión en yacimiento de gas usada en el Ejemplo Sintético 3	249
ANEXO 4: Punto mínimo	251

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la utilización de pozos horizontales (pozos paralelos a la formación) para producción ha ido en aumento con respecto a la de los pozos verticales (pozos perpendiculares a la formación) convencionales. Esto es debido a que la complejidad de cierto tipo de formaciones que obligan al ingeniero a encontrar una manera de aumentar la producción del pozo, por lo cual se toma como alternativa el pozo horizontal a causa de encontrarse paralelo a la formación productora, por lo que posee un área de drene igual a la longitud efectiva del pozo (L_w) y con un valor significativamente mayor al que puede proveer un pozo vertical.

Diversas investigaciones han permitido interpretar con gran exactitud pruebas de presión en pozos verticales, junto con otros avances en interpretación de pruebas de caudales para el mismo tipo de pozos. En análisis de pruebas de presión en pozos horizontales, las investigaciones de modelos para el diseño e interpretación de estas pruebas han sido numerosas, por ejemplo las desarrolladas por: Daviau et al, (1985); Clonts y Ramey, (1986); Goode y Thambynayagam, (1987); Ozkan et al, (1989); Odeh y Babu, (1990); Kuchuk et al., (1990), entre otros autores. Las primeras investigaciones por Daviau et al. (1985), Clonts y Ramey (1986) y Goode y Thambynayagam (1987) revelaron el comportamiento único de Presión de Reservorio como un resultado directo de los diversos regímenes de flujo encontrados durante una prueba de presión; Engler (1996) desarrolló la metodología TDS (Tiab's Direct Synthesis) para pruebas de presión en pozos horizontales determinando los diferentes parámetros para la caracterización de un yacimiento a partir de distintos regímenes de flujo, tales como Radial Temprano, Lineal Temprano, Radial Tardío (Pseudorradial) y Lineal Tardío. Freddy Escobar (2008) realizó un estudio aplicando la metodología TDS en pozos horizontales en el régimen de flujo elíptico.

En este documento se propone una ampliación de la metodología TDS formulando ecuaciones que permitan la caracterización y estudio de pruebas de presión (Análisis de trasiente de presión) y de pruebas de caudal (Análisis de trasiente de caudal) aplicadas a pozos horizontales en yacimientos homogéneos anisotrópicos de hidrocarburos, por medio de modelos numéricos desarrollados a partir del uso de simuladores de gran exactitud. Éstas ecuaciones deben ser confiables para calcular parámetros característicos del yacimiento como las permeabilidades en las direcciones (x, y, z), la longitud del pozo, el ancho del yacimiento, la excentricidad del pozo con respecto al yacimiento entre otros. Para pruebas PTA se plantearon ecuaciones de los siguientes flujos: 1) Flujo Hemilineal, 2) Flujo Parabólico, 3) Cinco Casos de Flujo Estable y 4) Flujo Pseudoestable. Para el caso de pruebas RTA se generaron completamente todas las ecuaciones de flujo tales como: 1.) Flujo Radial Temprano, 2) Flujo Lineal Temprano, 3) Flujo Elíptico, 4) Flujo Radial Tardío, 5) Flujo Lineal Tardío, 6) Flujo Hemilineal, 7) Flujo Parabólico, 8) Cinco Casos de Flujo Estable y 9) Flujo Pseudoestable.

1. CAPÍTULO I. ANÁLISIS DE TRASIENTE DE PRESIÓN.

Tomando las variables adimensionales formuladas por Engler y Tiab (1996), las cuales permiten convertir los valores adimensionales en dimensionales:

Presión adimensional:

$$P_D = \frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 q \mu B} \quad (1.1.1)$$

Derivada de la presión adimensional:

$$t_D * P_D' = \frac{k_y L_w}{141.2 q \mu B} [t * \Delta P'] \quad (1.1.2)$$

Tiempo adimensional:

$$t_D = \frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \quad (1.1.3)$$

$$t_{DA} = t_D \frac{r_w^2}{A} = \frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} \quad (1.1.4)$$

$$t_{Dh_y} = t_D \frac{r_w^2}{h_y^2} = \frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t h_y^2} \quad (1.1.5)$$

Ancho adimensional:

$$W_D = \frac{h_y}{r_w} \quad (1.1.6)$$

Posición de pozo:

$$X_D = \frac{2b_x}{h_x} \quad (1.1.7)$$

$$Y_D = \frac{2b_y}{h_y} \quad (1.1.8)$$

1.1. ANÁLISIS DE TRASIENTE DE PRESIÓN EN YACIMIENTOS DE ACEITE.

1.1.1. ECUACIONES DE FLUJO EN POZOS HORIZONTALES EN YACIMIENTOS DE ACEITE (PTA).

1.1.1.1. Flujo Radial Temprano (Early Radial (er)):

Este es el primer flujo en formarse en el momento de la perturbación de las ondas de presión dentro del yacimiento, probablemente debidas a la puesta en producción del pozo o por algún otro motivo externo.

Se evidencia al poco tiempo de ocurrida la perturbación y se desplaza a través del plano YZ (perpendicular al pozo). El régimen de flujo se extiende si el espesor del yacimiento (h_z) es grande en comparación con la longitud del pozo (L_w), o si la permeabilidad vertical (k_y) es baja, debido a que esto retardaría la onda de presión a llegar a la frontera superior o inferior dando por terminado el flujo.

Las siguientes ecuaciones de flujo son tomadas de la tesis doctoral de Engler (1995):
La ecuación adimensional gobernante de este régimen de flujo para el caso de pruebas de presión es:

$$P_{D_{er}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left[\ln \left(\sqrt{\frac{k_z}{k_y}} t_{D_{er}} \right) + 0.80907 + 2s_m \right] \quad (1.1.9)$$

La derivada de la Ec. (1.1.9) es:

$$(t_D * P_D')_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Reemplazando la expresión de la derivada de presión adimensional, Ec. (1.1.2), en la Ec. (1.1.10), se obtiene la ecuación resultante para el producto $(k_y k_z)^{0.5}$ en donde $(t^* \Delta P')_{er1}$ es la derivada de presión de flujo radial temprano, leído a $t=1$ hr.

$$\sqrt{k_y k_z} = \left(\frac{70.6q\mu B}{L_w (t^* \Delta P')_{er1}} \right) \quad (1.1.11)$$

La ecuación para determinar el daño mecánico ocurrido en el pozo (s_m) es:

$$s_m = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta P_{er}}{(t^* \Delta P')_{er}} - \ln \left(\frac{\sqrt{k_y k_z} t_{er}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 7.43 \right] \quad (1.1.12)$$

En donde $(t^*\Delta P')_{er}$ es la derivada de presión de flujo radial temprano, leído a t_{er} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.1.1.2. Flujo Lineal Temprano (Early Linear (el)):

En el momento en que la onda de presión formada llega hasta tocar la frontera superior o la frontera inferior del yacimiento, este flujo es formado.

Se desplaza a través del plano XY hasta alcanzar los extremos del pozo, es decir, hasta que la onda de presión recorre toda la longitud efectiva del pozo (L_w). El flujo se hace visible si el valor del L_w es mayor que el espesor del yacimiento (h_z), entre mayor sea la relación entre éstos dos parámetros, mayor será el tiempo de duración de este régimen.

Las siguientes ecuaciones de flujo son tomadas de la tesis doctoral de Engler (1995):

La ecuación adimensional gobernante de este régimen de flujo para el caso de pruebas de presión es:

$$P_{D_{el}} = \frac{2r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_z + s_m) \quad (1.1.13)$$

La derivada de la Ec. (1.1.13) es:

$$(t_D * P_D')_{el} = \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (1.1.14)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.2) y (1.1.3) en la Ec. (1.1.14), se obtiene la ecuación resultante para determinar L_w y k_y , en donde $(t^*\Delta P')_{el}$ es la derivada de presión de flujo lineal temprano, leído a t_{el} .

$$L_w = \frac{4.064qB}{h_z (t^*\Delta P')_{el}} \sqrt{\frac{\mu t_{el}}{k_y \phi c_t}} \quad (1.1.15)$$

$$k_y = \left(\frac{4.064qB}{h_z (t^*\Delta P')_{el}} \right)^2 \frac{\mu t_{el}}{L_w^2 \phi c_t} \quad (1.1.16)$$

La ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m + s_z$) es:

$$s_m + s_z = \frac{0.029}{h_z} \sqrt{\frac{k_z t_{el}}{\phi \mu c_t}} \left[\frac{\Delta P_{el}}{(t^*\Delta P')_{el}} - 2.0 \right] \quad (1.1.17)$$

En donde $(t^*\Delta P')_{el}$ es la derivada de presión de flujo lineal temprano, leído a t_{el} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.1.1.3. Flujo Elíptico (Elliptical (Ell)):

Es considerado el régimen de flujo correspondiente al periodo de transición entre el flujo Lineal temprano y el Flujo Pseudorradial. Se encuentra caracterizado con una pendiente de 0.36.

Se usa de referencia la siguiente ecuación la cual es una modificación a la metodología usada por Engler (1995) de las ecuaciones tomadas de Martinez-Escobar-Bonila (2012), correspondiente a la ecuación adimensional gobernante de este régimen de flujo para el caso de pruebas de presión:

$$P_{D_{Ell}} = 2.1387415 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} + s_{Ell} \quad (1.1.18)$$

La derivada de la Ec. (1.1.18) es:

$$(t_D * P_D')_{Ell} = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \quad (1.1.19)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.2) y (1.1.3) en la Ec. (1.1.19), se obtiene la ecuación resultante para determinar L_w y k_y , en donde $(t^*\Delta P')_{Ell}$ es la derivada de presión de flujo elíptico, leído al tiempo t_{Ell} .

$$\frac{k_y L_w}{141.2 q \mu B} [t^* \Delta P'] = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.36}$$

Despejando L_w .

$$L_w = \left[5.5962 \frac{q \mu^{0.64} B}{k_y^{0.5} k_x^{0.14} h_z [t^* \Delta P']_{Ell}} \left(\frac{t_{Ell}}{\phi c_t} \right)^{0.36} \right]^{1/0.72} \quad (1.1.20)$$

Despejando k_y .

$$k_y = \left[5.5962 \frac{q \mu^{0.64} B}{L_w^{0.72} k_x^{0.14} h_z [t^* \Delta P']_{Ell}} \left(\frac{t_{Ell}}{\phi c_t} \right)^{0.36} \right]^{1/0.5} \quad (1.1.21)$$

Se procede a obtener el daño efectuado por el flujo elíptico (s_{Ell}) de la siguiente manera:

Dividiendo la ecuación anterior (1.1.18) en la ecuación gobernante adimensional de la derivada de presión (1.1.19) se obtiene:

$$\frac{P_D}{t_D * P_D'} = \frac{2.1387415 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}}{0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}} + \frac{s_{Ell}}{0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}}$$

$$s_{Ell} = 0.76994694 \left[\frac{P_D}{t_D * P_D'} - 2.77778 \right] \left[\frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.1.1), (1.1.2) y (1.1.3) en la anterior ecuación se tiene:

$$s_{Ell} = 0.76994694 \left[\frac{\Delta P}{[t * \Delta P']} - 2.77778 \right] \left[\frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{0.14} \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.36} \right]$$

$$s_{Ell} = \frac{1}{25.231296} \left[\frac{\Delta P_{Ell}}{[t * \Delta P']_{Ell}} - 2.77778 \right] \left[\frac{L_w^{0.28} k_y^{0.5}}{h_z k_x^{0.14}} \left(\frac{t_{Ell}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.36} \right] \quad (1.1.22)$$

En donde $(t * \Delta P')_{Ell}$ es la derivada de presión de flujo elíptico, leído a t_{Ell} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.1.1.4. Flujo Pseudorradial o Flujo Radial Tardío (Pseudorradial (pr)):

Luego de que la perturbación ha alcanzado la frontera superior o inferior restante, se da por terminado el flujo lineal temprano para dar paso al flujo radial tardío el cual se desarrolla sobre el plano horizontal XY. En este flujo el pozo horizontal se comporta como un pozo vertical ya que la caída de presión ha viajado lo suficientemente lejos con respecto al pozo, haciendo que este actúe como un punto dentro del yacimiento, generando así una distribución tipo flujo radial a las ondas de presión.

Las siguientes ecuaciones de flujo son tomadas de la tesis doctoral de Engler (1995):

La ecuación adimensional gobernante de este régimen de flujo para el caso de pruebas de presión es:

$$P_{D_{pr}} = \frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \left[\ln \left(\frac{16k_x r_w^2}{k_y L_w^2} t_{D_{pr}} \right) + 0.80907 \right] + \frac{k_y}{\sqrt{k_x k_z}} (s_m + s_z) \quad (1.1.23)$$

La derivada de la Ec. (1.1.23) es:

$$(t_D^* P_D')_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (1.1.24)$$

Reemplazando la expresión de la derivada de presión adimensional, Ec. (1.1.2), en la Ec. (1.1.24), se obtiene la ecuación resultante para determinar el producto $(k_x k_y)^{0.5}$ en donde $(t^* \Delta P')_{pr1}$ es la derivada de presión de flujo pseudorradial, leído a $t = 1$ hr.

$$\sqrt{k_x k_y} = \frac{70.6q\mu B}{h_z (t^* \Delta P')_{pr1}} \quad (1.1.25)$$

La ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m + s_z$) es:

$$s_m + s_z = \frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\frac{\Delta P_{pr}}{(t^* \Delta P')_{pr}} - \ln \left(\frac{k_x t_{pr}}{\phi \mu c_t L_w^2} \right) + 4.659 \right] \quad (1.1.26)$$

En donde $(t^* \Delta P')_{pr}$ es la derivada de presión de flujo pseudorradial, leído a t_{pr} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.1.1.5. Flujo Lineal Tardío (Late linear (II)):

En cuanto las ondas de presión alcanzan las fronteras laterales, es decir, el ancho del yacimiento, se forma este flujo. Entre más lejanas estén las fronteras laterales con respecto a las fronteras superior e inferior, mayor será la duración del flujo.

Las siguientes ecuaciones de flujo son tomadas de la tesis doctoral de Engler (1995):

La ecuación adimensional gobernante de este régimen de flujo para el caso de pruebas de presión es:

$$P_{D_{II}} = 2 \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{II}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m) \quad (1.1.27)$$

La derivada de la Ec. (1.1.27) es:

$$(t_D^* P_D')_{ll} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (1.1.28)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.2) y (1.1.3) en la Ec. (1.1.28), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_x y k_y , en donde $(t^* \Delta P')_{ll}$ es la derivada de presión de flujo lineal tardío, leído a t_{ll} .

$$h_x = \frac{4.064 q B}{h_z (t^* \Delta P')_{ll}} \sqrt{\frac{\mu t_{ll}}{k_y \phi c_t}} \quad (1.1.29)$$

$$k_y = \left(\frac{4.064 q B}{h_z (t^* \Delta P')_{ll}} \right)^2 \left(\frac{\mu t_{ll}}{h_x^2 \phi c_t} \right) \quad (1.1.30)$$

La ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m + s_z + s_x$) es:

$$(s_m + s_z + s_x) = \frac{0.029 L_w}{h_x h_z} \sqrt{\frac{k_z t_{ll}}{\phi \mu c_t}} \left[\frac{\Delta P_{ll}}{(t^* \Delta P')_{ll}} - 2 \right] \quad (1.1.31)$$

En donde $(t^* \Delta P')_{ll}$ es la derivada de presión de flujo lineal tardío, leído a t_{ll} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.1.1.6. Flujo Hemilineal (Hemilinear (hl)).

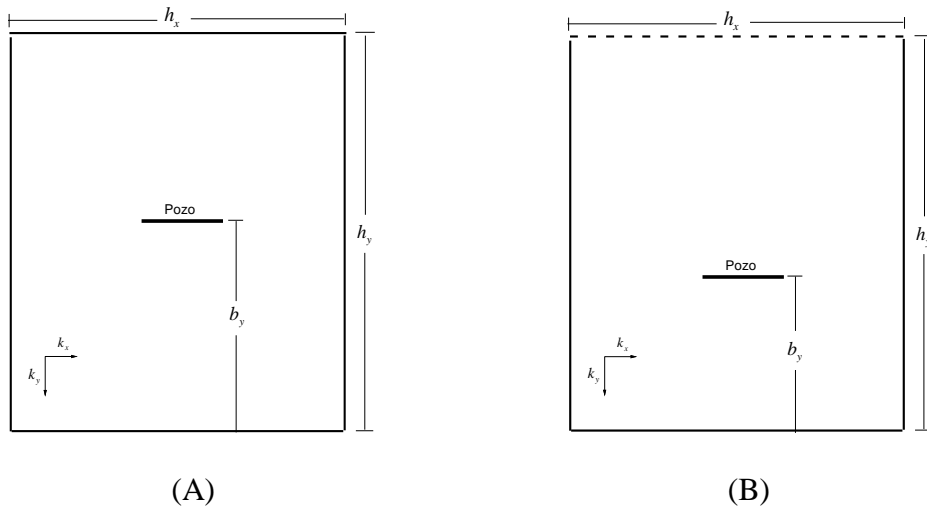
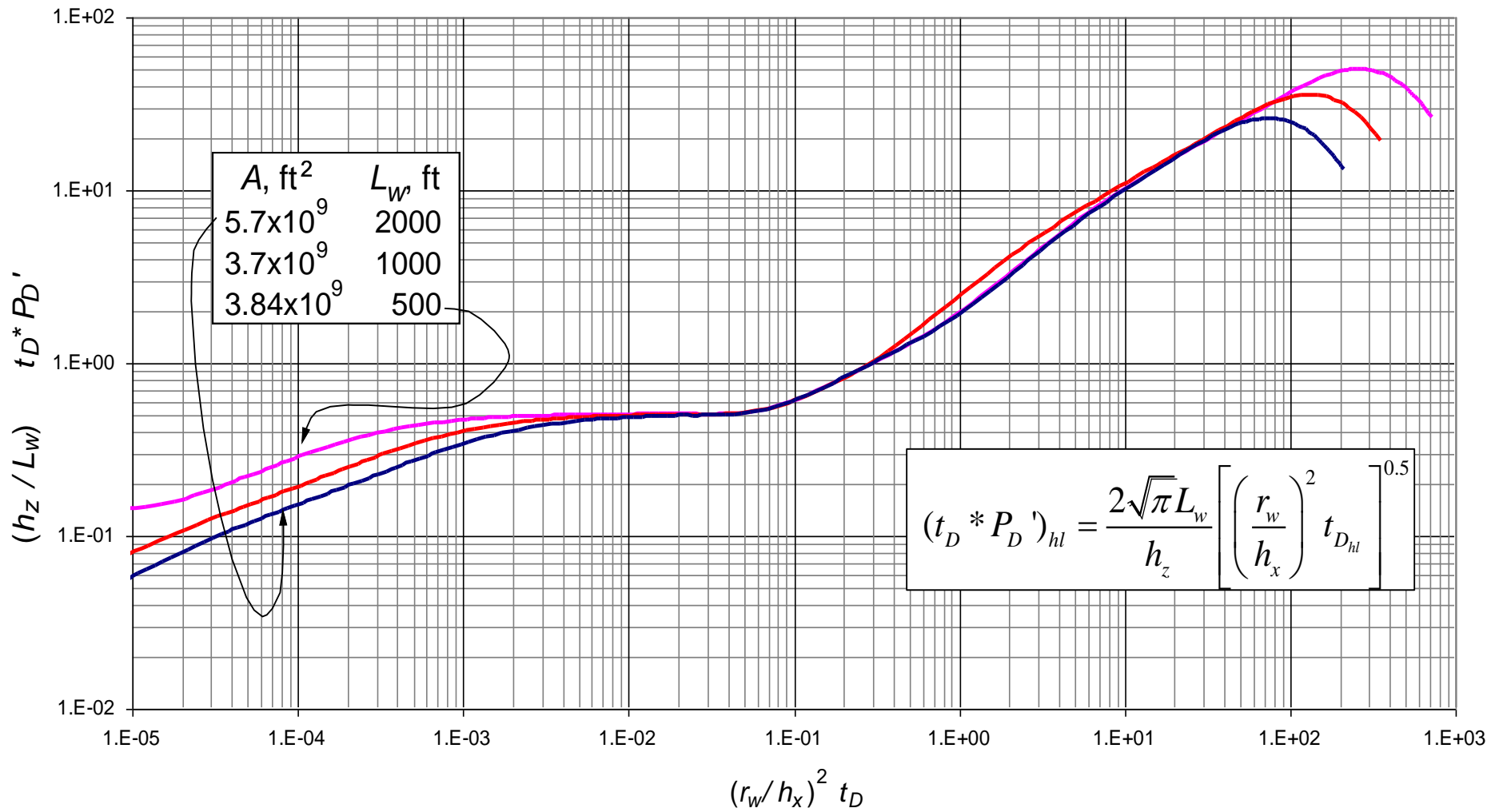


Figura 1. Casos de Flujo Hemilineal, A) Fronteras cerradas, estado pseudoestable, B) Frontera lejana abierta, estado estable



Gráfica 1. Flujo Hemilineal, Gráfica $(r_w/h_x)^2 t_D$ vs $(h_z/L_w) t_D * P_D'$.

Formado dentro del yacimiento cuando el pozo productor horizontal se encuentra cercano a la frontera cerrada independientemente si la frontera lejana se encuentra cerrada (Estado Pseudoestable) o abierta (Estado Estable).

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para este flujo es:

$$(t_D * P_D')_{hl} = \frac{2\sqrt{\pi}L_w}{h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{Dhl} \right]^{0.5} \quad (1.1.32)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.2) y (1.1.3) en la Ec. (1.1.32), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_x y k_y .

$$\frac{k_y L_w}{141.2 q \mu B} [t^* \Delta P'] = \frac{2\sqrt{\pi}L_w}{h_z} \frac{r_w}{h_x} \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5}$$

$$\frac{k_y}{k_y^{0.5}} \frac{[t^* \Delta P']}{q \mu B} = \frac{8.1282}{h_z h_x} \left(\frac{t}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5}$$

Despejando h_x y k_y .

$$k_y = 66.067 \left(\frac{\mu t_{hl}}{\phi c_t} \right) \left[\frac{qB}{h_z h_x [t^* \Delta P']_{hl}} \right]^2 \quad (1.1.33)$$

$$h_x = 8.1282 \frac{qB}{h_z [t^* \Delta P']_{hl}} \left(\frac{\mu t_{hl}}{k_y \phi c_t} \right)^{0.5} \quad (1.1.34)$$

Se procede a obtener la sumatoria de los daños ocurridos dentro del pozo ($s_m + s_z + s_x + s_{hl}$) como sigue:

Dividiendo la Ec. (1.1.32) en t_D a ambos lados:

$$\frac{t_D * P_D'}{t_D} = \frac{2\sqrt{\pi}L_w}{h_z} \left(\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 * t_D \right)^{0.5}$$

$$P_D' = \frac{2\sqrt{\pi}L_w r_w}{h_z h_x} \frac{1}{t_D^{0.5}}$$

Integrando la ecuación anterior:

$$\int P_D' = \frac{2\sqrt{\pi}L_w r_w}{h_z h_x} \int t_D^{-0.5}$$

$$P_D = \frac{2\sqrt{\pi}L_w r_w}{h_z h_x} \frac{t_D^{0.5}}{0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{hl})$$

$$P_{D_{hl}} = \frac{4L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\pi t_{D_{hl}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{hl}) \quad (1.1.35)$$

La Ec. (1.1.35) corresponde a la ecuación adimensional gobernante de este régimen de flujo para el caso de pruebas de presión.

Dividiendo la ecuación anterior (1.1.35) en la ecuación gobernante adimensional de la derivada de presión (1.1.32) se obtiene:

$$\frac{P_D}{t_D * P_D'} = \frac{\frac{4L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\pi t_D} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{hl})}{\frac{2L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\pi t_D}}$$

$$(s_x + s_z + s_m + s_{hl}) = \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\frac{P_D}{t_D * P_D'} - 2 \right] \left[\frac{2L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\pi t_D} \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.1.1), (1.1.2) y (1.1.3) en la anterior ecuación se tiene:

$$(s_x + s_z + s_m + s_{hl}) = \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2q\mu B}}{\frac{k_y L_w [t^* \Delta P]}{141.2q\mu B}} - 2 \right] \left[\frac{2L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\frac{0.0002637\pi k_y t}{\phi\mu c_t r_w^2}} \right]$$

$$(s_x + s_z + s_m + s_{hl}) = \frac{1}{17.3716} \left[\frac{L_w}{h_z h_x} \sqrt{\frac{k_z t_{hl}}{\phi\mu c_t}} \right] \left[\frac{\Delta P_{hl}}{[t^* \Delta P]_{hl}} - 2 \right] \quad (1.1.36)$$

En donde $(t^* \Delta P')_{hl}$ es la derivada de presión de flujo hemilineal, leído a t_{hl} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.1.1.7. Flujo Parabólico (Parabolic (PB)).

Este flujo es formado dentro del yacimiento cuando el pozo productor horizontal se encuentra cercano a la frontera abierta independientemente si la frontera lejana se encuentra cerrada (Estado Estable) o abierta (Estado Estable).

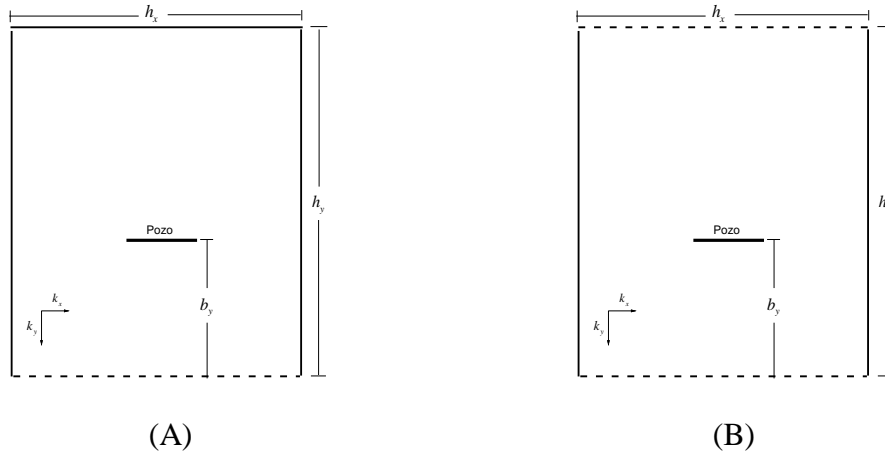


Figura 2. Casos de Flujo Parabólico. A) Una frontera abierta, estado estable, B) Fronteras abiertas, estado estable.

El flujo parabólico únicamente se puede presenciar en yacimientos alargados cuando el pozo está más cercano a la frontera de presión constante. Al tener en esa posición el pozo se ocasiona una combinación simultánea del estado estable con el flujo lineal obteniendo la geometría de flujo en forma de parábola. Posee una pendiente de -0.5.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para este flujo es:

$$(t_D^* P_D')_{PB} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} \quad (1.1.37)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.2) y (1.1.3) en la Ec. (1.1.37), se obtiene la ecuación resultante para determinar b_y .

$$\frac{k_y L_w}{141.2 q \mu B} (t^* \Delta P') = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{-0.5}$$

Despejando b_y .

$$b_y = \left[\frac{1}{48403.5189} \frac{k_y^{1.5} L_w^{0.38} h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{0.25}}{q\mu^{1.5} B} (t * \Delta P')_{PB} \left(\frac{t_{PB}}{\phi c_t} \right)^{0.5} \right]^{1/2.3} \quad (1.1.38)$$

Se procede a obtener la sumatoria de los daños ocurridos dentro del pozo ($s_x + s_z + s_m + s_{PB}$) como sigue:

Dividiendo la Ec. (1.1.38) en t_D a ambos lados:

$$\frac{(t_D * P_D')}{t_D} = \frac{5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \frac{1}{(t_{D_{PB}})^{0.5}}}{t_D}$$

$$P_D' = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \frac{1}{(t_{D_{PB}})^{1.5}}$$

Integrando la ecuación anterior:

$$\int P_D' = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \int (t_{D_{PB}})^{-1.5}$$

$$P_D = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \frac{(t_{D_{PB}})^{-0.5}}{-0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{PB})$$

$$P_D = -11.1326 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{PB}) \quad (1.1.39)$$

La Ec. (1.1.39) corresponde a la ecuación adimensional gobernante de este régimen de flujo para el caso de pruebas de presión.

Dividiendo la ecuación anterior (1.1.39) en la ecuación gobernante adimensional de la derivada de presión (1.1.37) se obtiene:

$$\frac{P_D}{t_D^* P_D'} = \frac{-11.1326 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{PB})}{5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5}}$$

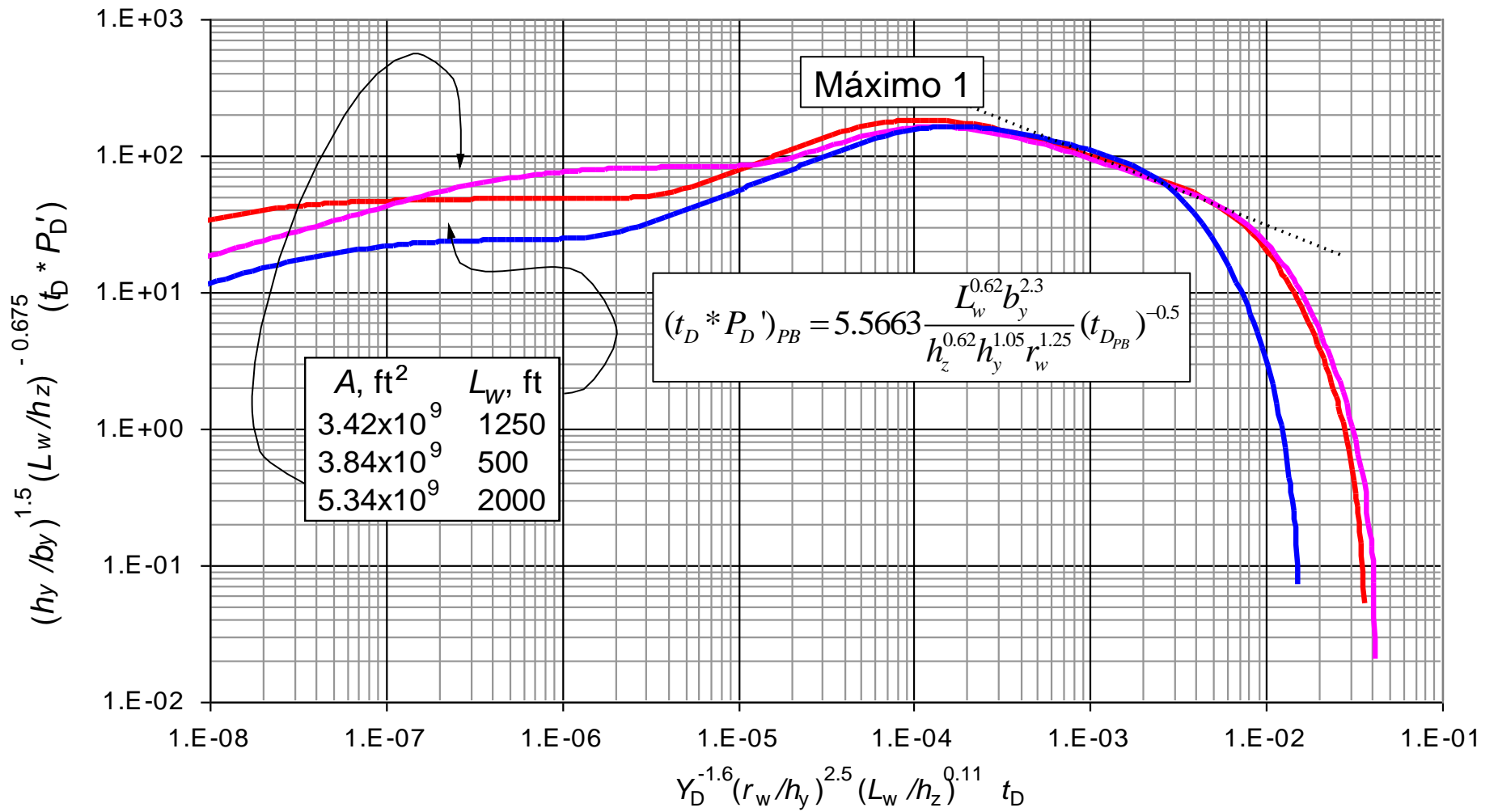
$$(s_x + s_z + s_m + s_{PB}) = \left[5.5663 \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} \right] \left[\frac{P_D}{t_D^* P_D'} + 2 \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.1.1), (1.1.2) y (1.1.3) en la anterior ecuación se tiene:

$$(s_x + s_z + s_m + s_{PB}) = \left[5.5663 \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \left(\frac{\phi \mu c_t r_w^2}{0.0002637 k_y t} \right)^{0.5} \right] \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 q \mu B}}{\frac{k_y L_w}{141.2 q \mu B} [t^* \Delta P']} + 2 \right]$$

$$(s_x + s_z + s_m + s_{PB}) = \left[342.777 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{k_y h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \left(\frac{k_z \phi \mu c_t}{t_{PB}} \right)^{0.5} \right] \left[\frac{\Delta P_{PB}}{[t^* \Delta P']_{PB}} + 2 \right] \quad (1.1.40)$$

En donde $(t^* \Delta P')_{PB}$ es la derivada de presión de flujo parabólico, leído a t_{PB} siendo este un punto conveniente durante este periodo.



Gráfica 2. Flujo Parabólico, Gráfica $Y_D^{-1.6} (r_w/h_y)^{2.5} (L_w/h_z)^{0.11} t_D$ vs $(h_y/b_y)^{1.5} (L_w/h_z)^{0.675} t_D * P_D'$.

Cuando el pozo se encuentra cercano a la frontera de presión constante (frontera abierta), el flujo parabólico es formado. En la curva de la derivada de presión se observa un punto máximo al terminar el flujo lineal tardío y seguir el flujo parabólico. Tomando los valores de estos puntos máximos se obtiene una nueva ecuación para determinar el parámetro b_y .

Puntos máximos característicos:

$$X_I = 0.0001104195$$

$$\left(\frac{L_w}{h_z}\right)^{0.11} Y_D^{-1.6} \left(\frac{r_w}{h_y}\right)^{2.5} (t_D)_{X1} = 0.0001104195$$

$$b_y = \left[\frac{1}{1.2693567} \frac{r_w^{0.5}}{h_y^{0.9}} \left(\frac{L_w}{h_z}\right)^{0.11} \frac{k_y t_{X1}}{\phi \mu c_t} \right]^{1/1.6} \quad (1.1.41)$$

$$Y_I = 177.0618$$

$$\left(\frac{L_w}{h_z}\right)^{-0.675} \left(\frac{b_y}{h_y}\right)^{-1.5} (t_D * P_D')_{X1} = 177.0618$$

$$\left(\frac{h_z}{L_w}\right)^{0.675} \left(\frac{h_y}{b_y}\right)^{1.5} \frac{k_y L_w (t * \Delta P')}{141.2 q \mu B} = 177.0618$$

$$b_y = \left[\frac{1}{25001.12616} \frac{h_z^{0.675} h_y^{1.5} k_y L_w^{0.325} (t * \Delta P')_{X1}}{q \mu B} \right]^{1/1.5} \quad (1.1.42)$$

1.1.1.8. Flujo Estable (Steady State (ss)).

1. Pozo cerca de la frontera abierta y la frontera lejana abierta.

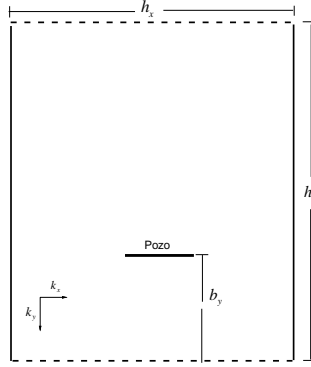


Figura 3. Primer caso de flujo estable.

Con éstas características geométricas y de ubicación se forma principalmente flujo parabólico al alcanzarse la frontera cercana abierta y seguido a que se alcance la segunda frontera abierta se forma el primer caso de flujo estable que se estudiarán en este documento. Dadas estas circunstancias se podrá apreciar en la gráfica una declinación constante con pendiente $m=-1.0$ en la derivada sin ningún “protuberancia” apreciable al momento de alcanzar las fronteras del yacimiento.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para el primer caso de flujo estable es:

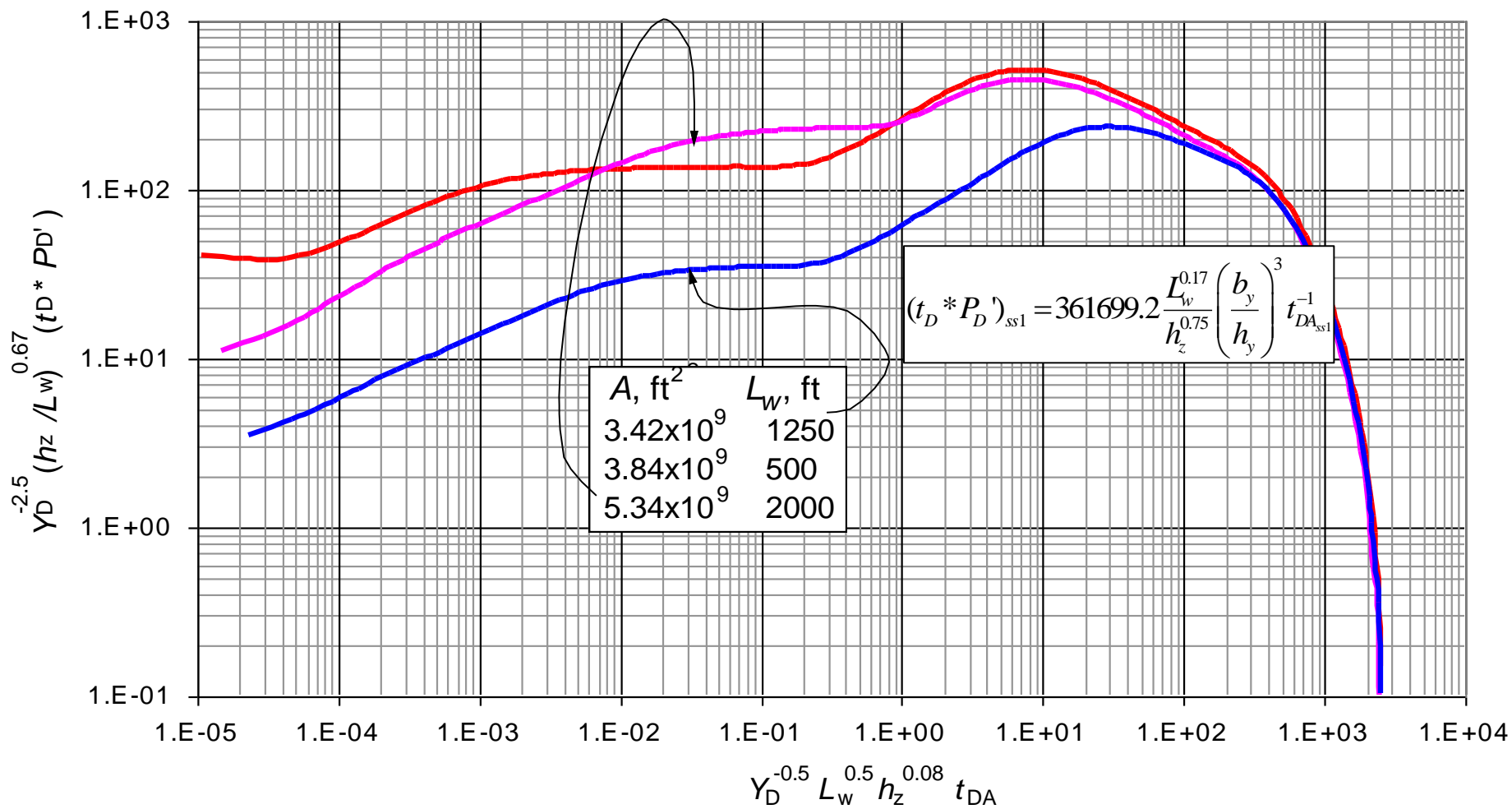
$$(t_D * P_D')_{ss1} = 361699.2 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 t_{DA,ss1}^{-1} \quad (1.1.43)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.2) y (1.1.4) en la Ec. (1.1.43), se obtiene la ecuación resultante para determinar A.

$$\frac{k_y L_w}{141.2 q \mu B} [t * \Delta P'] = 361699.2 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} \right)^{-1}$$

Despejando A.

$$A = \frac{k_y L_w}{361699.2 (141.2) q \mu B} \frac{h_z^{0.75}}{L_w^{0.17}} [t * \Delta P'] \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t} \right) \left(\frac{h_y}{b_y} \right)^3$$



Gráfica 3. Flujo Estable 1, Gráfica $Y_D^{-0.5} L_w^{0.5} h_z^{0.08} t_{DA}$ vs $Y_D^{-2.5} (h_z/L_w)^{0.67} t_D * P_D'$.

$$A = \frac{1}{1.93674 \times 10^{11}} \frac{k_y^2 L_w^{0.83}}{\mu^2} \frac{h_z^{0.75}}{L_w^{0.17}} [t^* \Delta P']_{ss1} \left(\frac{t_{ss1}}{qB\phi c_t} \right) \left(\frac{h_y}{b_y} \right)^3 \quad (1.1.44)$$

En donde $(t^* \Delta P')_{ss1}$ es la derivada de presión del primer caso de flujo estable, leído a t_{ss1} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2. Pozo cerca de la frontera abierta y la frontera lejana cerrada.

En este caso se forma el flujo parabólico en el momento que la onda de presión alcanza la frontera cercana abierta, posteriormente al alcanzar la frontera lejana cerrada se formará el segundo caso de flujo estable. En consecuencia de tener ambos tipos de frontera la gráfica de la derivada de presión muestra un aumento y luego una declinación obteniendo un forma de “protuberancia” en la curva de derivada versus tiempo adimensionales.

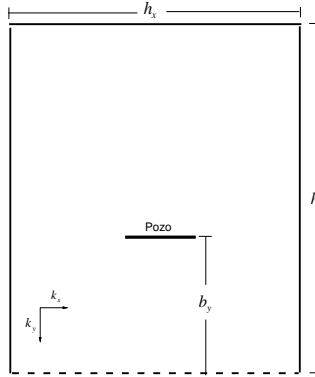


Figura 4. Segundo caso de flujo estable.

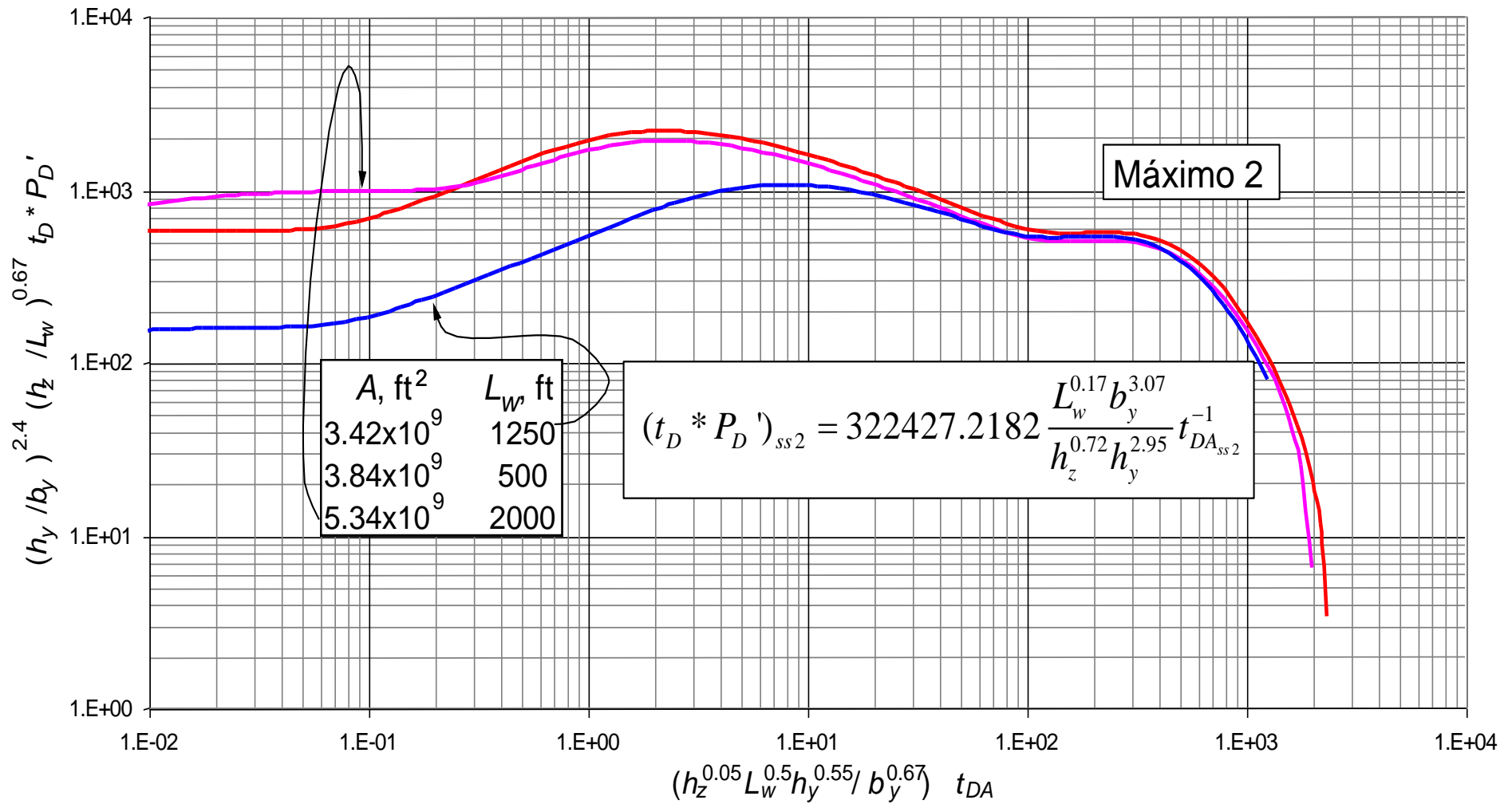
La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para el segundo caso de flujo estable:

$$(t_D^* P_D')_{ss2} = 322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} t_{DA_{ss2}}^{-1} \quad (1.1.45)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.2) y (1.1.4) en la Ec. (1.1.45), se obtiene la ecuación resultante para determinar A.

$$\frac{k_y L_w}{141.2 q \mu B} [t^* \Delta P'] = 322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} \right)^{-1}$$

Despejando A.



Gráfica 4. Flujo Estable 2, Gráfica $(h_z^{0.05} L_w^{0.5} h_y^{0.55} / b_y^{0.67}) t_{DA}$ vs $(h_y/b_y)^{2.4} (h_z/L_w)^{0.65} t_D * P_D'$.

$$A = \frac{k_y L_w}{322427.2182(141.2)q\mu B} \frac{h_z^{0.72} h_y^{2.95}}{L_w^{0.17} b_y^{3.07}} [t^* \Delta P'] \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t} \right)$$

$$A = \frac{1}{1.726458976 \times 10^{11}} \frac{k_y^2 L_w^{0.83} h_z^{0.72} h_y^{2.95}}{\mu^2 b_y^{3.07}} [t^* \Delta P']_{ss2} \left(\frac{t_{ss2}}{qB\phi c_t} \right) \quad (1.1.46)$$

En donde $(t^* \Delta P')_{ss2}$ es la derivada de presión del segundo caso de flujo estable, leído a t_{ss2} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

Hay un segundo punto máximo formado en yacimientos con este tipo de geometría. Una vez que el flujo parabólico ha terminado y la onda ha alcanzado la frontera cerrada

Cuando ambos extremos del reservorio se encuentran abiertos, Ver (**Figura 3**), la derivada se comporta de manera similar a como este caso con fronteras combinadas. Sin embargo no se observa ningún otro punto máximo. Ver (**Gráfica 3**).

Puntos máximos característicos:

$$X_2 = 224.7686$$

$$\frac{h_z^{0.05} L_w^{0.5} h_y^{0.55}}{b_y^{0.67}} (t_{DA})_{X_2} = 224.7686$$

$$\frac{h_z^{0.05} L_w^{0.5} h_y^{0.55}}{b_y^{0.67}} \frac{0.0002637 k_y t}{2^{0.55} \phi \mu c_t A} = 224.7686$$

$$A = \frac{1}{1247935.124} \frac{h_z^{0.05} L_w^{0.5} h_y^{0.55}}{b_y^{0.67}} \frac{k_y t_{X_2}}{\phi \mu c_t} \quad (1.1.47)$$

$$Y_2 = 558.3557$$

$$\left(\frac{h_y}{b_y} \right)^{2.4} \left(\frac{h_z}{L_w} \right)^{0.67} (t_D^* P_D')_{X_2} = 558.3557$$

$$\left(\frac{h_y}{b_y} \right)^{2.4} \left(\frac{h_z}{L_w} \right)^{0.67} \frac{k_y L_w (t^* \Delta P')}{141.2 q \mu B} = 558.3557$$

$$b_y = \left[\frac{1}{78839.82484} \frac{h_z^{0.67} h_y^{2.4} k_y L_w^{0.33} (t^* \Delta P')_{x2}}{q\mu B} \right]^{1/2.4} \quad (1.1.48)$$

3. Pozo cerca de la frontera cerrada y la frontera lejana abierta.

Con el pozo descentrado cerca de la frontera cerrada del yacimiento, el primer flujo en formarse es el hemilineal. Seguido a este, al ser alcanzada la segunda frontera abierta se formará el tercer caso de flujo estable trabajado en este documento, con lo que se podrá apreciar en la curva de la derivada un “protuberancia” formado por la presencia de una frontera cerrada, seguido de una declinación constante con pendiente $m=-1.0$ que se conocerá como el caso tres de flujo estable.

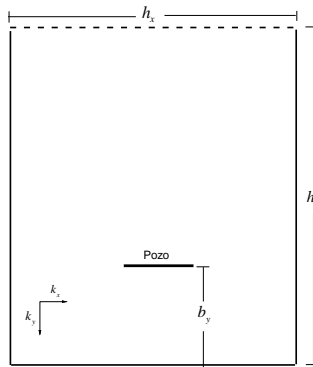


Figura 5. Tercer caso de flujo estable.

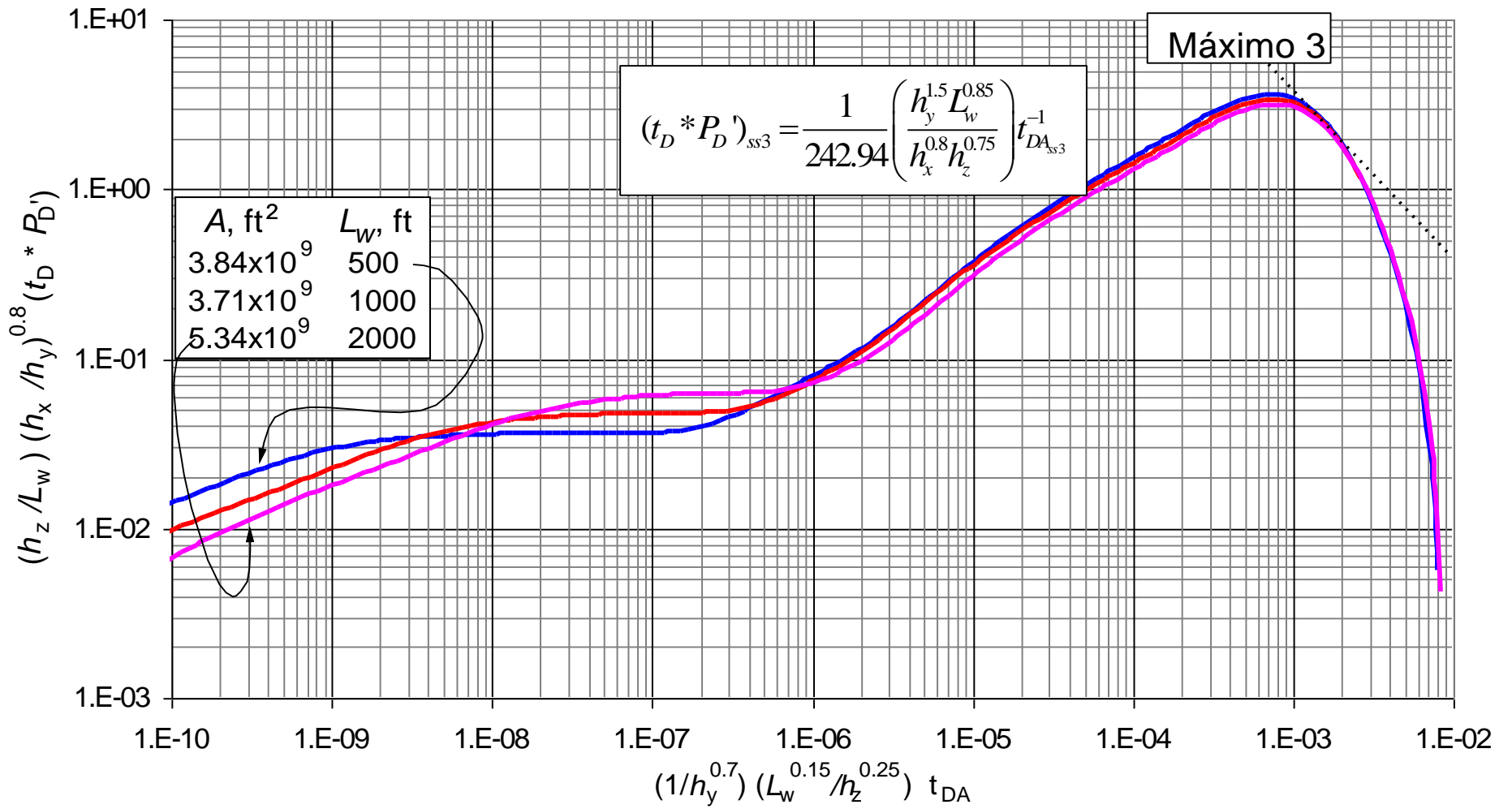
La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para el tercer caso de flujo estable:

$$(t_D^* P_D')_{ss3} = \frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{DA_{ss3}}^{-1} \quad (1.1.49)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.2) y (1.1.4) en la Ec. (1.1.49), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w}{141.2 q \mu B} [t^* \Delta P'] = \frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} \right)^{-1}$$

Despejando h_y .



Gráfica 5. Flujo Estable 3, Gráfica $(1/h_y^{0.7})(L_w^{0.15}/h_z^{0.25}) t_{DA}$ vs $(h_z/L_w)(h_x/h_y)^{0.8} t_D * P_D'$.

$$h_y^{2.5} = \frac{242.94k_y L_w}{141.2q\mu B} [t^* \Delta P'] \left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi\mu c_t h_x} \right) \left(\frac{h_x^{0.8} h_z^{0.75}}{L_w^{0.85}} \right)$$

$$h_y = \left[\frac{1}{2204.07} \frac{k_y^2 L_w^{0.15} h_z^{0.75} [t^* \Delta P']_{ss3}}{\mu^2 h_x^{0.2}} \left(\frac{t_{ss3}}{qB\phi c_t} \right) \right]^{0.4} \quad (1.1.50)$$

En donde $(t^* \Delta P')_{ss3}$ es la derivada de presión del tercer caso de flujo estable, leído a t_{ss3} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

Con un pozo descentrado cercano a la frontera cerrada y con la frontera lejana abierta, la derivada muestra un punto máximo una vez que se alcanza la frontera cerrada. Tomando este punto se encuentran ecuaciones para determinar A y h_y .

Puntos máximos característicos:

$$X_3 = 8.27747 \times 10^{-4}$$

$$\left(\frac{L_w}{h_z} \right)^{0.7} \frac{h_z^{0.45} L_w^{-0.6} L_w^{0.05}}{h_y^{0.7}} (t_{DA})_{X3} = 8.27747 \times 10^{-4}$$

$$\left(\frac{L_w}{h_z} \right)^{0.7} \frac{h_z^{0.45} L_w^{-0.6} L_w^{0.05}}{h_y^{0.7}} \frac{0.0002637k_y t}{\phi\mu c_t A} = 8.27747 \times 10^{-4}$$

$$A = \frac{1}{3.13897} \frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_y^{0.7}} \frac{k_y t_{X3}}{\phi\mu c_t} \quad (1.1.51)$$

$$Y_3 = 3.372321$$

$$\left(\frac{h_x}{h_y} \right)^{0.8} \left(\frac{h_z}{L_w} \right) (t_D * P_D')_{X3} = 3.372321$$

$$\left(\frac{h_x}{h_y} \right)^{0.8} \left(\frac{h_z}{L_w} \right) \frac{k_y L_w (t^* \Delta P')}{141.2q\mu B} = 3.372321$$

$$h_y = \left[\frac{1}{476.1717} \frac{h_z h_x^{0.8} k_y (t^* \Delta P')_{X3}}{q\mu B} \right]^{1/0.8} \quad (1.1.52)$$

4. Pozo centrado con una frontera abierta.

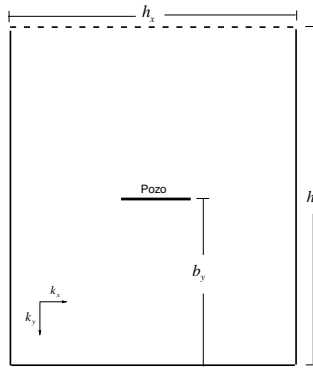


Figura 6. Cuarto caso de flujo estable.

Al estar el pozo centrado en un yacimiento con fronteras combinadas, la curva de derivada mostrará una declinación al alcanzarse las fronteras, en este caso se genera un “protuberancia” antes de la declinación por efecto de la frontera cerrada presente en el yacimiento. Se formará el cuarto caso de flujo estable después del flujo lineal tardío ya que no se formará ni flujo hemilineal ni flujo parabólico, esto debido a que el pozo se encuentra centrado.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para el cuarto caso de flujo estable:

$$(t_D * P_D')_{ss4} = \frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) (t_{DA})_{ss4}^{-1} \quad (1.1.53)$$

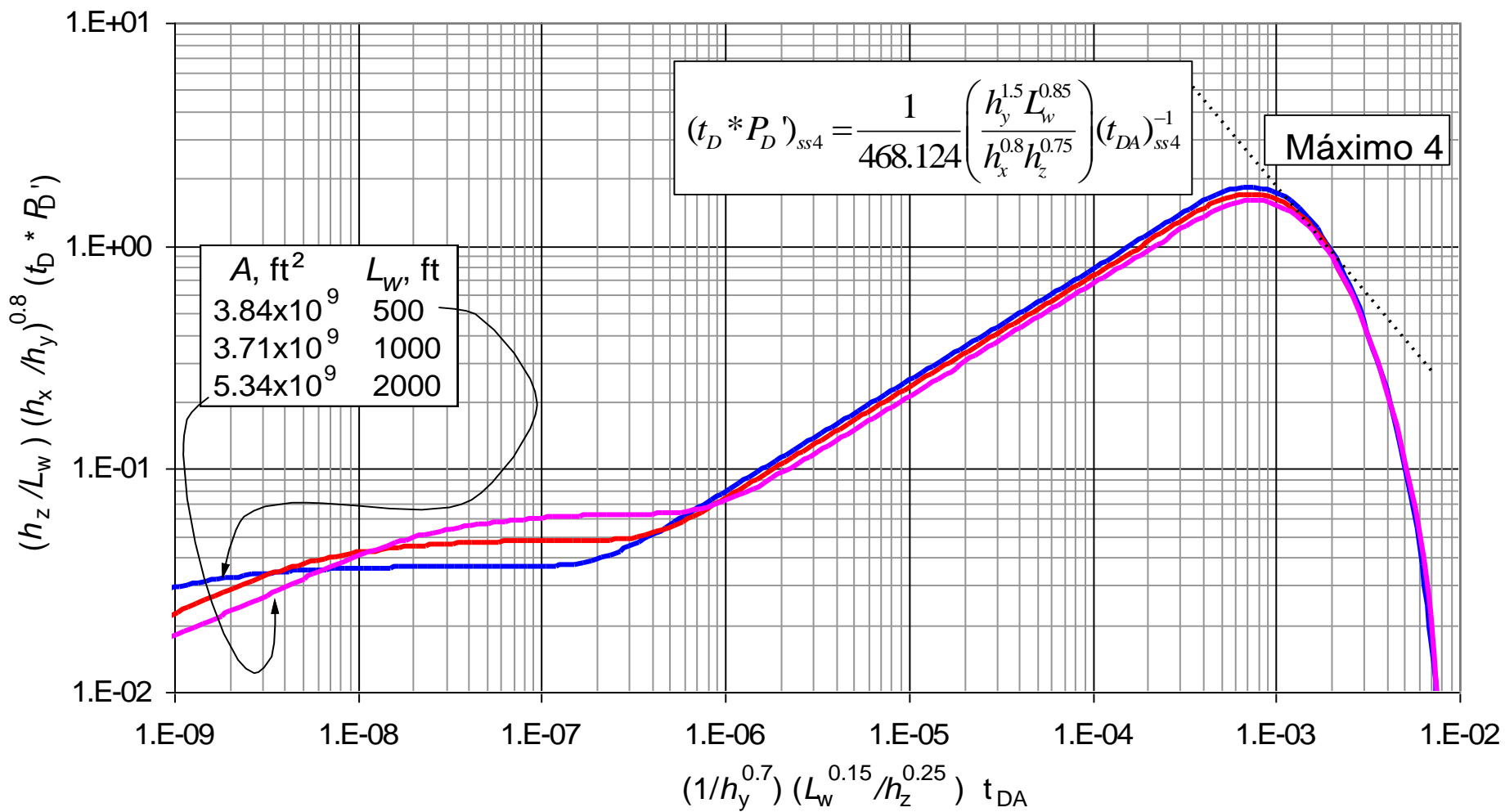
Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.2) y (1.1.4) en la Ec. (1.1.53), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w}{141.2 q \mu B} [t^* \Delta P'] = \frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t h_y h_x} \right)^{-1}$$

Despejando h_y .

$$h_y = \left[\frac{1}{1143.836} \frac{k_y^2 L_w^{0.15} h_z^{0.75} [t^* \Delta P']_{ss4}}{h_x^{0.2} \mu^2} \left(\frac{t_{ss4}}{q B \phi c_t} \right) \right]^{0.4} \quad (1.1.54)$$

En donde $(t^* \Delta P')_{ss4}$ es la derivada de presión del cuarto caso de flujo estable, leído a t_{ss4} siendo este un punto conveniente durante este periodo.



Gráfica 6. Flujo Estable 4, Gráfica $(1/h_y^{0.7})(L_w^{0.15}/h_z^{0.25}) t_{DA}$ vs $(h_z/L_w)(h_x/h_y)^{0.8} t_D * P_D'$.

En este caso se nota un punto máximo terminado el flujo lineal tardío y antes de iniciar la declinación con pendiente $m=-1.0$ del flujo estable cuatro. Tomando este punto se determinan ecuaciones para hallar A y h_y .

Puntos máximos característicos:

$$X_4=8.27747 \times 10^{-4}$$

$$\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_y^{0.7}} (t_{DA})_{X4} = 8.27747 \times 10^{-4}$$

$$A = \frac{1}{3.138972} \frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_y^{0.7}} \frac{k_y t_{X4}}{\phi \mu c_i} \quad (1.1.55)$$

$$Y_4=1.751102$$

$$\left(\frac{h_x}{h_y}\right)^{0.8} \left(\frac{h_z}{L_w}\right) (t_D * P_D')_{X4} = 1.751102$$

$$\left(\frac{h_x}{h_y}\right)^{0.8} \left(\frac{h_z}{L_w}\right) \frac{k_y L_w (t * \Delta P')}{141.2 q \mu B} = 1.751102$$

$$h_y = \left[\frac{1}{247.2556} \frac{h_z h_x^{0.8} k_y (t * \Delta P')_{X4}}{q \mu B} \right]^{1/0.8} \quad (1.1.56)$$

5. Pozo centrado con ambas fronteras abiertas.

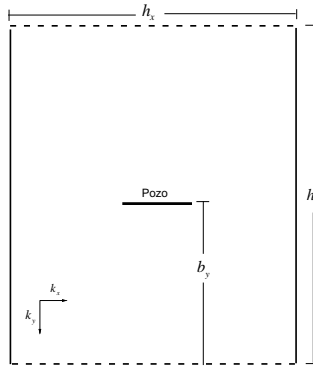
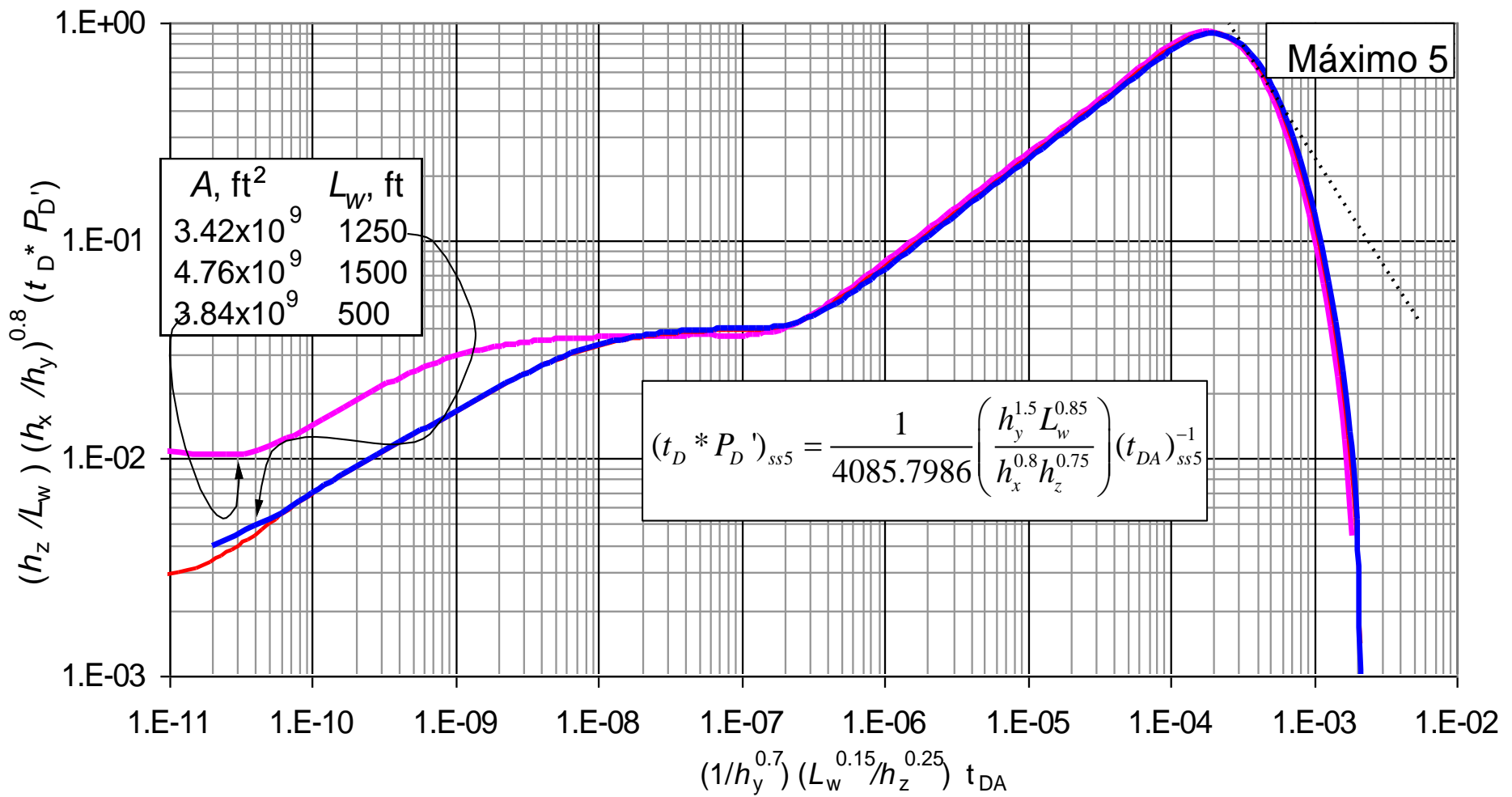


Figura 7. Quinto caso de flujo estable.



Gráfica 7. Flujo Estable 5, Gráfica $(1/h_y^{0.7})(L_w^{0.15} / h_z^{0.25}) t_{DA}$ vs $(h_z / L_w)(h_x / h_y)^{0.8} t_D * P_D'$.

Teniendo estas condiciones, la curva de derivada no mostrará “protuberancia” antes de la declinación del quinto caso de flujo estable.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para el quinto caso de flujo estable:

$$(t_D * P_D')_{ss5} = \frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) (t_{DA})_{ss5}^{-1} \quad (1.1.57)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.2) y (1.1.4) en la Ec. (1.1.57), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w}{141.2 q \mu B} [t * \Delta P'] = \frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t h_y h_x} \right)^{-1}$$

Despejando h_y .

$$h_y^{2.5} = \frac{4085.7986 k_y L_w}{141.2 q \mu B} [t * \Delta P'] \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t h_x} \right) \left(\frac{h_x^{0.8} h_z^{0.75}}{L_w^{0.85}} \right)$$

$$h_y = \left[\frac{1}{131.053} \frac{k_y^2 L_w^{0.15} h_z^{0.75} [t * \Delta P']_{ss5}}{\mu^2 h_x^{0.2}} \left(\frac{t_{ss5}}{q B \phi c_t} \right) \right]^{0.4} \quad (1.1.58)$$

En donde $(t * \Delta P')_{ss5}$ es la derivada de presión del quinto caso de flujo estable, leído a t_{ss5} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

Se nota un punto máximo terminado el flujo lineal tardío y antes de iniciar la declinación con pendiente $m=-1.0$ del flujo estable cinco. Tomando este punto se determinan ecuaciones para hallar A y h_y .

Puntos máximos característicos:

$$X_5 = 1.92814 \times 10^{-4}$$

$$\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_y^{0.7}} (t_{DA})_{X5} = 1.92814 \times 10^{-4}$$

$$A = 1.36764 \frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_y^{0.7}} \frac{k_y t_{X5}}{\phi \mu c_t} \quad (1.1.59)$$

$$Y_5=0.8955295$$

$$\left(\frac{h_x}{h_y}\right)^{0.8} \left(\frac{h_z}{L_w}\right) (t_D * P_D')_{X5} = 0.8955295$$

$$\left(\frac{h_x}{h_y}\right)^{0.8} \left(\frac{h_z}{L_w}\right) \frac{k_y L_w (t * \Delta P')}{141.2 q \mu B} = 0.8955295$$

$$h_y = \left[\frac{1}{126.4487654} \frac{h_z h_x^{0.8} k_y (t * \Delta P')_{X5}}{q \mu B} \right]^{1/0.8} \quad (1.1.60)$$

1.1.1.9. Flujo Pseudoestable (Pseudosteady State (pss)).

6. Ambas fronteras cerradas pozo centrado o descentrado.

Independientemente de la ubicación del pozo dentro del yacimiento, si el yacimiento posee ambas fronteras cerradas se generará un aumento constante con pendiente, $m=1.0$, en la curva de derivada característico del flujo Pseudoestable.

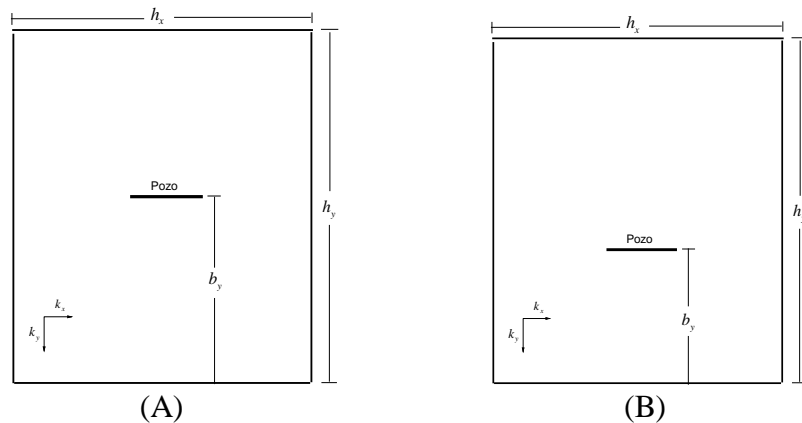
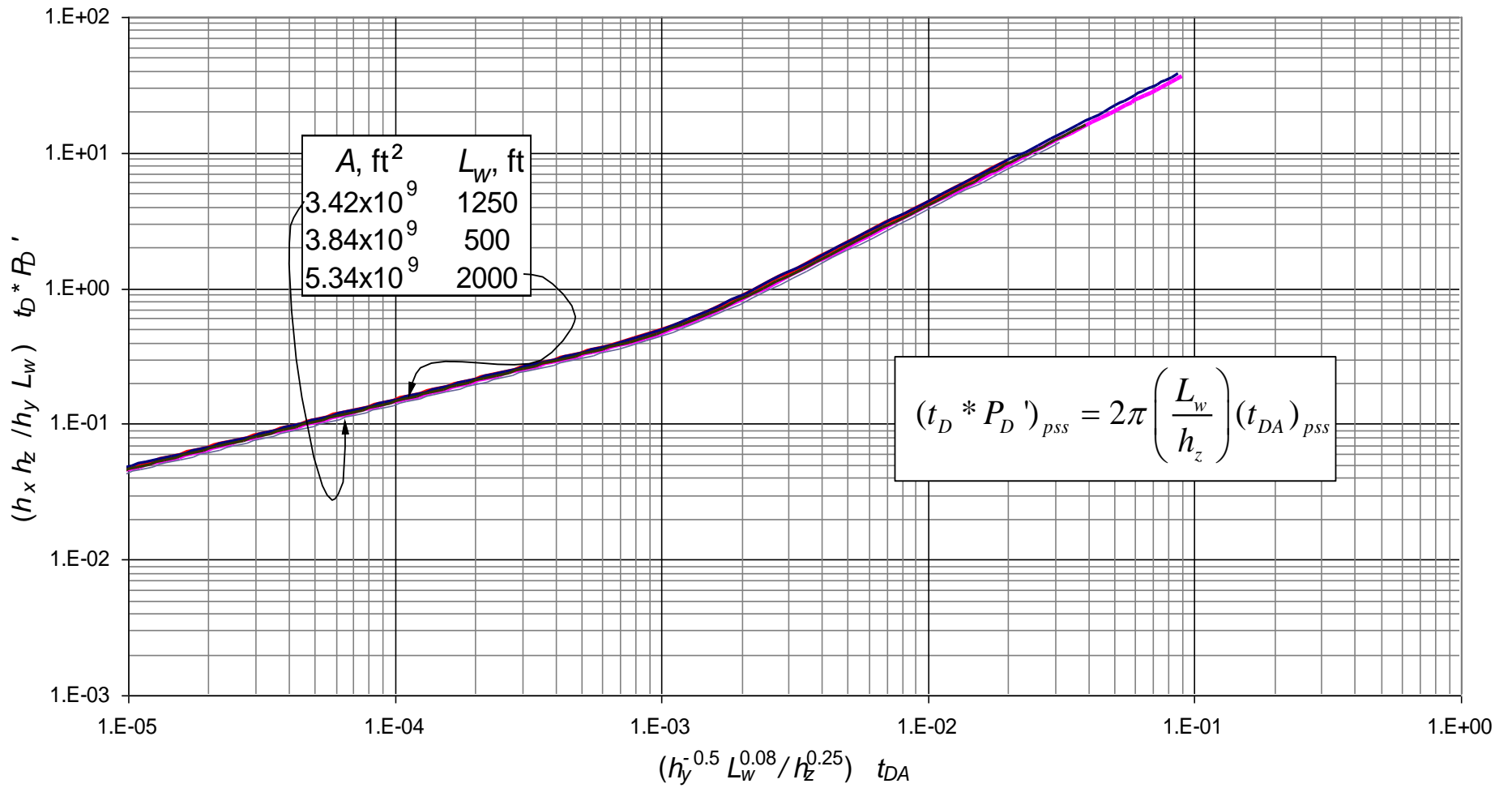


Figura 8. Casos de Flujo Pseudoestable. A) Pozo Centrado (Lineal Tardío y Pseudoestable), B) Pozo Descentrado (Hemilineal y Pseudoestable).



Gráfica 8. Flujo Pseudoestable, Gráfica $(h_y^{-0.5} L_w^{0.08} / h_z^{0.25}) t_{DA}$ vs $(h_x h_z / h_y L_w) t_D * P_D'$.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión el flujo pseudoestable en términos de t_D es:

$$(t_D^* P_D')_{pss} = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DA})_{pss} \quad (1.1.61)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.2) y (1.1.4) en la Ec. (1.1.61), se obtiene la ecuación resultante para determinar A.

$$\frac{k_y L_w}{141.2 q \mu B} [t^* \Delta P'] = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} \right)$$

Despejando A.

$$A = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t} \right) \frac{141.2 q \mu B}{k_y L_w [t^* \Delta P']}$$

$$A = \frac{1}{4.2744} \frac{q B t_{pss}}{h_z \phi c_t [t^* \Delta P']_{pss}} \quad (1.1.62)$$

Tomando el tiempo $t=1$ hr, se obtiene:

$$A = \frac{1}{4.2744} \frac{q B}{h_z \phi c_t [t^* \Delta P']_{pss1}} \quad (1.1.63)$$

En donde $(t^* \Delta P')_{pss}$ es la derivada de presión del flujo pseudoestable, leído a t_{pss} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.1.2. INTERSECCIONES YACIMIENTOS DE ACEITE (PTA).

Tomando las ecuaciones gobernantes adimensionales de las Derivadas de Presión de dos flujos con diferente pendiente e igualándolas, se obtienen las expresiones para hallar parámetros característicos del yacimiento y el pozo por medio del punto de intersección entre dichos flujos.

1.1.2.1. Intersecciones con el Flujo Radial Temprano.

1. Flujo Radial Temprano y Flujo Lineal Temprano:

Radial temprano:

$$(t_D * P_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Lineal temprano:

$$(t_D * P_D)_{el} = \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (1.1.14)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}}$$

$$t_{D_{ier-el}} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{k_y}{k_z} \right) \left(\frac{h_z}{r_w} \right)^2 \quad (1.1.64)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos t_{ier-el} .

$$\frac{0.0002637 k_y t_{ier-el}}{\phi \mu c_t r_w^2} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{k_y}{k_z} \right) \left(\frac{h_z}{r_w} \right)^2$$

$$k_z = 301.7727 \phi \mu c_t \frac{h_z^2}{t_{ier-el}} \quad (1.1.65)$$

2. Flujo Radial Temprano y Flujo Elíptico:

Radial temprano:

$$(t_D * P_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Elíptico:

$$(t_D * P_D)_{Ell} = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \quad (1.1.19)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}$$

$$(t_{D_{ier-Ell}})^{0.36} = \frac{1}{1.53989388} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z}{r_w^{0.72} L_w^{0.28}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \quad (1.1.66)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-Ell}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t_{ier-Ell}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.36} = \frac{1}{1.53989388} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z}{r_w^{0.72} L_w^{0.28}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14}$$

$$k_z = \left[12.6156 \frac{h_z k_x^{0.14}}{L_w^{0.28}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{t_{ier-Ell}} \right)^{0.36} \right]^{-2} \quad (1.1.67)$$

3. Flujo Radial Temprano y Flujo Lineal Tardío:

Radial temprano:

$$(t_D * P_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Lineal tardío:

$$(t_D * P_D)_{ll} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (1.1.28)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}$$

$$t_{D_{ier-ll}} = \frac{1}{4\pi} \frac{k_y}{k_z} \left(\frac{h_x h_z}{L_w r_w} \right)^2 \quad (1.1.68)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos t_{ier-ll} .

$$k_z = 301.7727 \left(\frac{h_x h_z}{L_w} \right)^2 \frac{\phi \mu c_t}{t_{ier-ll}} \quad (1.1.69)$$

4. Flujo Radial Temprano y Flujo Hemilineal:

Radial temprano:

$$(t_D * P_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Hemilineal:

$$(t_D * P_D)_{hl} = \frac{2\sqrt{\pi} L_w}{h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} \quad (1.1.32)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{ier-hl}})^{0.5} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z}{(2\sqrt{\pi}) L_w} \left(\frac{h_x}{r_w} \right) \quad (1.1.70)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos t_{ier-hl} .

$$\left[\frac{0.0002637 k_y t_{ier-hl}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right]^{0.5} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z}{(2\sqrt{\pi}) L_w} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)$$

$$k_z = 75.4432 \left(\frac{h_z h_x}{L_w} \right)^2 \left(\frac{\phi \mu c_t}{t_{ier-hl}} \right) \quad (1.1.71)$$

5. Flujo Radial Temprano y Flujo Parabólico:

Radial temprano:

$$(t_D * P_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Parabólico:

$$(t_D * P_D)_{PB} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{ier-PB}})^{-0.5} \quad (1.1.37)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{ier-PB}})^{-0.5}$$

$$(t_{D_{ier-PB}})^{0.5} = 11.1326 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \quad (1.1.72)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable b_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos t_{ier-PB} .

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t_{ier-PB}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = 11.1326 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}}$$

$$b_y = \left[\frac{0.0002637^{0.5}}{11.1326} \frac{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}}{L_w^{0.62}} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left(\frac{k_y t_{ier-PB}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} \right]^{1/2.3}$$

$$b_y = \left[\frac{1}{685.5538} \frac{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{0.25}}{L_w^{0.62}} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left(\frac{k_y t_{ier-PB}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \right]^{1/2.3} \quad (1.1.73)$$

6. Flujo Radial Temprano y Primer Caso de Flujo Estable:

Radial temprano:

$$(t_D * P_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Primer Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss1} = 361699.2 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 t_{DAss1}^{-1} \quad (1.1.43)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DAier-ss1} = 723398.4 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \quad (1.1.74)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss1}$.

$$A = \frac{1}{2743262799} \frac{h_z^{0.75} k_y^{1.5}}{L_w^{0.17} k_z^{0.5}} \left(\frac{h_y}{b_y} \right)^3 \frac{t_{ier-ss1}}{\phi \mu c_t} \quad (1.1.75)$$

7. Radial Temprano y Segundo Caso de Estable:

Radial temprano:

$$(t_D * P_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Segundo Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss2} = 322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} t_{DAss2}^{-1} \quad (1.1.45)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DA_{ier-ss2}} = 644854.44 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \quad (1.1.76)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss2}$.

$$A = \frac{1}{2445409329} \frac{h_z^{0.72} h_y^{2.95}}{L_w^{0.17} b_y^{3.07}} \frac{k_y^{1.5} t_{ier-ss2}}{\phi \mu c_t k_z^{0.5}} \quad (1.1.77)$$

8. Flujo Radial Temprano y Tercer Caso de Flujo Estable:

Radial temprano:

$$(t_D * P_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Tercer Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss3} = \frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{DA_{ss3}}^{-1} \quad (1.1.49)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DA_{ier-ss3}} = \frac{1}{121.47} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \quad (1.1.78)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss3}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{31.2191} \left(\frac{h_z^{0.75}}{h_x^{0.2} L_w^{0.85}} \right) \frac{k_y^{1.5} t_{ier-ss3}}{\phi \mu c_t k_z^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (1.1.79)$$

9. Flujo Radial Temprano y Cuarto Caso de Estable:

Radial temprano:

$$(t_D * P_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Cuarto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss4} = \frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) (t_{DA})_{ss4}^{-1} \quad (1.1.53)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DA_{ier-ss4}} = \frac{1}{234.062} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \quad (1.1.80)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss4}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{16.2016} \left(\frac{h_z^{0.75}}{h_x^{0.2} L_w^{0.85}} \right) \frac{k_y^{1.5} t_{ier-ss4}}{\phi \mu c_i k_z^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (1.1.81)$$

10. Flujo Radial Temprano y Quinto Caso de Estable:

Radial temprano:

$$(t_D * P_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Quinto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss5} = \frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) (t_{DA})_{ss5}^{-1} \quad (1.1.57)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DA_{ier-ss5}} = \frac{1}{2042.8993} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.81)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss5}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{1.8563} \left(\frac{h_z^{0.75}}{h_x^{0.2} L_w^{0.85}} \right) \frac{k_y^{1.5} t_{ier-ss5}}{\phi \mu c_t k_z^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (1.1.82)$$

11. Flujo Radial Temprano y Flujo Pseudoestable:

Radial temprano:

$$(t_D * P_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Estado Pseudoestable:

$$(t_D * P_D)_{pss} = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_D)_{pss} \frac{r_w^2}{A} \quad (1.1.61)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{DA_{ier-pss}}) = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left(\frac{h_z}{L_w} \right) \quad (1.1.83)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-pss}$.

$$A = \frac{1}{301.7727} \left(\frac{L_w}{h_z} \right) \frac{k_y^{0.5} k_z^{0.5} t_{ier-pss}}{\phi \mu c_t} \quad (1.1.84)$$

1.1.2.2. Intersecciones con el Primer Caso de Flujo Estable.

1. Primer Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Temprano:

Primer Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss1} = 361699.2 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 t_{Dss1}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.43)$$

Lineal temprano:

$$(t_D * P_D)_{el} = \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{Del}} \quad (1.1.14)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss1-el}})^{1.5} = 204066.921 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.25}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 \frac{A}{r_w^3} \quad (1.1.85)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss1-el}$.

$$A = \frac{1}{47654884040} \frac{h_z^{0.25}}{L_w^{0.17}} \left(\frac{h_y}{b_y} \right)^3 \left(\frac{k_y t_{iss1-el}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \quad (1.1.86)$$

2. Primer Caso de Flujo Estable y Flujo Elíptico:

Primer Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss1} = 361699.2 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 t_{Dss1}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.43)$$

Elíptico:

$$(t_D * P_D)_{Ell} = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{DEll})^{0.36} \quad (1.1.19)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\left(t_{D_{iss1-El}}\right)^{1.36} = 469771.5923 \frac{h_z^{0.25} A}{r_w^{2.72} L_w^{0.11}} \left(\frac{k_x}{k_y}\right)^{0.14} \left(\frac{b_y}{h_y}\right)^3 \quad (1.1.87)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss1-El}$.

$$A = \frac{1}{34608037630} \left(\frac{h_y}{b_y}\right)^3 \frac{L_w^{0.11} k_y^{1.5}}{h_z^{0.25} k_x^{0.14}} \left(\frac{t_{iss1-El}}{\phi \mu c_t}\right)^{1.36} \quad (1.1.88)$$

3. Primer Caso de Flujo Estable y Flujo Pseudorradial:

Primer Caso Estable:

$$\left(t_D * P_D\right)_{ss1} = 361699.2 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y}\right)^3 t_{D_{ss1}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.43)$$

Pseudorradial:

$$\left(t_D * P_D\right)_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (1.1.24)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{D_{iss1-pr}} = 723398.4 \frac{h_z^{0.25}}{L_w^{0.83}} \left(\frac{b_y}{h_y}\right)^3 \frac{A}{r_w^2} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (1.1.89)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss1-pr}$.

$$A = \frac{1}{2743262799} \frac{L_w^{0.83}}{h_z^{0.25}} \left(\frac{h_y}{b_y}\right)^3 \frac{k_y^{1.5} t_{iss1-pr}}{\phi \mu c_t k_x^{0.5}} \quad (1.1.90)$$

4. Primer Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Tardío:

Primer Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss1} = 361699.2 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 t_{Dss1}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.43)$$

Lineal Tardío:

$$(t_D * P_D)_{ll} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{Dll}} \quad (1.1.28)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss1-ll}})^{1.5} = 204066.921 \frac{h_z^{0.25} b_y^3}{L_w^{0.83} r_w^3} \left(\frac{h_x}{h_y} \right)^2 \quad (1.1.91)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss1-ll}$.

$$h_y = \left[47654884040 \frac{h_z^{0.25} b_y^3 h_x^2}{L_w^{0.83}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{k_y t_{iss1-ll}} \right)^{1.5} \right]^{0.5} \quad (1.1.92)$$

5. Primer Caso de Flujo Estable y Flujo Hemilineal:

Primer Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss1} = 361699.2 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 t_{Dss1}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.43)$$

Hemilineal:

$$(t_D * P_D)_{hl} = \frac{2\sqrt{\pi} L_w}{h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{Dhl} \right]^{0.5} \quad (1.1.32)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss1-hl}})^{1.5} = 102033.4605 \frac{h_z^{0.25} b_y^3}{L_w^{0.83} r_w^3} \left(\frac{h_x}{h_y} \right)^2 \quad (1.1.93)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss1-hl}$.

$$h_y = \left[23827442020 \frac{h_z^{0.25} b_y^3 h_x^2}{L_w^{0.83}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{k_y t_{iss1-hl}} \right)^{1.5} \right]^{1/2} \quad (1.1.94)$$

6. Primer Caso de Flujo Estable y Flujo Parabólico:

Primer Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss1} = 361699.2 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 t_{D_{ss1}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.43)$$

Parabólico:

$$(t_D * P_D)_{PB} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} \quad (1.1.37)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$361699.2 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 t_{D_{ss1}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5}$$

$$(t_{D_{iss1-PB}})^{0.5} = 64980.18 \frac{b_y^{0.7} A}{h_z^{0.13} L_w^{0.45} h_y^{1.95} r_w^{0.75}} \quad (1.1.95)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss1-PB}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t_{iss1-PB}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = 64980.18 \frac{b_y^{0.7} A}{h_z^{0.13} L_w^{0.45} h_y^{1.95} r_w^{0.75}}$$

$$A = \frac{1}{4001527.862} \frac{h_z^{0.13} L_w^{0.45} h_y^{1.95}}{b_y^{0.7} r_w^{0.25}} \left(\frac{k_y t_{iss1-PB}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \quad (1.1.96)$$

1.1.2.3. Intersecciones con el Segundo Caso de Flujo Estable.

1. Segundo Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Temprano:

Segundo Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss2} = 322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} t_{D_{ss2}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.45)$$

Lineal temprano:

$$(t_D * P_D)_{el} = \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (1.1.14)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss2-el}})^{1.5} = 181910.078 \frac{h_z^{0.28} L_w^{0.17} b_y^{3.07} A}{h_y^{2.95} r_w^3} \quad (1.1.97)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss2-el}$.

$$A = \frac{1}{42480690310} \frac{h_y^{2.95}}{h_z^{0.28} L_w^{0.17} b_y^{3.07}} \left(\frac{k_y t_{iss2-el}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \quad (1.1.98)$$

2. Segundo Caso de Flujo Estable y Flujo Elíptico:

Segundo Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss2} = 322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} t_{D_{ss2}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.45)$$

Elíptico:

$$(t_D * P_D)_{Ell} = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \quad (1.1.19)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss2-Ell}})^{1.36} = 418765.5038 \frac{h_z^{0.28} A}{r_w^{2.72} L_w^{0.11}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \left(\frac{b_y^{3.07}}{h_y^{2.95}} \right) \quad (1.1.99)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss2-Ell}$.

$$A = \frac{1}{30850422960} \frac{L_w^{0.11} h_y^{2.95} k_y^{1.5}}{h_z^{0.28} b_y^{3.07} k_x^{0.14}} \left(\frac{t_{iss2-Ell}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.36} \quad (1.1.100)$$

3. Segundo Caso de Flujo Estable y Flujo Pseudorradial:

Segundo Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss2} = 322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} t_{D_{ss2}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.45)$$

Pseudorradial:

$$(t_D * P_D)_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (1.1.24)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{D_{iss2-pr}} = 644854.4364 \frac{b_y^{3.07} h_z^{0.28}}{h_y^{2.95} L_w^{0.83}} \frac{A}{r_w^2} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (1.1.101)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss2-pr}$.

$$A = \frac{1}{2445409315} \frac{h_y^{2.95} L_w^{0.83} k_y^{1.5} t_{iss2-pr}}{b_y^{3.07} h_z^{0.28} \phi \mu c_t k_x^{0.5}} \quad (1.1.102)$$

4. Segundo Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Tardío:

Segundo Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss2} = 322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} t_{D_{ss2}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.45)$$

Lineal Tardío:

$$(t_D * P_D)_{ll} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (1.1.28)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} t_{D_{ss2}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}$$

$$(t_{D_{iss2-ll}})^{1.5} = 181910.078 \frac{h_z^{0.28} b_y^{3.07} h_x^2}{L_w^{0.83} h_y^{1.95} r_w^3} \quad (1.1.103)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss2-ll}$.

$$h_y = \left[42480690310 \frac{h_z^{0.28} b_y^{3.07} h_x^2}{L_w^{0.83}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{k_y t_{iss2-ll}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.95} \quad (1.1.104)$$

5. Segundo Caso de Flujo Estable y Flujo Hemilineal:

Segundo Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss2} = 322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} t_{D_{ss2}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.45)$$

Hemilineal:

$$(t_D * P_D)_{hl} = \frac{2\sqrt{\pi}L_w}{h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} \quad (1.1.32)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss2-hl}})^{1.5} = 90955.039 \frac{h_z^{0.28} b_y^{3.07} h_x^2}{L_w^{0.83} h_y^{1.95} r_w^3} \quad (1.1.105)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss2-hl}$.

$$h_y = \left[21240345150 \frac{h_z^{0.28} b_y^{3.07} h_x^2}{L_w^{0.83}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{k_y t_{iss2-hl}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.95} \quad (1.1.106)$$

6. Segundo Caso de Flujo Estable y Flujo Parabólico:

Segundo Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss2} = 322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} t_{D_{ss2}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.45)$$

Parabólico:

$$(t_D * P_D)_{PB} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} \quad (1.1.37)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} t_{D_{ss2}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5}$$

$$(t_{D_{iss2-PB}})^{0.5} = 57924.8726 \frac{b_y^{0.77} A}{h_z^{0.1} h_y^{1.9} L_w^{0.45} r_w^{0.75}} \quad (1.1.107)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss2-PB}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t_{iss2-PB}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = 57924.8726 \frac{b_y^{0.77} A}{h_z^{0.1} h_y^{1.9} L_w^{0.45} r_w^{0.75}}$$

$$A = \frac{1}{3567056.779} \frac{h_z^{0.1} h_y^{1.9} L_w^{0.45}}{b_y^{0.77} r_w^{0.25}} \left(\frac{k_y t_{iss2-PB}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \quad (1.1.108)$$

1.1.2.4. Intersecciones con el Tercer Caso de Flujo Estable.

1. Tercer Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Temprano:

Tercer Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss3} = \frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{Dss3}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.49)$$

Lineal temprano:

$$(t_D * P_D)_{el} = \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (1.1.14)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss3-el}})^{1.5} = \frac{1}{430.5999} \left(\frac{h_y^{2.5} L_w^{0.85} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^3} \right) \quad (1.1.109)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss3-el}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{542.3265} \left(\frac{1}{h_x^{0.2} L_w^{0.85} h_z^{0.25}} \right) \left(\frac{k_y t_{iss3-el}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.1.110)$$

2. Tercer Caso de Flujo Estable y Flujo Elíptico:

Tercer Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss3} = \frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{Dss3}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.149)$$

Elíptico:

$$(t_D * P_D)_{Ell} = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \quad (1.1.19)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss3-Ell}})^{1.36} = \frac{1}{187.0509} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \left(\frac{h_z^{0.25} h_y^{1.5} L_w^{0.57}}{h_x^{0.8}} \right) \frac{A}{r_w^{2.72}} \quad (1.1.111)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss3-Ell}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{393.8496} \frac{k_y^{1.5}}{h_z^{0.25} L_w^{0.57} h_x^{0.2} k_x^{0.14}} \left(\frac{t_{iss3-Ell}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.36} \right]^{0.4} \quad (1.1.112)$$

3. Tercer Caso de Flujo Estable y Flujo Pseudorradial:

Tercer Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss3} = \frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{Dss3}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.149)$$

Pseudorradial:

$$(t_D * P_D)_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (1.1.24)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{D_{iss3-pr}} = \frac{1}{121.47} \left(\frac{h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{L_w^{0.15} r_w^2} \right) \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (1.1.113)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss3-pr}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{31.2191} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{0.2}} \right) \frac{k_y^{1.5} t_{iss3-pr}}{\phi \mu_c k_x^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (1.1.114)$$

4. Tercer Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Tardío:

Tercer Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss3} = \frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss3}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.49)$$

Lineal Tardío:

$$(t_D * P_D)_{ll} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (1.1.28)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss3}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}$$

$$(t_{D_{iss3-ll}})^{1.5} = \frac{1}{430.5999} \left(\frac{h_z^{0.25} h_y^{2.5} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \right) \quad (1.1.115)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss3-ll}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{542.3266} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right) \left(\frac{k_y t_{iss3-ll}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.1.116)$$

5. Tercer Caso de Flujo Estable y Flujo Hemilineal:

Tercer Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss3} = \frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{Dss3}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.49)$$

Hemilineal:

$$(t_D * P_D)_{hl} = \frac{2\sqrt{\pi} L_w}{h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{Dhl} \right]^{0.5} \quad (1.1.32)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss3-hl}})^{1.5} = \frac{1}{861.1999} \left(\frac{h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \right) \quad (1.1.117)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss3-hl}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{271.1633} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right) \left(\frac{k_y t_{iss3-hl}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.1.118)$$

6. Tercer Caso de Flujo Estable y Flujo Parabólico:

Tercer Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss3} = \frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{Dss3}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.49)$$

Parabólico:

$$(t_D * P_D)_{PB} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5} \quad (1.1.37)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{Dss3}^{-1} \frac{A}{r_w^2} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5}$$

$$(t_{D_{iss3-PB}})^{0.5} = \frac{1}{1352.2769} \left(\frac{h_y^{3.55} L_w^{0.23} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \right) \quad (1.1.119)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss3-PB}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t_{iss3-PB}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = \frac{1}{1352.2769} \left(\frac{h_y^{3.55} L_w^{0.23} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \right)$$

$$h_y = \left[21.9594 \left(\frac{h_z^{0.13} b_y^{2.3}}{L_w^{0.23} h_x^{0.2} r_w^{0.25}} \right) \left(\frac{k_y t_{iss3-PB}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \right]^{1/3.55} \quad (1.1.120)$$

1.1.2.5. Intersecciones con el Cuarto Caso de Flujo Estable.

1. Cuarto Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Temprano:

Cuarto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss4} = \frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{Dss4}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.53)$$

Lineal temprano:

$$(t_D * P_D)_{el} = \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (1.1.14)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss4-el}})^{1.5} = \frac{1}{829.7282} \left(\frac{h_y^{2.5} L_w^{0.85} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^3} \right) \quad (1.1.121)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss4-el}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{281.4485} \left(\frac{1}{h_x^{0.2} L_w^{0.85} h_z^{0.25}} \right) \left(\frac{k_y t_{iss4-el}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.1.122)$$

2. Cuarto Caso de Flujo Estable y Flujo Elíptico:

Cuarto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss4} = \frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss4}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.53)$$

Elíptico:

$$(t_D * P_D)_{Ell} = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \quad (1.1.19)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss4-Ell}})^{1.36} = \frac{1}{360.4306} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \left(\frac{h_z^{0.25} h_y^{1.5} L_w^{0.57}}{h_x^{0.8}} \right) \frac{A}{r_w^{2.72}} \quad (1.1.123)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss4-Ell}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{204.3942} \frac{k_y^{1.5}}{h_z^{0.25} L_w^{0.57} h_x^{0.2} k_x^{0.14}} \left(\frac{t_{iss4-ell}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.36} \right]^{0.4} \quad (1.1.124)$$

3. Cuarto Caso de Flujo Estable y Flujo Pseudorradial:

Cuarto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss4} = \frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss4}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.53)$$

Pseudorradial:

$$(t_D * P_D)_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (1.1.24)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{D_{iss4-pr}} = \frac{1}{234.062} \left(\frac{h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{L_w^{0.15} r_w^2} \right) \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (1.1.125)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss4-ll}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{16.2016} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{0.2}} \right) \frac{k_y^{1.5} t_{iss4-pr}}{\phi \mu c_t k_x^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (1.1.126)$$

4. Cuarto Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Tardío:

Cuarto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss4} = \frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss4}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.53)$$

Lineal Tardío:

$$(t_D * P_D)_{ll} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (1.1.28)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss4}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}$$

$$(t_{D_{iss4-ll}})^{1.5} = \frac{1}{829.7282} \left(\frac{h_z^{0.25} h_y^{2.5} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \right) \quad (1.1.127)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss4-ll}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{281.4485} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right) \left(\frac{k_y t_{iss4-ll}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.1.128)$$

5. Cuarto Caso de Flujo Estable y Flujo Hemilineal:

Cuarto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss4} = \frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss4}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.53)$$

Hemilineal:

$$(t_D * P_D)_{hl} = \frac{2\sqrt{\pi} L_w}{h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} \quad (1.1.32)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss4-hl}})^{1.5} = \frac{1}{1659.4564} \left(\frac{h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \right) \quad (1.1.129)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss4-hl}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{140.7243} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right) \left(\frac{k_y t_{iss4-hl}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.1.130)$$

6. Cuarto Caso de Flujo Estable y Flujo Parabólico:

Cuarto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss4} = \frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss4}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.53)$$

Parabólico:

$$(t_D * P_D)_{PB} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} \quad (1.1.37)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss4}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5}$$

$$(t_{D_{iss4-PB}})^{0.5} = \frac{1}{2605.7186} \left(\frac{h_y^{3.55} L_w^{0.23} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \right) \quad (1.1.131)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss4-PB}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t_{iss4-PB}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = \frac{1}{2605.7186} \left(\frac{h_y^{3.55} L_w^{0.23} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \right)$$

$$h_y = \left[42.3139 \left(\frac{h_z^{0.13} b_y^{2.3}}{L_w^{0.23} h_x^{0.2} r_w^{0.25}} \right) \left(\frac{k_y t_{iss4-PB}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \right]^{1/3.55} \quad (1.1.132)$$

1.1.2.6. Intersecciones con el Quinto Caso de Flujo Estable.

1. Quinto Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Temprano:

Quinto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss5} = \frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss5}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.57)$$

Lineal Temprano:

$$(t_D * P_D)_{el} = \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (1.1.14)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss5-el}})^{1.5} = \frac{1}{7241.8895} \left(\frac{h_y^{2.5} L_w^{0.85} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^3} \right) \quad (1.1.133)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss5-el}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{32.2465} \left(\frac{1}{h_x^{0.2} L_w^{0.85} h_z^{0.25}} \right) \left(\frac{k_y t_{iss5-el}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.1.134)$$

2. Quinto Caso de Flujo Estable y Flujo Elíptico:

Quinto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss5} = \frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss5}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.57)$$

Elíptico:

$$(t_D * P_D)_{Ell} = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \quad (1.1.19)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss5-ell}})^{1.36} = \frac{1}{3145.8481} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \left(\frac{h_z^{0.25} h_y^{1.5} L_w^{0.57}}{h_x^{0.8}} \right) \frac{A}{r_w^{2.72}} \quad (1.1.135)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss5-ell}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{23.4181} \frac{k_y^{1.5}}{h_z^{0.25} L_w^{0.57} h_x^{0.2} k_x^{0.14}} \left(\frac{t_{iss5-ell}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.36} \right]^{0.4} \quad (1.1.136)$$

3. Quinto Caso de Flujo Estable y Flujo Pseudorradial:

Quinto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss5} = \frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss5}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.57)$$

Pseudorradial:

$$(t_D * P_D)_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (1.1.24)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{D_{iss5-pr}} = \frac{1}{2042.8993} \left(\frac{h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{L_w^{0.15} r_w^2} \right) \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (1.1.137)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss5-pr}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{1.8563} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{0.2}} \right) \frac{k_y^{1.5} t_{iss5-pr}}{\phi \mu c_t k_x^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (1.1.138)$$

4. Quinto Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Tardío:

Quinto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss5} = \frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss5}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.57)$$

Lineal Tardío:

$$(t_D * P_D)_{ll} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (1.1.28)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss5}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}$$

$$(t_{D_{iss5-ll}})^{1.5} = \frac{1}{7241.8895} \left(\frac{h_z^{0.25} h_y^{2.5} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \right) \quad (1.1.139)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss5-ll}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{32.2465} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right) \left(\frac{k_y t_{iss5-ll}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.1.140)$$

5. Quinto Caso de Flujo Estable y Flujo Hemilineal:

Quinto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss5} = \frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss5}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.57)$$

Hemilineal:

$$(t_D * P_D)_{hl} = \frac{2\sqrt{\pi}L_w}{h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} \quad (1.1.32)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{iss5-hl}})^{1.5} = \frac{1}{14483.7789} \left(\frac{h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \right) \quad (1.1.141)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss5-hl}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{16.1233} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right) \left(\frac{k_y t_{iss5-hl}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.1.142)$$

6. Quinto Caso de Flujo Estable y Flujo Parabólico:

Quinto Caso Estable:

$$(t_D * P_D)_{ss5} = \frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss5}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} \quad (1.1.57)$$

Parabólico:

$$(t_D * P_D)_{PB} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} \quad (1.1.37)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{D_{ss5}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5}$$

$$(t_{D_{iss5-PB}})^{0.5} = \frac{1}{22742.7808} \left(\frac{h_y^{3.55} L_w^{0.23} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \right) \quad (1.1.143)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss5-PB}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t_{iss5-PB}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = \frac{1}{22742.7808} \left(\frac{h_y^{3.55} L_w^{0.23} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \right)$$

$$h_y = \left[369.3164 \left(\frac{h_z^{0.13} b_y^{2.3}}{L_w^{0.23} h_x^{0.2} r_w^{0.25}} \right) \left(\frac{k_y t_{iss5-PB}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \right]^{1/3.55} \quad (1.1.144)$$

1.1.2.7. Intersecciones con el Flujo Pseudoestable.

1. Flujo Pseudoestable y Flujo Lineal Temprano:

Pseudoestable:

$$(t_D * P_D)_{pss} = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) t_{D_{pss}} \frac{r_w^2}{A} \quad (1.1.61)$$

Lineal temprano:

$$(t_D * P_D)_{el} = \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (1.1.14)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_D)_{ipss-el}^{0.5} = \frac{A}{2\sqrt{\pi} r_w L_w} \quad (1.1.145)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ipss-el}$.

$$A = \frac{L_w}{17.3716} \left(\frac{k_y t_{ipss-el}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \quad (1.1.146)$$

2. Flujo Pseudoestable y Flujo Elíptico:

Pseudoestable:

$$(t_D * P_D)_{pss} = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_D)_{pss} \frac{r_w^2}{A} \quad (1.1.61)$$

Elíptico:

$$(t_D * P_D)_{Ell} = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \quad (1.1.19)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{ipss-Ell}})^{0.64} = \frac{1}{8.1605} \frac{A}{L_w^{0.72} r_w^{1.28}} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} \quad (1.1.147)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ipss-Ell}$.

$$A = \frac{1}{23.9206} L_w^{0.72} k_x^{0.14} k_y^{0.5} \left(\frac{t_{ipss-Ell}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.64} \quad (1.1.148)$$

3. Flujo Pseudoestable y Flujo Pseudorradial:

Pseudoestable:

$$(t_D * P_D)_{pss} = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_D)_{pss} \frac{r_w^2}{A} \quad (1.1.61)$$

Pseudorradial:

$$(t_D * P_D)_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (1.1.24)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{D_{ipss-pr}} = \frac{1}{4\pi} \frac{A}{r_w^2} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (1.1.149)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ipss-pr}$.

$$A = \frac{1}{301.7727} \left(\frac{k_y^{0.5} k_x^{0.5} t_{ipss-pr}}{\phi \mu c_t} \right) \quad (1.1.150)$$

4. Flujo Pseudoestable y Flujo Lineal Tardío:

Pseudoestable:

$$(t_D * P_D)_{pss} = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_D)_{pss} \frac{r_w^2}{A} \quad (1.1.61)$$

Lineal Tardío:

$$(t_D * P_D)_{ll} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (1.1.28)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{ipss-ll}})^{0.5} = \left(\frac{A}{2\pi h_x r_w} \right) \sqrt{\pi} \quad (1.1.151)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ipss-ll}$.

$$A = \left(\frac{h_x}{17.3716} \right) \left(\frac{k_y t_{ipss-ll}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \quad (1.1.152)$$

5. Flujo Pseudoestable y Flujo Hemilineal:

Pseudoestable:

$$(t_D * P_D)_{pss} = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_D)_{pss} \frac{r_w^2}{A} \quad (1.1.61)$$

Hemilineal:

$$(t_D * P_D)_{hl} = \frac{2\sqrt{\pi}L_w}{h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} \quad (1.1.32)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{ipss-hl}})^{0.5} = \frac{A}{\sqrt{\pi}r_w h_x} \quad (1.1.153)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ipss-hl}$.

$$A = 34.7432h_x \left(\frac{k_y t_{ipss-hl}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \quad (1.1.154)$$

6. Flujo Pseudoestable y Flujo Parabólico:

Pseudoestable:

$$(t_D * P_D)_{pss} = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_D)_{pss} \frac{r_w^2}{A} \quad (1.1.61)$$

Parabólico:

$$(t_D * P_D)_{PB} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} \quad (1.1.37)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{D_{ipss-PB}})^{1.5} = \left(\frac{1}{1.1288} \right) \frac{A h_z^{0.38} b_y^{2.3}}{L_w^{0.38} h_y^{1.05} r_w^{3.25}} \quad (1.1.155)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ipss-PB}$.

$$A = 4.83373 \frac{L_w^{0.38} h_y^{1.05} r_w^{3.25}}{h_z^{0.38} b_y^{2.3}} \left(\frac{k_y t_{ipss-PB}}{\phi \mu c_i} \right)^{1.5} \quad (1.1.156)$$

1.2. ANÁLISIS DE TRASIENTE DE PRESIÓN EN YACIMIENTOS DE GAS.

En el caso de yacimientos gasíferos, es necesario hacer un análisis especial debido a la alta compresibilidad de los gases frente a los líquidos, la cual permite que la onda de presión se disipe o viaje más rápido que en formaciones contenedoras de líquido.

Normalmente, al interpretar pruebas de presión en yacimientos gasíferos, se requiere linealizar la ecuación de difusividad, lo cual puede ser efectuado de tres maneras:

1. Tratando el caso como si fuera un yacimiento de petróleo (Válido para presiones mayores de 4000 psi).
2. Haciendo consideración de una P^2 (Válido para presiones inferiores a 2000 psi).
3. Utilizando el concepto de Pseudopresión (Válido para presiones entre 2000 y 4000 psi, pero además, también describe muy bien el comportamiento del producto viscosidad-factor de compresibilidad del gas en todos los rangos de presiones).

En este documento se trabajará con el concepto de pseudopresión introducido por Al-Hussainy et al. (1966). debido a su excelente descripción del producto (μc_i), lo cual permite un fiable análisis de transiente de presión en yacimientos de este tipo, y hace a este método el más indicado y favorable.

Al-Hussainy, Ramey and Crawford introdujeron un método de linealización más riguroso llamado pseudopresión la cual permite que la ecuación general de difusividad se solucione sin suposiciones limitantes que restringen ciertas propiedades de gases a permanecer constantes con la presión:

La Pseudopresión adimensional y la Derivada de la pseudopresión adimensional están definidas por:

$$m(P)_D = \frac{k_y L_w [m(P_i) - m(P)]}{1422.52 q T} = \frac{k_y L_w \Delta m(P)}{1422.52 q T} \quad (1.2.1)$$

$$t_D * m(P)_D ' = \frac{k_y L_w [t * \Delta m(P)']}{1422.52qT} \quad (1.2.2)$$

Agarwal (1949) introdujo la función pseudotiempo para tener en cuenta la dependencia con respecto al tiempo de la viscosidad del gas y de la compresibilidad total del sistema:

$$t_a = \int_{t_0}^t \frac{dt}{\mu(t)c_t(t)} \quad (1.2.3)$$

El pseudotiempo es mejor definido como función de la presión dado en hr psi/cp:

$$t_a(P) = \int_{P_0}^P \frac{(dt / dP)}{\mu(P)c_t(P)} dP \quad (1.2.4)$$

Se puede ver que μ y c_t son ahora propiedades dependientes de la presión. Rescribiendo el tiempo adimensional tenemos:

$$t_D = \frac{0.0002637k_y t}{\phi(\mu c_t)_i r_w^2} \quad (1.2.5)$$

Incluyendo la función pseudotiempo, $t_a(P)$, en la ecuación (1.2.5), el pseudotiempo adimensional está dado por:

$$t_{Da} = \left(\frac{0.0002637k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P) \quad (1.2.6)$$

Nótese que el producto viscosidad-compresibilidad no se ve en la ecuación (1.2.6) debido a que son incluidos en la función pseudotiempo. Multiplicando y luego dividiendo por $(\mu c_t)_i$, una ecuación similar a la expresión de pseudotiempo adimensional general, Ecuación (1.2.7), será obtenida.

$$t_{Da} = \left(\frac{0.0002637k_y}{\phi(\mu c_t)_i r_w^2} \right) [(\mu c_t)_i \times t_a(P)] \quad (1.2.7)$$

Tomando el pseudotiempo adimensional con respecto al área del yacimiento se obtiene:

$$t_{DaA} = \left(\frac{0.0002637k_y}{\phi A} \right) t_a(P) = \left(\frac{0.0002637k_y}{\phi h_x h_y} \right) t_a(P) \quad (1.2.8)$$

1.2.1. ECUACIONES DE FLUJO EN POZOS HORIZONTALES EN YACIMIENTOS DE GAS (PTA).

1.2.1.1. Flujo Radial Temprano (Early Radial (er)):

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes a la presión y a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$P_{D_{er}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left[\ln \left(\sqrt{\frac{k_z}{k_y}} t_{D_{er}} \right) + 0.80907 + 2s_m \right] \quad (1.1.9)$$

$$(t_D * P_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudopresión y de la Derivada de pseudopresión para yacimientos de gas:

$$m(P)_{D_{er}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left[\ln \left(\sqrt{\frac{k_z}{k_y}} t_{D_{aer}} \right) + 0.80907 + 2s_m \right] \quad (1.2.9)$$

$$[t_D * m(P)_D]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.2.10)$$

Reemplazando la expresión de la derivada de pseudopresión adimensional, Ec. (1.2.2), en la Ec. (1.2.10), se obtiene la ecuación resultante para determinar L_w y $(k_z k_y)^{0.5}$ en donde $[t * \Delta m(P)]_{er1}$ es la derivada de pseudopresión del flujo radial temprano, leído a $t=1$ hr.

$$\frac{k_y L_w}{1422.52 qT} [t * \Delta m(P)] = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}}$$

$$\frac{k_y L_w}{k_y^{0.5} qT} [t * \Delta m(P)] = \frac{1422.52}{2} \sqrt{\frac{1}{k_z}}$$

Despejando L_w y $(k_z k_y)^{0.5}$:

$$\sqrt{k_y} L_w = \frac{711.26qT}{[t^* \Delta m(P)]_{er}} \sqrt{\frac{1}{k_z}}$$

$$\sqrt{k_z k_y} = \frac{711.26qT}{L_w [t^* \Delta m(P)]_{er1}} \quad (1.2.11)$$

$$L_w = \frac{711.26qT}{[t^* \Delta m(P)]_{er1}} \sqrt{\frac{1}{k_z k_y}} \quad (1.2.12)$$

Se procede a obtener la ecuación para determinar el daño mecánico ocurrido en el pozo, pero, como explica Escobar et al (2009). en el caso de yacimientos gasíferos el factor de daño como el efecto del flujo no-Darcy se incluyen para explicar los efectos de la alta velocidad y posible daño en la cara del pozo y en la vecindad del mismo. Es debido a esto que se tratará el concepto de daño mecánico aparente (s_m') el cual añade al daño mecánico un término más denominado término de flujo no-Darcy o factor de turbulencia.

El daño mecánico aparente está definido por:

$$s_m' = s_m + Dq \quad (1.2.13)$$

La constante D crea un aumento considerable a medida que se aumenta el caudal de producción. El valor de D varía con la presión, sin embargo, para simplificar puede ser considerado constante como aproximación aceptable. D es dada en Mscfd-1.

$$D = 2.222 \times 10^{-15} \frac{\gamma_g khB}{\mu_g r_w h_p^2} \quad (1.2.14)$$

La variable h_p representa la longitud (o espesor) del intervalo productor. Para un pozo vertical penetrado y completado en todo el estrato, $h_p=h$. La permeabilidad está dada en md.

Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudopresión adimensional (1.2.9) en la ecuación gobernante de la derivada de pseudopresión adimensional (1.2.10) se obtiene:

$$\frac{m(P)_D}{t_D^* m(P)_D'} = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left[\ln \left(\sqrt{\frac{k_z}{k_y}} t_{Da} \right) + 0.80907 + 2s_m' \right]}{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}}}$$

$$\frac{m(P)_D}{t_D * m(P)_D'} = \left[\ln \left(\sqrt{\frac{k_z}{k_y}} t_{Da} \right) + 0.80907 + 2s_m' \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.2.1), (1.2.2) y (1.2.6) en la anterior ecuación, se tiene:

$$s_m' = \frac{1}{2} \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta m(P)}{1422.52 q T}}{\frac{k_y L_w}{1422.52 q T} [t * \Delta m(P)]} - \ln \left[\sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P) \right] - 0.80907 \right]$$

$$s_m' = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta m(P)_{er}}{[t * \Delta m(P)]_{er}} - \ln \left[\sqrt{k_z k_y} \left(\frac{t_a(P)_{er}}{\phi r_w^2} \right) \right] + 7.43 \right] \quad (1.2.15)$$

En donde $[(t * \Delta m(P))']_{er}$ es la derivada de pseudopresión del flujo radial temprano, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{er}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.2.1.2. Flujo Lineal Temprano (Early Linear(el)):

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes a la presión y a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$P_{D_{el}} = \frac{2r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_z + s_m) \quad (1.1.13)$$

$$(t_D * P_D)_{el} = \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (1.1.14)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudopresión y de la Derivada de pseudopresión para yacimientos de gas:

$$m(P)_{D_{el}} = \frac{2r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{Da}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_z + s_m') \quad (1.2.16)$$

$$[t_D * m(P)_D]_{el} = \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{Da}} \quad (1.2.17)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.2) y (1.2.6) en la Ec. (1.2.17), se obtiene la ecuación resultante para determinar L_w y k_y .

$$\frac{k_y L_w}{1422.52 q T} [t^* \Delta m(P)] = \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\left(\frac{0.0002637 \pi k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P)}$$

Despejo L_w y k_y .

$$\sqrt{k_y} L_w = 40.94 \frac{q T}{h_z [t^* \Delta m(P)]_{el}} \sqrt{\left(\frac{t_a(P)_{el}}{\phi} \right)}$$

$$k_y = \left(40.94 \frac{q T}{L_w h_z [t^* \Delta m(P)]_{el}} \right)^2 \left(\frac{t_a(P)_{el}}{\phi} \right) \quad (1.2.18)$$

$$L_w = 40.94 \frac{q T}{h_z [t^* \Delta m(P)]_{el}} \sqrt{\left(\frac{t_a(P)_{el}}{k_y \phi} \right)} \quad (1.2.19)$$

Se procede a obtener la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m' + s_z$) como sigue:

Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudopresión adimensional (1.2.16) en la ecuación gobernante de la derivada de pseudopresión adimensional (1.2.17) se obtiene:

$$\frac{m(P)_D}{t_D^* m(P)_D'} = \frac{\frac{2r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{Da}}}{\frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{Da}}} + \frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_z + s_m')}{\frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{Da}}}$$

$$\frac{m(P)_D}{t_D^* m(P)_D'} = 2 + \frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_z + s_m')}{\frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{Da}}}$$

$$(s_z + s_m') = \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\frac{m(P)_D}{t_D^* m(P)_D'} - 2 \right] \left[\frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{Da}} \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.2.1), (1.2.2) y (1.2.6) en la anterior ecuación, se tiene:

$$(s_z + s_m)' = \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta m(P)}{1422.52 q T}}{\frac{k_y L_w}{1422.52 q T} [t^* \Delta m(P)]'} - 2 \right] \left[\frac{r_w}{h_z} \sqrt{\left(\frac{0.0002637 \pi k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P)} \right]$$

$$(s_z + s_m)' = \frac{1}{34.74321 h_z} \left[\frac{\Delta m(P)_{el}}{[t^* \Delta m(P)]'_{el}} - 2 \right] \sqrt{\left(\frac{k_z t_a(P)_{el}}{\phi} \right)}$$
(1.2.20)

En donde $[(t^* \Delta m(P)]'_{el}$ es la derivada de pseudopresión del flujo lineal temprano, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{el}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.2.1.3. Flujo Elíptico (Elliptical (Ell)).

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes a la presión y a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$P_{D_{Ell}} = 2.138742 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} + s_{Ell}$$
(1.1.18)

$$(t_D^* P_D)'_{Ell} = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}$$
(1.1.19)

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudopresión y de la Derivada de pseudopresión para yacimientos de gas:

$$m(P)_{D_{Ell}} = 2.138742 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{aEll}})^{0.36} + s_{Ell}$$
(1.2.21)

$$[t_D^* m(P)_D]'_{Ell} = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{aEll}})^{0.36}$$
(1.2.22)

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.2) y (1.2.6) en la Ec. (1.2.22), se obtiene la ecuación resultante para determinar k_y y k_x :

$$\frac{k_y L_w}{1422.52 q T} [t^* \Delta m(P)] = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} \left[\left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P) \right]^{0.36}$$

Despejando L_w .

$$L_w = \left[56.3792 \frac{q T}{k_y^{0.5} k_x^{0.14} h_z [t^* \Delta m(P)]_{Ell}} \left(\frac{t_a(P)_{Ell}}{\phi} \right)^{0.36} \right]^{1/0.72} \quad (1.2.23)$$

Despejando k_y .

$$k_y = \left[56.3792 \frac{q T}{L_w^{0.72} k_x^{0.14} h_z [t^* \Delta m(P)]_{Ell}} \left(\frac{t_a(P)_{Ell}}{\phi} \right)^{0.36} \right]^{1/0.5} \quad (1.2.24)$$

Se procede a obtener la ecuación para determinar el daño en consecuencia al flujo elíptico, como sigue:

Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudopresión adimensional (1.2.21) en la ecuación gobernante de la derivada de pseudopresión adimensional (1.2.22) se obtiene:

$$\frac{m(P)_D}{t_D^* m(P)_D'} = \frac{2.138742 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{Da_{Ell}})^{0.36}}{0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{Da_{Ell}})^{0.36}} + \frac{s_{Ell}}{0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{Da_{Ell}})^{0.36}}$$

$$s_{Ell} = \left[\frac{m(P)_D}{t_D^* m(P)_D'} - 2.7777 \right] \left[0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{Da_{Ell}})^{0.36} \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.2.1), (1.2.2) y (1.2.6) en la anterior ecuación, se tiene:

$$s_{Ell} = \left[\frac{\Delta m(P)}{[t^* \Delta m(P)]} - 2.7777 \right] \left[0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} \left(\left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P) \right)^{0.36} \right]$$

$$s_{Ell} = \left[\frac{1}{25.2313} \frac{L_w^{0.28} k_y^{0.5}}{h_z k_x^{0.14}} \left(\frac{t_a(P)_{Ell}}{\phi} \right)^{0.36} \right] \left[\frac{\Delta m(P)_{Ell}}{[t^* \Delta m(P)]_{Ell}} - 2.7777 \right] \quad (1.2.25)$$

En donde $[t^*\Delta m(P)]_{Ell}$ es la derivada de pseudopresión del flujo Elíptico, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{Ell}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.2.1.4. Flujo Pseudorradial o Radial Tardío (Pseudorradial (pr)):

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes a la presión y a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$P_{D_{pr}} = \frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \left[\ln \left(\frac{16k_x r_w^2}{k_y L_w^2} t_{D_{pr}} \right) + 0.80907 \right] + \frac{k_y}{\sqrt{k_x k_z}} (s_m + s_z) \quad (1.1.23)$$

$$(t_D * P_D)_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (1.1.24)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudopresión y de la Derivada de pseudopresión para yacimientos de gas:

$$m(P)_{D_{pr}} = \frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \left[\ln \left(\frac{16k_x r_w^2}{k_y L_w^2} t_{D_a} \right) + 0.80907 \right] + \frac{k_y}{\sqrt{k_x k_z}} (s_z + s_m) \quad (1.2.26)$$

$$[t_D * m(P)_D]_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (1.2.27)$$

Reemplazando la expresión de la derivada de pseudopresión adimensional, Ec. (1.2.2), en la Ec. (1.2.27), se obtiene la ecuación resultante para determinar $(k_x k_y)^{0.5}$ en donde $[t^*\Delta m(P)]_{pr1}$ es la derivada de pseudopresión del flujo pseudorradial, leído a $t=1$ hr.

$$\frac{k_y L_w}{1422.52qT} [t^* \Delta m(P)] = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}$$

$$\frac{k_y L_w}{k_y^{0.5} L_w} [t^* \Delta m(P)] = \frac{1422.52qT}{2} \frac{1}{h_z} \sqrt{\frac{1}{k_x}}$$

Despejo $(k_x k_y)^{0.5}$:

$$\sqrt{k_x k_y} = 711.26 \frac{qT}{h_z [t^* \Delta m(P)]_{pr1}} \quad (1.2.28)$$

Se procede a obtener la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m' + s_z$) como sigue:

Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudopresión adimensional (1.2.26) en la ecuación gobernante de la derivada de pseudopresión adimensional (1.2.27) se obtiene:

$$\frac{m(P)_D}{t_D * m(P)_D'} = \frac{\frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \left[\ln \left(\frac{16k_x r_w^2}{k_y L_w^2} t_{Da} \right) + 0.80907 \right] + \frac{k_y}{\sqrt{k_x k_z}} (s_z + s_m')}{\frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}} + \frac{\frac{k_y}{\sqrt{k_x k_z}} (s_z + s_m')}{\frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}}$$

$$\frac{m(P)_D}{t_D * m(P)_D'} - \left[\ln \left(\frac{16k_x r_w^2}{k_y L_w^2} t_{Da} \right) + 0.80907 \right] = \frac{2h_z}{L_w} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_z + s_m')$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.2.1), (1.2.2) y (1.2.6) en la anterior ecuación, se tiene:

$$(s_z + s_m') = \frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta m(P)}{1422.52qT}}{\frac{k_y L_w}{1422.52qT} [t^* \Delta m(P)]} - \left[\ln \left(\frac{16k_x r_w^2}{k_y L_w^2} \left(\frac{0.0002637k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P) \right) + 0.80907 \right] \right]$$

$$(s_z + s_m') = \frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\frac{\Delta m(P)_{pr}}{[t^* \Delta m(P)]_{pr}} - \left[\ln \left(\frac{k_x}{L_w^2 \phi} t_a(P)_{pr} \right) + 4.659 \right] \right] \quad (1.2.29)$$

En donde $[(t^* \Delta m(P)]_{pr}$ es la derivada de pseudopresión del flujo pseudorradial, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{pr}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.2.1.5. Flujo Dual Lineal o Lineal Tardío (Late linear (II)):

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes a la presión y a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$P_{D_{II}} = 2 \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{II}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m) \quad (1.1.27)$$

$$(t_D * P_D)_{ll} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (1.1.28)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudopresión y de la Derivada de pseudopresión para yacimientos de gas:

$$m(P)_{D_{ll}} = 2 \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m) \quad (1.2.30)$$

$$[t_D * m(P)_D]_{ll} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (1.2.31)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.2) y (1.2.6) en la Ec. (1.2.31), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_x .

$$\frac{k_y L_w}{1422.52 q T} [t * \Delta m(P)] = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\left(\frac{0.0002637 \pi k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P)}$$

$$h_x = 40.94 \frac{q T}{h_z [t * \Delta m(P)]_{ll}} \sqrt{\frac{t_a(P)_{ll}}{k_y \phi}} \quad (1.2.32)$$

$$k_y = \left[40.94 \frac{q T}{h_x h_z [t * \Delta m(P)]_{ll}} \right]^2 \frac{t_a(P)_{ll}}{\phi} \quad (1.2.33)$$

Se procede a obtener la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m' + s_z + s_x$) como sigue:

Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudopresión adimensional (1.2.30) en la ecuación gobernante de la derivada de pseudopresión adimensional (1.2.31) se obtiene:

$$\frac{m(P)_D}{t_D * m(P)_D} = \frac{2 \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m)}{\left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}}$$

$$(s_x + s_z + s_m') = \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\frac{m(P)_D}{t_D * m(P)_D'} - 2 \right] \left[\left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{Da}} \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.2.1), (1.2.2) y (1.2.6) en la anterior ecuación, se tiene:

$$(s_x + s_z + s_m') = \left[\frac{\Delta m(P)}{[t * \Delta m(P)]'} - 2 \right] \left[\left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\left(\frac{0.0002637 \pi k_z k_y}{\phi r_w^2 k_y} \right) t_a(P)} \right]$$

$$(s_x + s_z + s_m') = \left[\frac{\Delta m(P)_{ll}}{[t * \Delta m(P)]'_{ll}} - 2 \right] \left[\left(\frac{L_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\left(\frac{k_z}{1207.1 \phi} \right) t_a(P)_{ll}} \right] \quad (1.2.34)$$

En donde $[(t * \Delta m(P)]'_{ll}$ es la derivada de pseudopresión del flujo lineal tardío, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{ll}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.2.1.6. Flujo Hemilineal (Hemilinear (hl)):

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes a la presión y a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$P_{D_{hl}} = \frac{4L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\pi t_{D_{hl}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{hl}) \quad (1.1.35)$$

$$(t_D * P_D')_{hl} = \frac{2\sqrt{\pi} L_w}{h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} \quad (1.1.32)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudopresión y de la Derivada de pseudopresión para yacimientos de gas:

$$m(P)_{D_{hl}} = \frac{4L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\pi t_{Da}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m' + s_{hl}) \quad (1.2.35)$$

$$[t_D * m(P)_D']_{hl} = \frac{2L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\pi t_{Da}} \quad (1.2.36)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.2) y (1.2.6) en la Ec. (1.2.36), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_x y k_y .

$$\frac{k_y L_w}{1422.52 q T} [t^* \Delta m(P)] = \frac{2 L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\left(\frac{0.0002637 \pi k_y}{\phi r_w^2} \right)} t_a(P)$$

$$\frac{k_y L_w h_x}{k_y^{0.5} L_w} = 81.88 \frac{q T}{h_z [t^* \Delta m(P)]} \sqrt{\left(\frac{t_a(P)}{\phi} \right)}$$

Despejo h_x y k_y .

$$k_y = 6705.58 \left(\frac{t_a(P)_{hl}}{\phi} \right) \left[\frac{q T}{h_z h_x [t^* \Delta m(P)]_{hl}} \right]^2 \quad (1.2.37)$$

$$h_x = 81.88 \frac{q T}{h_z [t^* \Delta m(P)]_{hl}} \sqrt{\left(\frac{t_a(P)_{hl}}{k_y \phi} \right)} \quad (1.2.38)$$

Se procede a obtener la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m' + s_z + s_x + s_{hl}$) como sigue:

Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudopresión adimensional (1.2.35) en la ecuación gobernante de la derivada de pseudopresión adimensional (1.2.36) se obtiene:

$$\frac{m(P)_D}{t_D^* m(P)_D'} = \frac{\frac{4 L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\pi t_{Da}}}{\frac{2 L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\pi t_{Da}}} + \frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m' + s_{hl})}{\frac{2 L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\pi t_{Da}}}$$

$$(s_x + s_z + s_m' + s_{hl}) = \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\frac{m(P)_D}{t_D^* m(P)_D'} - 2 \right] \left[\frac{2 L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\pi t_{Da}} \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.2.1), (1.2.2) y (1.2.6) en la anterior ecuación, se tiene:

$$(s_x + s_z + s_m' + s_{hl}) = \left[\frac{2 L_w r_w}{h_z h_x} \sqrt{\frac{\pi k_z (0.0002637 k_y) t_a(P)}{\phi r_w^2 k_y}} \right] \left[\frac{\Delta m(P)}{[t^* \Delta m(P)]} - 2 \right]$$

$$(s_x + s_z + s_m + s_{hl}) = \left[\frac{L_w}{17.37 h_z h_x} \sqrt{\frac{k_z t_a(P)_{hl}}{\phi}} \right] \left[\frac{\Delta m(P)_{hl}}{[t^* \Delta m(P)]_{hl}} - 2 \right] \quad (1.2.39)$$

En donde $[t^* \Delta m(P)]_{hl}$ es la derivada de pseudopresión del flujo hemilineal, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{hl}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.2.1.7. Flujo Parabólico (Parabolic (PB)).

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes a la presión y a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$P_{D_{PB}} = -11.1326 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{PB}) \quad (1.1.39)$$

$$(t_D^* P_D)_{PB} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} \quad (1.1.37)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudopresión y de la Derivada de pseudopresión para yacimientos de gas:

$$m(P)_{D_{PB}} = -11.1326 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{Da_{PB}})^{-0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{PB}) \quad (1.2.40)$$

$$[t_D^* m(P)_D]_{PB} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{Da_{PB}})^{-0.5} \quad (1.2.41)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.2) y (1.2.6) en la Ec. (1.2.41), se obtiene la ecuación resultante para determinar b_y .

$$\frac{k_y L_w}{1422.52 qT} [t^* \Delta m(P)] = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \sqrt{\frac{\phi r_w^2}{0.0002637 k_y t_a(P)}}$$

Despejo b_y .

$$b_y = \left[\frac{1}{487606.9931} \frac{k_y^{1.5} L_w^{0.38} h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{0.25}}{qT} \sqrt{\frac{t_a(P)_{PB}}{\phi}} [t^* \Delta m(P)]_{PB} \right]^{1/2.3} \quad (1.2.42)$$

Se procede a obtener la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m' + s_z + s_x + s_{PB}$) como sigue:

Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudopresión adimensional (1.2.40) en la ecuación gobernante de la derivada de pseudopresión adimensional (1.2.41) se obtiene:

$$\frac{m(P)_D}{[t_D^* m(P)_D']} = \frac{-11.1326 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DaPB})^{-0.5}}{5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DaPB})^{-0.5}} + \frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m' + s_{PB})}{5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DaPB})^{-0.5}}$$

$$(s_x + s_z + s_m' + s_{PB}) = \left[5.5663 \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DaPB})^{-0.5} \right] \left[\frac{m(P)_D}{[t_D^* m(P)_D']} + 2 \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.2.1), (1.2.2) y (1.2.6) en la anterior ecuación, se tiene:

$$(s_x + s_z + s_m' + s_{PB}) = \left[5.5663 \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \sqrt{\frac{\phi r_w^2}{0.0002637 k_y t_a(P)}} \right] \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta m(P)}{1422.52 q T}}{\frac{k_y L_w}{1422.52 q T} [t^* \Delta m(P)]} + 2 \right]$$

$$(s_x + s_z + s_m' + s_{PB}) = \left[342.7769 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{k_y h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \sqrt{\frac{k_z \phi}{t_a(P)_{PB}}} \right] \left[\frac{\Delta m(P)_{PB}}{[t^* \Delta m(P)]_{PB}} + 2 \right] \quad (1.2.43)$$

En donde $[t^* \Delta m(P)]_{PB}$ es la derivada de pseudopresión del flujo parabólico, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{PB}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.2.1.8. Flujo Estable (Steady State (ss)).

1. Pozo cerca de la frontera abierta y la frontera lejana abierta.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite:

$$(t_D^* P_D')_{ss1} = 361699.2 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 t_{DAss1}^{-1} \quad (1.1.43)$$

Rescribiendo la anterior ecuación se obtiene la ecuación adimensional gobernante de la Derivada de pseudopresión para yacimientos de gas:

$$[t_D * m(P)_D]_{ss1} = 361699.2 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 t_{DaA_{ss1}}^{-1} \quad (1.2.44)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.2) y (1.2.8) en la Ec. (1.2.44), se obtiene la ecuación resultante para determinar A.

$$\frac{k_y L_w}{1422.52 q T} [t * \Delta m(P)'] = 361699.2 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 \left(\left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi A} \right) t_a(P) \right)^{-1}$$

Despejando A.

$$A = \frac{k_y^2 L_w^{0.83} h_z^{0.75} [t * \Delta m(P)']_{ss1} \left(\frac{h_y}{b_y} \right)^3 \left(\frac{t_a(P)_{ss1}}{q T \phi} \right)}{1.9511731 \times 10^{12}} \quad (1.2.45)$$

En donde $[t * \Delta m(P)']_{ss1}$ es la derivada de Pseudopresión del primer caso de flujo estable, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{ss1}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2. Pozo cerca de la frontera abierta y la frontera lejana cerrada.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite:

$$(t_D * P_D)_{ss2} = 322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} t_{DaA_{ss2}}^{-1} \quad (1.1.45)$$

Rescribiendo la anterior ecuación se obtiene la ecuación adimensional gobernante de la Derivada de pseudopresión para yacimientos de gas:

$$[t_D * m(P)_D]_{ss2} = 322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} t_{DaA_{ss2}}^{-1} \quad (1.2.46)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.2) y (1.2.8) en la Ec. (1.2.46), se obtiene la ecuación resultante para determinar A.

$$\frac{k_y L_w}{1422.52 q T} [t^* \Delta m(P)'] = 322427.2182 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} \left(\left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi A} \right) t_a(P) \right)^{-1}$$

Despejando A.

$$A = \frac{1}{1.739322 \times 10^{12}} \frac{k_y^2 L_w^{0.83} h_z^{0.72} h_y^{2.95}}{q T b_y^{3.07}} [t^* \Delta m(P)']_{ss2} \left(\frac{t_a(P)_{ss2}}{\phi} \right) \quad (1.2.47)$$

En donde $[t^* \Delta m(P)']_{ss2}$ es la derivada de Pseudopresión del segundo caso de flujo estable, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{ss2}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

3. Pozo cerca de la frontera cerrada y la frontera lejana abierta.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite:

$$(t_D^* P_D')_{ss3} = \frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{Da_{ss3}}^{-1} \quad (1.1.49)$$

Rescribiendo la anterior ecuación se obtiene la ecuación adimensional gobernante de la Derivada de pseudopresión para yacimientos de gas:

$$[t_D^* m(P)_D']_{ss3} = \frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) t_{Da_{ss3}}^{-1} \quad (1.2.48)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.2) y (1.2.8) en la Ec. (1.2.48), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w}{1422.52 q T} [t^* \Delta m(P)'] = \frac{1}{242.94} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) \left(\left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi h_y h_x} \right) t_a(P) \right)^{-1}$$

Despejando h_y .

$$h_y = \left[\frac{1}{22204.9206} \frac{k_y^2 L_w^{0.15} h_z^{0.75}}{h_x^{0.2}} [t^* \Delta m(P)']_{ss3} \left(\frac{t_a(P)_{ss3}}{q T \phi} \right) \right]^{0.4} \quad (1.2.49)$$

En donde $[t^* \Delta m(P)']_{ss3}$ es la derivada de Pseudopresión del tercer caso de flujo estable, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{ss3}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

4. Pozo centrado con una frontera abierta.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite:

$$(t_D^* P_D')_{ss4} = \frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) (t_{DA})_{ss4}^{-1} \quad (1.1.53)$$

Rescribiendo la anterior ecuación se obtiene la ecuación adimensional gobernante de la Derivada de pseudopresión para yacimientos de gas:

$$[t_D^* m(P)_D]_{ss4} = \frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) (t_{DA})_{ss4}^{-1} \quad (1.2.50)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.2) y (1.2.8) en la Ec. (1.2.50), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w}{1422.52 q T} [t^* \Delta m(P)'] = \frac{1}{468.124} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) \left[\left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi h_x h_y} \right) t_a(P) \right]^{-1}$$

Despejando h_y .

$$h_y = \left[\frac{1}{11523.578} \frac{k_y^2 L_w^{0.15} h_z^{0.75} [t^* \Delta m(P)']_{ss4}}{h_x^{0.2}} \left(\frac{t_a(P)_{ss4}}{q T \phi} \right) \right]^{0.4} \quad (1.2.51)$$

En donde $[t^* \Delta m(P)']_{ss4}$ es la derivada de Pseudopresión del cuarto caso de flujo estable, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{ss4}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

5. Pozo centrado con ambas fronteras abiertas.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite:

$$(t_D^* P_D')_{ss5} = \frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) (t_{DA})_{ss5}^{-1} \quad (1.1.57)$$

Rescribiendo la anterior ecuación se obtiene la ecuación adimensional gobernante de la Derivada de pseudopresión para yacimientos de gas:

$$[t_D * m(P)_D]_{ss5} = \frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) (t_{DaA})_{ss5}^{-1} \quad (1.2.52)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.2) y (1.2.8) en la Ec. (1.2.52), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w}{1422.52qT} [t * \Delta m(P)'] = \frac{1}{4085.7986} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) \left(\left(\frac{0.0002637k_y}{\phi h_x h_y} \right) t_a(P) \right)^{-1}$$

Despejando h_y .

$$h_y^{2.5} = \frac{4085.7986k_y L_w}{1422.52qT} [t * \Delta m(P)'] \left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi h_x} \right) \left(\frac{h_x^{0.8} h_z^{0.75}}{L_w^{0.85}} \right)$$

$$h_y = \left[\frac{1}{1320.2959} \frac{k_y^2 L_w^{0.15} h_z^{0.75} [t * \Delta m(P)']_{ss5}}{h_x^{0.2}} \left(\frac{t_a(P)_{ss5}}{qT\phi} \right) \right]^{0.4} \quad (1.2.53)$$

En donde $[t * \Delta m(P)']_{ss5}$ es la derivada de Pseudopresión del quinto caso de flujo estable, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{ss5}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

1.2.1.9. Flujo Pseudoestable (Pseudosteady State (pss)).

6. Ambas fronteras cerradas pozo centrado o descentrado.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite:

$$(t_D * P_D)_{pss} = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DA})_{pss} \quad (1.1.61)$$

Rescribiendo la anterior ecuación se obtiene la ecuación adimensional gobernante de la Derivada de pseudopresión para yacimientos de gas:

$$[t_D * m(P)_D]_{pss} = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DaA})_{pss} \quad (1.2.54)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.2) y (1.2.8) en la Ec. (1.2.54), se obtiene la ecuación resultante para determinar A.

$$\frac{k_y L_w [t^* \Delta m(P)]}{1422.52 q T} = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) \left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi A} \right) t_a(P)$$

Despejando A.

$$A = 2\pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) \left(\frac{0.0002637 k_y t_a(P)}{\phi} \right) \frac{1422.52 q T}{k_y L_w [t^* \Delta m(P)]}$$

$$A = 2.35694 \left(\frac{t_a(P)_{pss}}{h_z \phi} \right) \frac{q T}{[t^* \Delta m(P)]_{pss}} \quad (1.2.55)$$

1.2.2. INTERSECCIONES YACIMIENTOS DE GAS (PTA).

Tomando las ecuaciones gobernantes adimensionales de las Derivadas de Pseudo-presión de dos flujos con diferente pendiente e igualándolas, se obtienen las expresiones para hallar parámetros característicos del yacimiento y el pozo por medio del punto de intersección entre dichos flujos.

1.2.2.1. Intersecciones con el Flujo Radial Temprano.

1. Radial Temprano y Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.10) y (1.2.17), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ier-el} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{k_y}{k_z} \right) \left(\frac{h_z}{r_w} \right)^2 \quad (1.2.56)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ier-el}$.

$$k_z = 301.7727 \phi \frac{h_z^2}{t_a(P)_{ier-el}} \quad (1.2.57)$$

2. Radial Temprano y Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.10) y (1.2.22), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ier-Ell}^{0.36} = \frac{1}{1.53989388} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z}{r_w^{0.72} L_w^{0.28}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \quad (1.2.58)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ier-Ell}$.

$$k_z = \left[12.6156 \frac{h_z k_x^{0.14}}{L_w^{0.28}} \left(\frac{\phi}{t_a(P)_{ier-Ell}} \right)^{0.36} \right]^2 \quad (1.2.59)$$

3. Radial Temprano y Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.10) y (1.2.31), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ier-ll} = \frac{1}{4\pi} \frac{k_y}{k_z} \left(\frac{h_x h_z}{L_w r_w} \right)^2 \quad (1.2.60)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos t_{ier-ll} .

$$k_z = 301.7727 \left(\frac{h_x h_z}{L_w} \right)^2 \frac{\phi}{t_a(P)_{ier-ll}} \quad (1.2.61)$$

4. Flujo Radial Temprano y Flujo Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.10) y (1.2.36), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ier-hl}^{0.5} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z}{(2\sqrt{\pi}) L_w} \left(\frac{h_x}{r_w} \right) \quad (1.2.62)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos t_{ier-hl} .

$$k_z = 75.4432 \left(\frac{h_z h_x}{L_w} \right)^2 \left(\frac{\phi}{t_a(P)_{ier-hl}} \right) \quad (1.2.63)$$

5. Flujo Radial Temprano y Flujo Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.10) y (1.2.41), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ier-PB}^{0.5} = 11.1326 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \quad (1.2.64)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable b_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos t_{ier-PB} .

$$b_y = \left[\frac{1}{685.5538} \frac{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{0.25}}{L_w^{0.62}} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left(\frac{k_y t_a(P)_{ier-PB}}{\phi} \right)^{0.5} \right]^{1/2.3} \quad (1.2.65)$$

6. Flujo Radial Temprano y Primer Caso de Flujo Estable:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.10) y (1.2.44), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{DaA})_{ier-ss1} = 723398.4 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.75}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \quad (1.2.66)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss1}$.

$$A = \frac{1}{2743262799} \frac{h_z^{0.75} k_y^{1.5}}{L_w^{0.17} k_z^{0.5}} \left(\frac{h_y}{b_y} \right)^3 \frac{t_a(P)_{ier-ss1}}{\phi} \quad (1.2.67)$$

7. Radial Temprano y Segundo Caso de Estable:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.10) y (1.2.46), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{DaA})_{ier-ss2} = 644854.44 \frac{L_w^{0.17} b_y^{3.07}}{h_z^{0.72} h_y^{2.95}} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \quad (1.2.68)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss2}$.

$$A = \frac{1}{2445409329} \frac{h_z^{0.72} h_y^{2.95}}{L_w^{0.17} b_y^{3.07}} \frac{k_y^{1.5} t_a(P)_{ier-ss2}}{\phi k_z^{0.5}} \quad (1.2.69)$$

8. Flujo Radial Temprano y Tercer Caso de Flujo Estable:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.10) y (1.2.48), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{DaA})_{ier-ss3} = \frac{1}{121.47} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \quad (1.2.70)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss3}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{31.2191} \left(\frac{h_z^{0.75}}{h_x^{0.2} L_w^{0.85}} \right) \frac{k_y^{1.5} t_a(P)_{ier-ss3}}{\phi k_z^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (1.2.71)$$

9. Flujo Radial Temprano y Cuarto Caso de Estable:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.10) y (1.2.50), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{DaA})_{ier-ss4} = \frac{1}{234.062} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \quad (1.2.72)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss4}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{16.2016} \left(\frac{h_z^{0.75}}{h_x^{0.2} L_w^{0.85}} \right) \frac{k_y^{1.5} t_a(P)_{ier-ss4}}{\phi k_z^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (1.2.73)$$

10. Flujo Radial Temprano y Quinto Caso de Estable:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.10) y (1.2.52), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{DaA})_{ier-ss5} = \frac{1}{2042.8993} \left(\frac{h_y^{1.5} L_w^{0.85}}{h_x^{0.8} h_z^{0.75}} \right) \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \quad (1.2.74)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss5}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{1.8563} \left(\frac{h_z^{0.75}}{h_x^{0.2} L_w^{0.85}} \right) \frac{k_y^{1.5} t_a(P)_{ier-ss5}}{\phi k_z^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (1.2.75)$$

11. Flujo Radial Temprano y Flujo Pseudoestable:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.10) y (1.2.54), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{DaA})_{ier-pss} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left(\frac{h_z}{L_w} \right) \quad (1.2.76)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-pss}$.

$$A = \frac{1}{301.7727} \left(\frac{L_w}{h_z} \right) \frac{k_y^{0.5} k_z^{0.5} t_a(P)_{ier-pss}}{\phi} \quad (1.2.77)$$

1.2.2.2. Intersecciones con el Primer Caso de Flujo Estable.

1. Primer Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.44) y (1.2.17), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss1-el}^{1.5} = 204066.921 \frac{L_w^{0.17}}{h_z^{0.25}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 \frac{A}{r_w^3} \quad (1.2.78)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss1-el}$.

$$A = \frac{1}{47654884040} \frac{h_z^{0.25}}{L_w^{0.17}} \left(\frac{h_y}{b_y} \right)^3 \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss1-el}}{\phi} \right)^{1.5} \quad (1.2.79)$$

2. Primer Caso de Flujo Estable y Flujo Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.44) y (1.2.22), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss1-Ell}^{1.36} = 469771.5923 \frac{h_z^{0.25} A}{r_w^{2.72} L_w^{0.11}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 \quad (1.2.80)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss1-Ell}$.

$$A = \frac{1}{34608037630} \left(\frac{h_y}{b_y} \right)^3 \frac{L_w^{0.11} k_y^{1.5}}{h_z^{0.25} k_x^{0.14}} \left(\frac{t_a(P)_{iss1-Ell}}{\phi} \right)^{1.36} \quad (1.2.81)$$

3. Primer Caso de Flujo Estable y Flujo Pseudorradial:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.44) y (1.2.27), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss1-pr} = 723398.4 \frac{h_z^{0.25}}{L_w^{0.83}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^3 \frac{A}{r_w^2} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (1.2.82)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss1-pr}$.

$$A = \frac{1}{2743262799} \frac{L_w^{0.83}}{h_z^{0.25}} \left(\frac{h_y}{b_y} \right)^3 \frac{k_y^{1.5} t_a(P)_{iss1-pr}}{\phi k_x^{0.5}} \quad (1.2.83)$$

4. Primer Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.44) y (1.2.31), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss1-ll}^{1.5} = 204066.921 \frac{h_z^{0.25} b_y^3}{L_w^{0.83} r_w^3} \left(\frac{h_x}{h_y} \right)^2 \quad (1.2.84)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss1-ll}$.

$$h_y = \left[47654884040 \frac{h_z^{0.25} b_y^3 h_x^2}{L_w^{0.83}} \left(\frac{\phi}{k_y t_a(P)_{iss1-ll}} \right)^{1.5} \right]^{0.5} \quad (1.2.85)$$

5. Primer Caso de Flujo Estable y Flujo Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.44) y (1.2.36), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss1-hl}^{1.5} = 102033.4605 \frac{h_z^{0.25} b_y^3}{L_w^{0.83} r_w^3} \left(\frac{h_x}{h_y} \right)^2 \quad (1.2.86)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss1-hl}$.

$$h_y = \left[23827442020 \frac{h_z^{0.25} b_y^3 h_x^2}{L_w^{0.83}} \left(\frac{\phi}{k_y t_a(P)_{iss1-hl}} \right)^{1.5} \right]^{1/2} \quad (1.2.87)$$

6. Primer Caso de Flujo Estable y Flujo Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.44) y (1.2.41), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss1-PB}^{0.5} = 64980.18 \frac{b_y^{0.7} A}{h_z^{0.13} L_w^{0.45} h_y^{1.95} r_w^{0.75}} \quad (1.2.88)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss1-PB}$.

$$A = \frac{1}{4001527.862} \frac{h_z^{0.13} L_w^{0.45} h_y^{1.95}}{b_y^{0.7} r_w^{0.25}} \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss1-PB}}{\phi} \right)^{0.5} \quad (1.2.89)$$

1.2.2.3. Intersecciones con el Segundo Caso de Flujo Estable.

1. Segundo Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.46) y (1.2.17), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss2-el}^{1.5} = 181910.078 \frac{h_z^{0.28} L_w^{0.17} b_y^{3.07} A}{h_y^{2.95} r_w^3} \quad (1.2.90)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss2-el}$.

$$A = \frac{1}{42480690310} \frac{h_y^{2.95}}{h_z^{0.28} L_w^{0.17} b_y^{3.07}} \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss2-el}}{\phi} \right)^{1.5} \quad (1.2.91)$$

2. Segundo Caso de Flujo Estable y Flujo Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.46) y (1.2.22), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss2-El}^{1.36} = 418765.5038 \frac{h_z^{0.28} A}{r_w^{2.72} L_w^{0.11}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \left(\frac{b_y^{3.07}}{h_y^{2.95}} \right) \quad (1.2.92)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss2-El}$.

$$A = \frac{1}{30850422960} \frac{L_w^{0.11} h_y^{2.95} k_y^{1.5}}{h_z^{0.28} b_y^{3.07} k_x^{0.14}} \left(\frac{t_a(P)_{iss2-El}}{\phi} \right)^{1.36} \quad (1.2.93)$$

3. Segundo Caso de Flujo Estable y Flujo Pseudorradial:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.46) y (1.2.27), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss2-el} = 644854.4364 \frac{b_y^{3.07} h_z^{0.28} A}{h_y^{2.95} L_w^{0.83} r_w^2} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (1.2.94)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss2-pr}$.

$$A = \frac{1}{2445409315} \frac{h_y^{2.95} L_w^{0.83} k_y^{1.5} t_a(P)_{iss2-pr}}{b_y^{3.07} h_z^{0.28} \phi k_x^{0.5}} \quad (1.2.95)$$

4. Segundo Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.46) y (1.2.31), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss2-ll}^{1.5} = 181910.078 \frac{h_z^{0.28} b_y^{3.07} h_x^2}{L_w^{0.83} h_y^{1.95} r_w^3} \quad (1.2.96)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss2-ll}$.

$$h_y = \left[42480690310 \frac{h_z^{0.28} b_y^{3.07} h_x^2}{L_w^{0.83}} \left(\frac{\phi}{k_y t_a(P)_{iss2-ll}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.95} \quad (1.2.97)$$

5. Segundo Caso de Flujo Estable y Flujo Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.46) y (1.2.36), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss2-hl}^{1.5} = 90955.039 \frac{h_z^{0.28} b_y^{3.07} h_x^2}{L_w^{0.83} h_y^{1.95} r_w^3} \quad (1.2.98)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss2-hl}$.

$$h_y = \left[21240345150 \frac{h_z^{0.28} b_y^{3.07} h_x^2}{L_w^{0.83}} \left(\frac{\phi}{k_y t_a(P)_{iss2-hl}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.95} \quad (1.2.99)$$

6. Segundo Caso de Flujo Estable y Flujo Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.46) y (1.2.41), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss2-PB}^{0.5} = 57924.8726 \frac{b_y^{0.77} A}{h_z^{0.1} h_y^{1.9} L_w^{0.45} r_w^{0.75}} \quad (1.2.100)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss2-PB}$.

$$A = \frac{1}{3567056.779} \frac{h_z^{0.1} h_y^{1.9} L_w^{0.45}}{b_y^{0.77} r_w^{0.25}} \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss2-PB}}{\phi} \right)^{0.5} \quad (1.2.101)$$

1.2.2.4. Intersecciones con el Tercer Caso de Flujo Estable.

1. Tercer Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.48) y (1.2.17), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss3-el}^{1.5} = \frac{1}{430.5999} \left(\frac{h_y^{2.5} L_w^{0.85} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^3} \right) \quad (1.2.102)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss3-el}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{542.3265} \left(\frac{1}{h_x^{0.2} L_w^{0.85} h_z^{0.25}} \right) \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss3-el}}{\phi} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.2.103)$$

2. Tercer Caso de Flujo Estable y Flujo Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.48) y (1.2.22), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss3-El}^{1.36} = \frac{1}{187.0509} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \left(\frac{h_z^{0.25} h_y^{1.5} L_w^{0.57}}{h_x^{0.8}} \right) \frac{A}{r_w^{2.72}} \quad (1.2.104)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss3-El}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{393.8496} \frac{k_y^{1.5}}{h_z^{0.25} L_w^{0.57} h_x^{0.2} k_x^{0.14}} \left(\frac{t_a(P)_{iss3-El}}{\phi} \right)^{1.36} \right]^{0.4} \quad (1.2.105)$$

3. Tercer Caso de Flujo Estable y Flujo Pseudorradial:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.48) y (1.2.27), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss3-pr} = \frac{1}{121.47} \left(\frac{h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{L_w^{0.15} r_w^2} \right) \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (1.2.106)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss3-pr}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{31.2191} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{0.2}} \right) \frac{k_y^{1.5} t_a(P)_{iss3-pr}}{\phi k_x^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (1.2.107)$$

4. Tercer Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.48) y (1.2.31), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss3-ll}^{1.5} = \frac{1}{430.5999} \left(\frac{h_z^{0.25} h_y^{2.5} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \right) \quad (1.2.108)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss3-ll}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{542.3266} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right) \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss3-ll}}{\phi} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.2.109)$$

5. Tercer Caso de Flujo Estable y Flujo Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.48) y (1.2.36), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss3-hl}^{1.5} = \frac{1}{861.1999} \left(\frac{h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \right) \quad (1.2.110)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss3-hl}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{271.1633} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right) \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss3-hl}}{\phi} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.2.111)$$

6. Tercer Caso de Flujo Estable y Flujo Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.48) y (1.2.41), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss3-PB}^{0.5} = \frac{1}{1352.2769} \left(\frac{h_y^{3.55} L_w^{0.23} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \right) \quad (1.2.112)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss3-PB}$.

$$h_y = \left[21.9594 \left(\frac{h_z^{0.13} b_y^{2.3}}{L_w^{0.23} h_x^{0.2} r_w^{0.25}} \right) \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss3-PB}}{\phi} \right)^{0.5} \right]^{1/3.55} \quad (1.2.113)$$

1.2.2.5. Intersecciones con el Cuarto Caso de Flujo Estable.

1. Cuarto Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.50) y (1.2.17), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss4-el}^{1.5} = \frac{1}{829.7282} \left(\frac{h_y^{2.5} L_w^{0.85} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^3} \right) \quad (1.2.114)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss4-el}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{281.4485} \left(\frac{1}{h_x^{0.2} L_w^{0.85} h_z^{0.25}} \right) \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss4-el}}{\phi} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.2.115)$$

2. Cuarto Caso de Flujo Estable y Flujo Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.50) y (1.2.22), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss4-Ell}^{1.36} = \frac{1}{360.4306} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \left(\frac{h_z^{0.25} h_y^{1.5} L_w^{0.57}}{h_x^{0.8}} \right) \frac{A}{r_w^{2.72}} \quad (1.2.116)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss4-Ell}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{204.3942} \frac{k_y^{1.5}}{h_z^{0.25} L_w^{0.57} h_x^{0.2} k_x^{0.14}} \left(\frac{t_a(P)_{iss4-ell}}{\phi} \right)^{1.36} \right]^{0.4} \quad (1.2.117)$$

3. Cuarto Caso de Flujo Estable y Flujo Pseudorradiar:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.50) y (1.2.27), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss4-pr} = \frac{1}{234.062} \left(\frac{h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{L_w^{0.15} r_w^2} \right) \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (1.2.118)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss4-ll}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{16.2016} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{0.2}} \right) \frac{k_y^{1.5} t_a(P)_{iss4-pr}}{\phi k_x^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (1.2.119)$$

4. Cuarto Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.50) y (1.2.31), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss4-ll}^{1.5} = \frac{1}{829.7282} \left(\frac{h_z^{0.25} h_y^{2.5} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \right) \quad (1.2.120)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss4-ll}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{281.4485} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right) \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss4-ll}}{\phi} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.2.121)$$

5. Cuarto Caso de Flujo Estable y Flujo Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.50) y (1.2.36), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss4-hl}^{1.5} = \frac{1}{1659.4564} \left(\frac{h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \right) \quad (1.2.122)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss4-hl}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{140.7243} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right) \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss4-hl}}{\phi} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.2.123)$$

6. Cuarto Caso de Flujo Estable y Flujo Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.50) y (1.2.41), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss4-PB}^{0.5} = \frac{1}{2605.7186} \left(\frac{h_y^{3.55} L_w^{0.23} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \right) \quad (1.2.124)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss4-PB}$.

$$h_y = \left[42.3139 \left(\frac{h_z^{0.13} b_y^{2.3}}{L_w^{0.23} h_x^{0.2} r_w^{0.25}} \right) \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss4-PB}}{\phi} \right)^{0.5} \right]^{1/3.55} \quad (1.2.125)$$

1.2.2.6. Intersecciones con el Quinto Caso de Flujo Estable.

1. Quinto Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.52) y (1.2.17), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss5-el}^{1.5} = \frac{1}{7241.8895} \left(\frac{h_y^{2.5} L_w^{0.85} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^3} \right) \quad (1.2.126)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss5-el}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{32.2465} \left(\frac{1}{h_x^{0.2} L_w^{0.85} h_z^{0.25}} \right) \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss5-el}}{\phi} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.2.127)$$

2. Quinto Caso de Flujo Estable y Flujo Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.52) y (1.2.22), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss5-Ell}^{1.36} = \frac{1}{3145.8481} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \left(\frac{h_z^{0.25} h_y^{1.5} L_w^{0.57}}{h_x^{0.8}} \right) \frac{A}{r_w^{2.72}} \quad (1.2.128)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss5-Ell}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{23.4181} \frac{k_y^{1.5}}{h_z^{0.25} L_w^{0.57} h_x^{0.2} k_x^{0.14}} \left(\frac{t_a(P)_{iss5-Ell}}{\phi} \right)^{1.36} \right]^{0.4} \quad (1.2.129)$$

3. Quinto Caso de Flujo Estable y Flujo Pseudorradial:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.52) y (1.2.27), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss5-pr} = \frac{1}{2042.8993} \left(\frac{h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{L_w^{0.15} r_w^2} \right) \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (1.2.130)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss5-pr}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{1.8563} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{0.2}} \right) \frac{k_y^{1.5} t_a(P)_{iss5-pr}}{\phi k_x^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (1.2.131)$$

4. Quinto Caso de Flujo Estable y Flujo Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.52) y (1.2.31), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss5-ll}^{1.5} = \frac{1}{7241.8895} \left(\frac{h_z^{0.25} h_y^{2.5} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \right) \quad (1.2.132)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss5-ll}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{32.2465} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right) \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss5-ll}}{\phi} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.2.133)$$

5. Quinto Caso de Flujo Estable y Flujo Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.52) y (1.2.36), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss5-hl}^{1.5} = \frac{1}{14483.7789} \left(\frac{h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \right) \quad (1.2.134)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss5-hl}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{16.1233} \left(\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right) \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss5-hl}}{\phi} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (1.2.135)$$

6. Quinto Caso de Flujo Estable y Flujo Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.52) y (1.2.41), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss5-PB}^{0.5} = \frac{1}{22742.7808} \left(\frac{h_y^{3.55} L_w^{0.23} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \right) \quad (1.2.136)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss5-PB}$.

$$h_y = \left[369.3164 \left(\frac{h_z^{0.13} b_y^{2.3}}{L_w^{0.23} h_x^{0.2} r_w^{0.25}} \right) \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss5-PB}}{\phi} \right)^{0.5} \right]^{1/3.55} \quad (1.2.137)$$

1.2.2.7. Intersecciones con el Flujo Pseudoestable.

1. Flujo Pseudoestable y Flujo Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.54) y (1.2.17), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ipss-el}^{0.5} = \frac{A}{2\sqrt{\pi r_w} L_w} \quad (1.2.138)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ipss-el}$.

$$A = \frac{L_w}{17.3716} \left(\frac{k_y t_a(P)_{ipss-el}}{\phi} \right)^{0.5} \quad (1.2.139)$$

2. Flujo Pseudoestable y Flujo Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.54) y (1.2.22), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ipss-Ell}^{0.64} = \frac{1}{8.1605} \frac{A}{L_w^{0.72} r_w^{1.28}} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} \quad (1.2.140)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ipss-Ell}$.

$$A = \frac{1}{23.9206} L_w^{0.72} k_x^{0.14} k_y^{0.5} \left(\frac{t_a(P)_{ipss-ell}}{\phi} \right)^{0.64} \quad (1.2.141)$$

3. Flujo Pseudoestable y Flujo Pseudorradial:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.54) y (1.2.27), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ipss-pr} = \frac{1}{4\pi} \frac{A}{r_w^2} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (1.2.142)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ipss-pr}$.

$$A = \frac{1}{301.7727} \left(\frac{k_y^{0.5} k_x^{0.5} t_a(P)_{ipss-pr}}{\phi} \right) \quad (1.2.143)$$

4. Flujo Pseudoestable y Flujo Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.54) y (1.2.31), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ipss-ll}^{0.5} = \left(\frac{A}{2\pi h_x r_w} \right) \sqrt{\pi} \quad (1.2.144)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ipss-ll}$.

$$A = \left(\frac{h_x}{17.3716} \right) \left(\frac{k_y t_a(P)_{ipss-ll}}{\phi} \right)^{0.5} \quad (1.2.145)$$

5. Flujo Pseudoestable y Flujo Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.54) y (1.2.36), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ipss-hl}^{0.5} = \frac{A}{\sqrt{\pi r_w h_x}} \quad (1.2.146)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ipss-hl}$.

$$A = 34.7432 h_x \left(\frac{k_y t_a(P)_{ipss-hl}}{\phi} \right)^{0.5} \quad (1.2.147)$$

6. Flujo Pseudoestable y Flujo Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (1.2.54) y (1.2.41), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ipss-PB}^{1.5} = \left(\frac{1}{1.1288} \right) \frac{A h_z^{0.38} b_y^{2.3}}{L_w^{0.38} h_y^{1.05} r_w^{3.25}} \quad (1.2.148)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ipss-PB}$.

$$A = 4.83373 \frac{L_w^{0.38} h_y^{1.05} r_w^{3.25}}{h_z^{0.38} b_y^{2.3}} \left(\frac{k_y t_a(P)_{ipss-PB}}{\phi} \right)^{1.5} \quad (1.2.149)$$

2. CAPÍTULO II. ANÁLISIS DE TRASIENTE DE CAUDAL.

2.1. ANÁLISIS DE TRASIENTE DE CAUDAL EN YACIMIENTOS DE ACEITE.

Al momento de trabajar con pruebas de este tipo, se debe tener en cuenta que el caudal adimensional dentro de un yacimiento posee un comportamiento aproximadamente igual al inverso de la presión adimensional, por lo que se tiene:

$$P_D \approx \frac{1}{q_D} \quad (2.1.1)$$

Ésta aproximación no siempre es tan confiable por lo que en el caso de varios de los flujos estudiados en pruebas de transiente de caudal se reescriben las ecuaciones de flujo para el caso de pruebas de presión y se añade alguna constante que logre linealizar el comportamiento, buscando que la igualdad anterior se cumpla con la mayor exactitud posible.

Las variables adimensionales formuladas para el caso de pruebas de caudal obtenidas rescribiendo las variables de Engler y Tiab (1996), las cuales permiten convertir los valores adimensionales en dimensionales son las siguientes:

Recíproco del caudal adimensional:

$$(1/q_D) = \frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} (1/q) \quad (2.1.2)$$

Derivada del recíproco del caudal adimensional:

$$[t_D * (1/q_D)] = \frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t * (1/q)] \quad (2.1.3)$$

Las expresiones para el Tiempo adimensional son las mismas que para el caso de pruebas de presión, al igual que las del Ancho adimensional y Posición del pozo:

$$t_D = \frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \quad (1.1.3)$$

$$t_{DA} = t_D \frac{r_w^2}{A} = \frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} \quad (1.1.4)$$

$$t_{DA} = t_D \frac{r_w^2}{A} = \frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_l h_x h_y} \quad (1.1.5)$$

Ancho adimensional:

$$W_D = \frac{h_y}{r_w} \quad (1.1.6)$$

Posición del pozo:

$$X_D = \frac{2b_x}{h_x} \quad (1.1.7)$$

$$Y_D = \frac{2b_y}{h_y} \quad (1.1.8)$$

2.1.1. ECUACIONES DE FLUJO EN POZOS HORIZONTALES EN YACIMIENTOS DE ACEITE (RTA).

Las descripciones de los flujos son las mismas que las mostradas en el capítulo 1, de igual manera ocurre con las descripciones de los puntos máximos característicos.

2.1.1.1. Flujo Radial Temprano (Early Radial (er)):

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes a la presión y a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$P_{Der} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left[\ln \left(\sqrt{\frac{k_z}{k_y}} t_{Der} \right) + 0.80907 + 2s_m \right] \quad (1.1.9)$$

$$(t_D * P_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (1.1.10)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes del recíproco del caudal y de la derivada del recíproco del caudal para yacimientos de aceite.

$$(1/q_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left[\ln \left(\sqrt{\frac{k_z}{k_y}} t_{D_{er}} \right) + 0.80907 + 2s_m \right] \quad (2.1.4)$$

$$[t_D * (1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.1.5)$$

Reemplazando la expresión de la derivada del recíproco del caudal adimensional, Ec. (2.1.3), en la Ec. (2.1.5), se obtiene la ecuación resultante para el producto $(k_y k_z)^{0.5}$ en donde $[t^*(1/q)]_{er}$ es la derivada del recíproco del caudal del flujo radial temprano, leído a $t=1$ hr.

$$\sqrt{k_y k_z} = \frac{70.6 \mu B}{L_w \Delta P [t^*(1/q)]_{er}} \quad (2.1.6)$$

Dividiendo la ecuación gobernante de recíproco del caudal adimensional (2.1.4) en la ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional (2.1.5) se obtiene la ecuación para determinar el daño mecánico ocurrido en el pozo (s_m):

$$s_m = \frac{1}{2} \left[\frac{(1/q)_{er}}{[t^*(1/q)]_{er}} - \ln \left(\frac{\sqrt{k_y k_z} t_{er}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 7.43 \right] \quad (2.1.7)$$

En donde $[(t^*(1/q)]_{er}$ es la derivada del recíproco del caudal del flujo radial temprano, leído al tiempo t_{er} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.1.1.2. Flujo Lineal Temprano (Early Linear(el)):

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes a la presión y a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$P_{D_{el}} = \frac{2r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_z + s_m) \quad (1.1.13)$$

$$(t_D * P_D)_{el} = \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (1.1.14)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes del recíproco del caudal y de la derivada del recíproco del caudal para yacimientos de aceite.

$$(1/q_D)_{el} = \frac{236}{100} \left(\frac{r_w}{h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{el}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_z + s_m) \quad (2.1.8)$$

$$[t_D * (1/q_D)]_{el} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (2.1.9)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.3) y (2.1.3) en la Ec. (2.1.9), se obtiene la ecuación resultante para hallar k_y y L_w :

$$L_w = \frac{4.7956B}{h_z \Delta P [t * (1/q)]_{el}} \sqrt{\frac{\mu t_{el}}{k_y \phi c_t}} \quad (2.1.10)$$

$$k_y = \left(\frac{4.7956B}{h_z \Delta P [t * (1/q)]_{el}} \right)^2 \frac{\mu t_{el}}{L_w^2 \phi c_t} \quad (2.1.11)$$

Se procede a obtener la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m + s_z$) como sigue:

Dividiendo la ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional (2.1.9) en t_D se obtiene:

$$\frac{[t_D * (1/q_D)]'}{t_D} = \frac{\frac{118}{100} \left(\frac{r_w}{h_z} \right) \sqrt{\pi t_D}}{t_D}$$

$$(1/q_D)' = \frac{118}{100} \left(\frac{r_w}{h_z} \right) \sqrt{\frac{\pi}{t_D}}$$

Integrando la ecuación anterior se obtiene:

$$\int (1/q_D)' = \frac{118\sqrt{\pi}}{100} \left(\frac{r_w}{h_z} \right) \int t_D^{-0.5}$$

$$1/q_D = \frac{118\sqrt{\pi}}{100} \left(\frac{r_w}{h_z} \right) \frac{t_D^{0.5}}{0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_z + s_m)$$

$$(1/q_D)_{el} = \frac{236}{100} \left(\frac{r_w}{h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{el}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_z + s_m) \quad (2.1.8)$$

Se llega nuevamente a la Ec. (2.1.8), demostrando la validez de la ecuación adimensional gobernante de este régimen de flujo para el caso de pruebas de caudal.

Dividiendo la ecuación gobernante de recíproco del caudal adimensional (2.1.8) en la ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional (2.1.9) se obtiene la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m + s_z$):

$$s_m + s_z = \frac{1}{29.443h_z} \sqrt{\frac{k_z t_{el}}{\phi \mu c_t}} \left[\frac{(1/q)_{el}}{[t^*(1/q)]_{el}} - 2.0 \right] \quad (2.1.12)$$

En donde $[(t^*(1/q)]_{el}$ es la derivada del recíproco del caudal del flujo lineal temprano, leído al tiempo t_{el} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.1.1.3. Flujo Elíptico (Elliptical (Ell)).

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes a la presión y a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$P_{D_{Ell}} = 2.1387415 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} + s_{Ell} \quad (1.1.18)$$

$$(t_D^* P_D)_{Ell} = 0.76994694 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \quad (1.1.19)$$

La ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional para yacimientos de aceite es la siguiente:

$$[t_D^*(1/q_D)]_{Ell} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \quad (2.1.13)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.3) y (2.1.3) en la Ec. (2.1.13), se obtiene la ecuación resultante para determinar L_w y k_y .

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^*(1/q)] = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.36}$$

Despejando L_w .

$$L_w = \left[6.9501 \frac{\mu^{0.64} B}{\Delta P k_y^{0.5} k_x^{0.14} h_z [t^* (1/q)]_{Ell}} \left(\frac{t_{Ell}}{\phi c_t} \right)^{0.36} \right]^{1/0.72} \quad (2.1.14)$$

Despejando k_y .

$$k_y = \left[6.9501 \frac{\mu^{0.64} B}{\Delta P L_w^{0.72} k_x^{0.14} h_z [t^* (1/q)]_{Ell}} \left(\frac{t_{Ell}}{\phi c_t} \right)^{0.36} \right]^{1/0.5} \quad (2.1.15)$$

Se procede a obtener el daño efectuado por el flujo elíptico (s_{Ell}) de la siguiente manera:

Dividiendo (2.1.14) en t_D a ambos lados:

$$\frac{[t_D^* (1/q_D)]}{t_D} = \frac{0.956211522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}}{t_D}$$

$$(1/q_D)' = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{-0.64}$$

Integrando la ecuación anterior:

$$\int (1/q_D)' = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} \int (t_{D_{Ell}})^{-0.64}$$

$$(1/q_D) = 2.6562 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} + s_{Ell} \quad (2.1.16)$$

La Ec. (2.1.16) corresponde a la ecuación adimensional gobernante de este régimen de flujo para el caso de pruebas de caudal.

Dividiendo la ecuación anterior (2.1.16) en la ecuación gobernante (2.1.13) se obtiene:

$$\frac{1/q_D}{t_D^* (1/q_D)'} = \frac{2.6562 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}}{0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}} + \frac{s_{Ell}}{0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}}$$

$$s_{Ell} = 0.95621522 \left[\frac{1/q_D}{t_D^* (1/q_D)'} - 2.777 \right] \left[\frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.1.3), (2.1.2) y (2.1.3) se tiene:

$$s_{Ell} = 0.95621522 \left[\frac{(1/q)_{Ell}}{[t^*(1/q)]_{Ell}} - 2.777 \right] \left[\frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x}\right)^{0.14} \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.36} \right]$$

$$s_{Ell} = \frac{1}{20.3163} \left[\frac{(1/q)_{Ell}}{[t^*(1/q)]_{Ell}} - 2.777 \right] \left[\frac{L_w^{0.28} k_y^{0.5}}{h_z k_x^{0.14}} \left(\frac{t_{Ell}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.36} \right] \quad (2.1.17)$$

En donde $[(t^*(1/q)]_{Ell}$ es la derivada del recíproco del caudal del flujo elíptico, leído al tiempo t_{Ell} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.1.1.4. Flujo Pseudorradial o Radial Tardío (Pseudorradial (pr)):

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes a la presión y a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$P_{D_{pr}} = \frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \left[\ln \left(\frac{16k_x r_w^2}{k_y L_w^2} t_{D_{pr}} \right) + 0.80907 \right] + \frac{k_y}{\sqrt{k_x k_z}} (s_m + s_z) \quad (1.1.23)$$

$$(t_D^* P_D)_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (1.1.24)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes del recíproco del caudal y de la derivada del recíproco del caudal para yacimientos de aceite.

$$(1/q_D)_{pr} = \frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \left[\ln \left(\frac{16k_x r_w^2}{k_y L_w^2} t_{Dpr} \right) + 0.80907 \right] + \frac{k_y}{\sqrt{k_x k_z}} (s_m + s_z) \quad (2.1.18)$$

$$[t_D^*(1/q_D)]_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (2.1.19)$$

Reemplazando la expresión de la derivada del recíproco del caudal adimensional, Ec. (2.1.3), en la Ec. (2.1.19), se obtiene la ecuación resultante para el producto $(k_y k_x)^{0.5}$ en donde $[t^*(1/q)]_{pr1}$ es la derivada del recíproco del caudal del flujo radial temprano, leído a $t=1$ hr.

$$\sqrt{k_x k_y} = \left(\frac{70.6 \mu B}{h_z \Delta P [t^*(1/q)]_{pr1}} \right) \quad (2.1.20)$$

Dividiendo la ecuación gobernante de recíproco del caudal adimensional (2.1.18) en la ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional (2.1.19) se obtiene la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m + s_z$):

$$s_m + s_z = \frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left(\frac{(1/q)_{pr}}{[t^*(1/q)]_{pr}} - \ln \left(\frac{k_x t_{pr}}{\phi \mu c_t L_w^2} \right) + 4.659 \right) \quad (2.1.21)$$

En donde $[(t^*(1/q)]_{pr}$ es la derivada del recíproco del caudal del flujo pseudorradial, leído al tiempo t_{pr} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.1.1.5. Flujo Dual Lineal o Lineal Tardío (Late linear (II)):

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite es:

$$(t_D^* P_D)_{II} = \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{DII}} \quad (1.1.28)$$

Rescribiendo la anterior ecuación obtenemos la ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional para yacimientos de aceite, el valor de la nueva constante se incluye en la ecuación:

$$[t_D^*(1/q_D)]_{II} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{DII}} \quad (2.1.22)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.3) y (2.1.3) en la Ec. (2.1.22), se obtiene la ecuación resultante para hallar k_y y h_x :

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^* (1/q)] = \frac{118 \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right)}{100} \sqrt{\frac{0.0002637 \pi k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2}}$$

$$\sqrt{k_y} h_x = \frac{4.7956 B}{\Delta P h_z [t^* (1/q)]} \sqrt{\frac{\mu t}{\phi c_t}}$$

Despejando k_y y h_x :

$$k_y = \frac{\mu t_{ll}}{\phi c_t} \left[\frac{4.7956 B}{\Delta P h_z h_x [t^* (1/q)]_{ll}} \right]^2 \quad (2.1.23)$$

$$h_x = \frac{4.7956 B}{\Delta P h_z [t^* (1/q)]_{ll}} \sqrt{\frac{\mu t_{ll}}{\phi k_y c_t}} \quad (2.1.24)$$

Se procede a obtener la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m + s_z + s_x$) como sigue:

Dividiendo la ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional (2.1.22) en t_D se obtiene:

$$\frac{[t_D^* (1/q_D)]'}{t_D} = \frac{118 \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_D}}{t_D}$$

$$(1/q_D)' = \frac{118 \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi}}{100} \sqrt{t_D}$$

Integrando la ecuación anterior se obtiene:

$$\int (1/q_D)' = \frac{118 \sqrt{\pi}}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \int t_D^{-0.5}$$

$$1/q_D = \frac{118 \sqrt{\pi}}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) t_D^{0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m)$$

$$(1/q_D)_{ll} = \frac{236}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m) \quad (2.1.25)$$

La Ec. (2.1.25) corresponde a la ecuación adimensional gobernante de este régimen de flujo para el caso de pruebas de caudal.

Dividiendo la ecuación gobernante de recíproco del caudal adimensional (2.1.25) en la ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional (2.1.22) se obtiene la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m + s_z + s_x$):

$$\frac{(1/q_D)_{ll}}{[t_D^* (1/q_D)']_{ll}} = \frac{\frac{236}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m)}{\frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}} + \frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m)}{\frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}}$$

$$(s_x + s_z + s_m) = \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \right] \left[\frac{(1/q_D)_{ll}}{[t_D^* (1/q_D)']_{ll}} - 2 \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.1.3), (2.1.2) y (2.1.3) se tiene:

$$(s_x + s_z + s_m) = \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\frac{0.0002637 \pi k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2}} \right] \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} (1/q)}{\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^* (1/q)']} - 2 \right]$$

$$(s_x + s_z + s_m) = \frac{1}{29.443} \left[\left(\frac{L_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\frac{k_z t_{ll}}{\phi \mu c_t}} \right] \left[\frac{(1/q)_{ll}}{[t^* (1/q)']_{ll}} - 2 \right] \quad (2.1.26)$$

En donde $[t^*(1/q)']_{ll}$ es la derivada del recíproco del caudal del flujo lineal tardío, leído a t_{ll} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.1.1.6. Flujo Hemilineal (Hemilinear (hl)):

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite es:

$$(t_D^* P_D')_{hl} = \frac{2\sqrt{\pi} L_w}{h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} \quad (1.1.32)$$

Rescribiendo la anterior ecuación obtenemos la ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional para yacimientos de aceite, el valor de la nueva constante se incluye en la ecuación:

$$[t_D^* (1/q_D)]_{hl} = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{Dhl} \right]^{0.5} \quad (2.1.27)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.3) y (2.1.3) en la Ec. (2.1.27), se obtiene la ecuación resultante para hallar k_y y h_x :

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^* (1/q)] = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) \right]^{0.5}$$

$$k_y^{0.5} h_x = \frac{15.5249 B}{h_z \Delta P [t^* (1/q)]} \sqrt{\frac{\mu t}{\phi c_t}}$$

Despejando k_y y h_x :

$$k_y = \left(\frac{\mu t_{hl}}{\phi c_t} \right) \left[\frac{15.5249 B}{h_z h_x \Delta P [t^* (1/q)]_{hl}} \right]^2 \quad (2.1.28)$$

$$h_x = \frac{15.5249 B}{h_z \Delta P [t^* (1/q)]_{hl}} \sqrt{\frac{\mu t_{hl}}{k_y \phi c_t}} \quad (2.1.29)$$

Se procede a obtener la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m + s_z + s_x + s_{hl}$) como sigue:

Dividiendo la ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional (2.1.27) en t_D se obtiene:

$$\frac{[t_D^* (1/q_D)]_{hl}}{t_D} = \frac{\frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{Dhl} \right]^{0.5}}{t_D}$$

$$(1/q_D)' = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 \frac{1}{t_D} \right]^{0.5}$$

Integrando la ecuación anterior obtenemos:

$$\int (1/q_D)' = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 \right]^{0.5} \int t_D^{-0.5}$$

$$(1/q_D) = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 \right]^{0.5} \frac{t_D^{0.5}}{0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{hl})$$

$$(1/q_D)_{hl} = \frac{764\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{hl}) \quad (2.1.30)$$

La Ec. (2.1.30) corresponde a la ecuación adimensional gobernante de este régimen de flujo para el caso de pruebas de caudal.

Dividiendo la ecuación gobernante de recíproco del caudal adimensional (2.1.30) en la ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional (2.1.27) se obtiene la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m + s_z + s_x + s_{hl}$):

$$\frac{(1/q_D)}{[t_D * (1/q_D)]'} = \frac{\frac{764\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_D \right]^{0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{hl})}{\frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_D \right]^{0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{hl})}$$

$$(s_x + s_z + s_m + s_{hl}) = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_D \right]^{0.5} \left[\frac{(1/q_D)}{[t_D * (1/q_D)]'} - 2 \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.1.3), (2.1.2) y (2.1.3) se tiene:

$$(s_x + s_z + s_m + s_{hl}) = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 \left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) \right]^{0.5} \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} (1/q)}{\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t * (1/q)]'} - 2 \right]$$

$$(s_x + s_z + s_m + s_{hl}) = \frac{L_w}{9.0951 h_z h_x} \left(\frac{k_z t_{hl}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \left[\frac{(1/q)_{hl}}{[t * (1/q)]'_{hl}} - 2 \right] \quad (2.1.31)$$

En donde $[t^*(1/q)]_{hl}$ es la derivada del recíproco del caudal del flujo hemilineal, leído a t_{hl} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.1.1.7. Flujo Parabólico (Parabolic (PB)).

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada de la presión para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite es:

$$(t_D * P_D)_{PB} = 5.5663 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5} \quad (1.1.37)$$

La ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional para yacimientos de aceite es la siguiente:

$$[t_D * (1/q_D)]_{PB} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5} \quad (2.1.32)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.3) y (2.1.3) en la Ec. (2.1.32), se obtiene la ecuación resultante para determinar b_y .

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^*(1/q)] = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \sqrt{\frac{\phi \mu c_t r_w^2}{0.0002637 \pi k_y t}}$$

Despejando b_y .

$$b_y = \left[\frac{1}{41939.60115} \frac{\Delta P k_y^{1.5} L_w^{0.38} h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{0.25}}{\mu^{1.5} B} [t^*(1/q)]_{PB} \left(\frac{t_{PB}}{\phi c_t} \right)^{0.5} \right]^{1/2.3} \quad (2.1.33)$$

Se procede a obtener la sumatoria de los daños ocurridos dentro del pozo ($s_x + s_z + s_m + s_{PB}$) como sigue:

Dividiendo la ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional (2.1.32) en t_D se obtiene:

$$\frac{[t_D * (1/q_D)]}{t_D} = \frac{4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5}}{t_D}$$

$$(1/q_D)' = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \frac{1}{(t_{DPB})^{1.5}}$$

Integrando la ecuación anterior:

$$\int (1/q_D)' = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \int (t_{DPB})^{-1.5}$$

$$(1/q_D) = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \frac{(t_{DPB})^{-0.5}}{-0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{PB})$$

$$(1/q_D)_{PB} = -9.6466 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{PB}) \quad (2.1.34)$$

La Ec. (2.1.34) corresponde a la ecuación adimensional gobernante de este régimen de flujo para el caso de pruebas de caudal.

Dividiendo la ecuación gobernante de recíproco del caudal adimensional (2.1.34) en la ecuación gobernante de la derivada del recíproco del caudal adimensional (2.1.32) se obtiene la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m + s_z + s_x + s_{PB}$):

$$\frac{(1/q_D)}{[t_D^* (1/q_D)]} = \frac{-9.6466 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{PB})}{4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5}}$$

$$(s_x + s_z + s_m + s_{PB}) = \left[4.8233 \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5} \right] \left[\frac{(1/q_D)}{[t_D^* (1/q_D)]} + 2 \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.1.3), (2.1.2) y (2.1.3) se tiene:

$$(s_x + s_z + s_m + s_{PB}) = \left[4.8233 \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{-0.5} \right] \left[\frac{\frac{k_y L_w}{141.2 \mu B} (1/q)}{\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^* (1/q)]} + 2 \right]$$

$$(s_x + s_z + s_m + s_{PB}) = \left[297.0224 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{k_y h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{0.25}} \sqrt{\frac{k_z \phi \mu c_t}{t_{PB}}} \right] \left[\frac{(1/q)_{PB}}{[t^*(1/q)]_{PB}} + 2 \right] \quad (2.1.35)$$

En donde $[t^*(1/q)]_{PB}$ es la derivada del recíproco de caudal del flujo parabólico, leído a t_{PB} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

Puntos máximos característicos:

$$X_I = 0.00007684835$$

$$\left(\frac{L_w}{h_z} \right)^{0.11} Y_D^{-1.6} \left(\frac{r_w}{h_y} \right)^{2.5} (t_D)_{X1} = 0.00007684835$$

$$b_y = \left[1.1319509 \frac{r_w^{0.5}}{h_y^{0.9}} \left(\frac{L_w}{h_z} \right)^{0.11} \frac{k_y t_{X1}}{\phi \mu c_t} \right]^{1/1.6} \quad (2.1.36)$$

$$Y_I = 187.1222$$

$$\left(\frac{L_w}{h_z} \right)^{-0.675} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{-1.5} [t_D^*(1/q_D)]_{X1} = 187.1222$$

$$\left(\frac{h_z}{L_w} \right)^{0.675} \left(\frac{h_y}{b_y} \right)^{1.5} \frac{k_y L_w \Delta P [t^*(1/q)]}{141.2 \mu B} = 187.1222$$

$$b_y = \left[\frac{1}{26421.655} \frac{h_z^{0.675} h_y^{1.5} k_y L_w^{0.325} \Delta P [t^*(1/q)]_{X1}}{\mu B} \right]^{1/1.5} \quad (2.1.37)$$

2.1.1.8. Flujo Estable (Steady State (ss)).

1. Pozo cerca de la frontera abierta y la frontera lejana abierta.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada del recíproco del caudal para el primer caso de flujo estable es:

$$[t_D^*(1/q_D)]_{ss1} = 2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} t_{DA_{ss1}}^{-1} \quad (2.1.38)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.4) y (2.1.3) en la Ec. (2.1.38), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^*(1/q)] = 2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t h_x h_y} \right)^{-1}$$

Despejando h_y .

$$h_y^{1.7} = 2417844.769 \frac{141.2 \mu B L_w^{0.05} b_y^{2.7} \phi \mu c_t h_x}{k_y L_w \Delta P h_z^{1.2} [t^*(1/q)] (0.0002637) k_y t} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01}$$

$$h_y = \left[1.2946518 \times 10^{12} \frac{\phi B c_t b_y^{2.7} \mu^2 h_x^{1.01}}{k_y^2 L_w^{0.95} \Delta P h_z^{1.2} r_w^{0.01} [t^*(1/q)]_{ss1} t_{ss1}} \right]^{1/1.7} \quad (2.1.39)$$

En donde $[t^*(1/q)]_{ss1}$ es la derivada del recíproco del caudal del primer caso de flujo estable, leído a t_{ss1} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2. Pozo cerca de la frontera abierta y la frontera lejana cerrada.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada del recíproco del caudal para el segundo caso de flujo estable es:

$$[t_D^*(1/q_D)]_{ss2} = 915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{DA_{ss2}}^{-1} \quad (2.1.40)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.4) y (2.1.3) en la Ec. (2.1.40), se obtiene la ecuación resultante para determinar A.

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^*(1/q)] = 915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} \right)^{-1}$$

Despejando A.

$$A = \frac{k_y L_w \Delta P h_z^{0.96} h_y^{2.8}}{(915637.772) 141.2 \mu B L_w^{0.1} b_y^{2.92}} [t^* (1/q)'] \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t} \right)$$

$$A = \frac{1}{4.902846167 \times 10^{11}} \frac{k_y^2 L_w^{0.9} \Delta P h_z^{0.96} h_y^{2.8}}{\mu^2 b_y^{2.92}} [t^* (1/q)']_{ss2} \left(\frac{t_{ss2}}{\phi B c_t} \right) \quad (2.1.41)$$

En donde $[t^*(1/q)']_{ss2}$ es la derivada del recíproco del caudal del segundo caso de flujo estable, leído a t_{ss2} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

Puntos máximos característicos:

$$X_2 = 113.58326$$

$$b_y^{-0.12} h_z^{0.5} \left(\frac{2b_y}{h_y} \right)^{-0.4} \left(\frac{L_w}{h_z} \right)^{0.5} (t_{DA})_{X_2} = 113.58326$$

$$b_y^{-0.12} h_z^{0.5} \left(\frac{2b_y}{h_y} \right)^{-0.4} \left(\frac{L_w}{h_z} \right)^{0.5} \frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} = 113.58326$$

$$A = \frac{1}{568350.4365} \frac{h_y^{0.4} L_w^{0.5} k_y t_{X_2}}{b_y^{0.52} \phi \mu c_t} \quad (2.1.42)$$

$$Y_2 = 3535.46259$$

$$\left(\frac{h_y}{b_y} \right)^{2.4} \left(\frac{h_z}{L_w} \right)^{0.6} h_z^{0.36} [t_D^* (1/q_D)']_{X_2} = 3535.46259$$

$$\left(\frac{h_y}{b_y} \right)^{2.4} \left(\frac{h_z}{L_w} \right)^{0.6} h_z^{0.36} \frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^* (1/q)'] = 3535.46259$$

$$b_y = \left[\frac{1}{499207.3177} \frac{h_z^{0.96} h_y^{2.4} k_y L_w^{0.4} \Delta P}{\mu B} [t^* (1/q)']_{X_2} \right]^{1/2.4} \quad (2.1.43)$$

3. Pozo cerca de la frontera cerrada y la frontera lejana abierta.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada del recíproco del caudal para el tercer caso de flujo estable es:

$$[t_D^*(1/q_D)]_{ss3} = \frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{DA_{ss3}}^{-1} \quad (2.1.44)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.4) y (2.1.3) en la Ec. (2.1.44), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^*(1/q)] = \frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t h_y h_x} \right)^{-1}$$

Despejando h_y .

$$h_y = \left[\frac{1}{655.027} \frac{k_y^2 L_w^{0.15} \Delta P h_z^{0.86} t_{ss3}}{\mu^2 B \phi c_t} [t^*(1/q)]_{ss3} \right]^{1/2.7} \quad (2.1.45)$$

En donde $[t^*(1/q)]_{ss3}$ es la derivada del recíproco del caudal del tercer caso de flujo estable, leído a t_{ss3} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

Puntos máximos característicos:

$$X_3 = 4.70646 \times 10^{-4}$$

$$\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.14} h_y^{0.7}} (t_{DA})_{X3} = 4.70646 \times 10^{-4}$$

$$\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.14} h_y^{0.7}} \frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} = 4.70646 \times 10^{-4}$$

$$A = \frac{1}{1.784778} \frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.14} h_y^{0.7}} \frac{k_y t_{X3}}{\phi \mu c_t} \quad (2.1.46)$$

$$Y_3 = 1.8836589$$

$$\left(\frac{h_x}{h_y} \right) \left(\frac{h_z}{L_w} \right) [t_D^*(1/q_D)]_{X3} = 1.8836589$$

$$\left(\frac{h_x}{h_y}\right)\left(\frac{h_z}{L_w}\right)\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^*(1/q)] = 1.8836589$$

$$h_y = \frac{1}{265.9726367} \frac{h_x h_z k_y \Delta P}{\mu B} [t^*(1/q)]_{X3} \quad (2.1.47)$$

4. Pozo centrado con una frontera abierta.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada del recíproco del caudal para el cuarto caso de flujo estable es:

$$[t_D^*(1/q_D)]_{ss4} = \frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss4}^{-1} \quad (2.1.48)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.4) y (2.1.3) en la Ec. (2.1.48), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^*(1/q)] = \frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t h_x h_y} \right)^{-1}$$

Despejando h_y .

$$h_y = \left[\frac{1}{497.636} \frac{k_y^2 L_w^{0.15} \Delta P h_z^{0.75}}{\mu^2 h_x^{0.2}} [t^*(1/q)]_{ss4} \left(\frac{t_{ss4}}{\phi B c_t} \right) \right]^{0.4} \quad (2.1.49)$$

En donde $[t^*(1/q)]_{ss4}$ es la derivada del recíproco del caudal del cuarto caso de flujo estable, leído a t_{ss4} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

Puntos máximos característicos:

$$X_4 = 3.2738 \times 10^{-4}$$

$$\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_y^{0.7}} (t_{DA})_{X4} = 3.2738 \times 10^{-4}$$

$$\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_y^{0.7}} \frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} = 3.2738 \times 10^{-4}$$

$$A = \frac{1}{1.241487} \frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_y^{0.7}} \frac{k_y t_{x4}}{\phi \mu c_t} \quad (2.1.50)$$

$$Y_4 = 1.8643846$$

$$\left(\frac{h_x}{h_y} \right)^{0.8} \left(\frac{h_z}{L_w} \right) [t_D^* (1/q_D)]_{x4} = 1.751102$$

$$\left(\frac{h_x}{h_y} \right)^{0.8} \left(\frac{h_z}{L_w} \right) \frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^* (1/q)] = 1.751102$$

$$h_y = \left[\frac{1}{247.2556} \frac{h_z h_x^{0.8} k_y \Delta P}{\mu B} [t^* (1/q)]_{x4} \right]^{1/0.8} \quad (2.1.51)$$

5. Pozo centrado con ambas fronteras abiertas.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada del recíproco del caudal para el quinto caso flujo estable es:

$$[t_D^* (1/q_D)]_{ss5} = \frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss5}^{-1} \quad (2.1.52)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.4) y (2.1.3) en la Ec. (2.1.52), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^* (1/q)] = \frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t h_x h_y} \right)^{-1}$$

Despejando h_y .

$$h_y = \left[\frac{1}{86.3557} \frac{k_y^2 L_w^{0.15} \Delta P h_z^{0.75}}{\mu^2 h_x^{0.2}} [t^* (1/q)]_{ss5} \left(\frac{t_{ss5}}{\phi B c_t} \right) \right]^{0.4} \quad (2.1.53)$$

En donde $[t^*(1/q)]_{ss5}$ es la derivada del recíproco del caudal del quinto caso de flujo estable, leído a t_{ss5} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

Puntos máximos característicos:

$$X_5 = 1.03684794 \times 10^{-4}$$

$$\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_y^{0.7}} (t_{DA})_{X_5} = 1.03684794 \times 10^{-4}$$

$$\frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_y^{0.7}} \frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} = 1.03684794 \times 10^{-4}$$

$$A = 2.5432852 \frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_y^{0.7}} \frac{k_y t_{X_5}}{\phi \mu c_t} \quad (2.1.54)$$

$$Y_5 = 0.953556$$

$$\left(\frac{h_x}{h_y} \right)^{0.8} \left(\frac{h_z}{L_w} \right) [t_D^* (1/q_D)]_{X_5} = 0.953556$$

$$\left(\frac{h_x}{h_y} \right)^{0.8} \left(\frac{h_z}{L_w} \right) \frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^* (1/q)] = 0.953556$$

$$h_y = \left[\frac{1}{134.6421} \frac{h_x^{0.8} h_z k_y \Delta P}{\mu B} [t^* (1/q)]_{\max.ss5} \right]^{1/0.8} \quad (2.1.55)$$

2.1.1.9. Flujo Pseudoestable (Pseudosteady State (pss)).

6. Ambas fronteras cerradas pozo centrado o descentrado.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada del recíproco del caudal para el caso de flujo pseudoestable es:

$$[t_D^* (1/q_D)]_{pss} = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DA})_{pss} \quad (2.1.56)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.1.4) y (2.1.3) en la Ec. (2.1.56), se obtiene la ecuación resultante para determinar A.

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{141.2 \mu B} [t^* (1/q)] = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) \left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} \right)$$

Despejando A.

$$A = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{141.2 B}{h_z \Delta P [t^* (1/q)]} \right) \left(\frac{0.0002637 t}{\phi c_t} \right)$$

$$A = \frac{1}{1.5543} \left(\frac{B}{h_z \Delta P [t^* (1/q)]_{pss}} \right) \left(\frac{t_{pss}}{\phi c_t} \right) \quad (2.1.57)$$

En donde $[t^*(1/q)]_{pss}$ es la derivada del recíproco del caudal del flujo pseudoestable, leído a t_{pss} siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.1.2. INTERSECCIONES YACIMIENTOS DE ACEITE (RTA).

Tomando las ecuaciones gobernantes adimensionales de las Derivadas de Recíproco del caudal de dos flujos con diferente pendiente e igualándolas, se obtienen las expresiones para hallar parámetros característicos del yacimiento y el pozo por medio del punto de intersección entre dichos flujos.

2.1.2.1. Intersecciones con el Flujo Radial Temprano.

1. Radial Temprano y Lineal Temprano:

Radial temprano:

$$[t_D^* (1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.1.5)$$

Lineal temprano:

$$[t_D^* (1/q_D)]_{el} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (2.1.9)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}}$$

$$t_{D_{ier-el}} = \frac{1}{17.4974} \left(\frac{k_y}{k_z} \right) \left(\frac{h_z}{r_w} \right)^2 \quad (2.1.58)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos t_{ier-el} .

$$\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_i r_w^2} = \frac{1}{17.4974} \left(\frac{k_y}{k_z} \right) \left(\frac{h_z}{r_w} \right)^2$$

$$k_z = 216.7285 \frac{\phi \mu c_i h_z^2}{t_{ier-el}} \quad (2.1.59)$$

2. Radial Temprano y Elíptico:

Radial temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.1.5)$$

Elíptico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{Ell} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \quad (2.1.13)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}$$

$$(t_{D_{ier-Ell}})^{0.36} = \frac{1}{1.91243044} \frac{k_y^{0.36} k_x^{0.14} h_z}{k_z^{0.5} r_w^{0.72} L_w^{0.28}} \quad (2.1.60)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ell}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.36} = \frac{1}{1.91243044} \frac{k_y^{0.36} k_x^{0.14} h_z}{k_z^{0.5} r_w^{0.72} L_w^{0.28}}$$

$$k_z = \left[10.158152 \frac{k_x^{0.14} h_z}{L_w^{0.28}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{t_{ier-ell}} \right)^{0.36} \right]^2 \quad (2.1.61)$$

3. Radial Temprano y Lineal Tardío:

Radial temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.1.5)$$

Lineal tardío:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ll} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{Dier-ll}} \quad (2.1.22)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{Dier-ll}}$$

$$t_{Dier-ll} = \frac{1}{17.4974} \frac{k_y}{k_z} \left(\frac{h_x h_z}{L_w r_w} \right)^2 \quad (2.1.62)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos t_{ier-ll} .

$$\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} = \frac{1}{17.4974} \frac{k_y}{k_z} \left(\frac{h_x h_z}{L_w r_w} \right)^2$$

$$k_z = 216.7285 \frac{\phi \mu c_t}{t_{ier-hl}} \left(\frac{h_x h_z}{L_w} \right)^2 \quad (2.1.63)$$

4. Radial Temprano y Hemilineal:

Radial temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.1.5)$$

Hemilineal:

$$[t_D * (1/q_D)]_{hl} = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} \quad (2.1.27)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5}$$

$$t_{D_{ier-hl}} = \frac{1}{183.3735} \frac{k_y}{k_z} \left(\frac{h_x h_z}{r_w L_w} \right)^2 \quad (2.1.64)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos t_{ier-hl} .

$$\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} = \frac{1}{183.3735} \frac{k_y}{k_z} \left(\frac{h_x h_z}{r_w L_w} \right)^2$$

$$k_z = 20.6801 \frac{\phi \mu c_t}{t_{ier-hl}} \left(\frac{h_x h_z}{L_w} \right)^2 \quad (2.1.65)$$

5. Radial Temprano y Parabólico:

Radial temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.1.5)$$

Parabólico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{PB} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5} \quad (2.1.32)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5}$$

$$(t_D)_{ier-PB}^{-0.5} = \frac{1}{9.6466} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}}{L_w^{0.62} b_y^{2.3}} \quad (2.1.66)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable b_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos t_{ier-PB} .

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{-0.5} = \frac{1}{9.6466} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}}{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}$$

$$b_y = \left[\frac{1}{594.0448} \frac{k_y h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{0.25}}{k_z^{0.5} L_w^{0.62}} \left(\frac{t_{ier-PB}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \right]^{1/2.3} \quad (2.1.67)$$

6. Radial Temprano y Primer Caso de Estable:

Radial temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.1.5)$$

Primer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss1} = 2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} t_{DA_{ss1}}^{-1} \quad (2.1.38)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = 2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} t_{DA_{ss1}}^{-1}$$

$$t_{DA_{ier-ss1}}^{-1} = \frac{1}{4835689.538} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z^{1.2}}{L_w^{0.05}} \left(\frac{h_y}{b_y} \right)^{2.7} \left(\frac{r_w}{h_x} \right)^{0.01} \quad (2.1.68)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss1}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_t h_x h_y} \right)^{-1} = \frac{1}{4835689.538} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z^{1.2}}{L_w^{0.05}} \left(\frac{h_y}{b_y} \right)^{2.7} \left(\frac{r_w}{h_x} \right)^{0.01}$$

$$h_y = \left[1.8337844 \times 10^{10} \left(\frac{\phi \mu c_t}{t_{ier-ss1}} \right) \frac{k_z^{0.5} h_x^{1.01} L_w^{0.05} b_y^{2.7}}{k_y^{1.5} h_z^{1.2} r_w^{0.01}} \right]^{1/1.7} \quad (2.1.69)$$

7. Radial Temprano y Segundo Caso de Estable:

Radial temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.1.5)$$

Segundo Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss2} = 915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{DA_{ss2}}^{-1} \quad (2.1.40)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DA_{ier-ss2}}^{-1} = \frac{1}{1831275.544} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z^{0.96} h_y^{2.8}}{L_w^{0.1} b_y^{2.92}} \quad (2.1.70)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss2}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_i A} \right)^{-1} = \frac{1}{1831275.544} \sqrt{\frac{k_y}{k_z} \frac{h_z^{0.96} h_y^{2.8}}{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}}$$

$$A = \frac{1}{6944541312} \left(\frac{t_{ier-ss2}}{\phi \mu c_i} \right) \frac{k_y^{1.5} h_z^{0.96} h_y^{2.8}}{k_z^{0.5} L_w^{0.1} b_y^{2.92}} \quad (2.1.71)$$

8. Radial Temprano y Tercer Caso de Estable:

Radial temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.1.5)$$

Tercer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss3} = \frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{DA_{ss3}}^{-1} \quad (2.1.44)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = \frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{DA_{ss3}}^{-1}$$

$$t_{DA_{ier-ss3}}^{-1} = 408.7288 \sqrt{\frac{k_y}{k_z} \frac{h_z^{0.86} h_x}{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}} \quad (2.1.72)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss3}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_i r h_x h_y} \right)^{-1} = 408.7288 \sqrt{\frac{k_y}{k_z} \frac{h_z^{0.86} h_x}{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{9.278} \frac{k_y^{1.5} h_z^{0.86}}{k_z^{0.5} L_w^{0.85}} \left(\frac{t_{ier-ss3}}{\phi \mu c_t r_w} \right) \right]^{1/2.7} \quad (2.1.73)$$

9. Radial Temprano y Cuarto Caso de Estable:

Radial temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.1.5)$$

Cuarto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss4} = \frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss4}^{-1} \quad (2.1.48)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = \frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss4}^{-1}$$

$$(t_{DA})_{ier-ss4}^{-1} = 538 \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z^{0.75} h_x^{0.8}}{L_w^{0.85} h_y^{1.5}} \quad (2.1.74)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss4}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t h_y h_x} \right)^{-1} = 538 \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z^{0.75} h_x^{0.8}}{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{7.048676} \frac{k_y^{1.5} h_z^{0.75}}{k_z^{0.5} L_w^{0.85} h_x^{0.2}} \left(\frac{t_{ier-ss4}}{\phi \mu c_t} \right) \right]^{1/2.5} \quad (2.1.75)$$

10. Radial Temprano y Quinto Caso de Estable:

Radial temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.1.5)$$

Quinto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss5} = \frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss5}^{-1} \quad (2.1.52)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = \frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss5}^{-1}$$

$$(t_{DA})_{ier-ss5}^{-1} = 3100.2976 \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z^{0.75} h_x^{0.8}}{L_w^{0.85} h_y^{1.5}} \quad (2.1.76)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-ss5}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t h_x h_y} \right)^{-1} = 3100.2976 \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z^{0.75} h_x^{0.8}}{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{1.22317} \frac{k_y^{1.5} h_z^{0.75}}{k_z^{0.5} L_w^{0.85} h_x^{0.2}} \left(\frac{t_{ier-ss5}}{\phi \mu c_t} \right) \right]^{0.4} \quad (2.1.77)$$

11. Radial Temprano y Pseudoestable:

Radial temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.1.5)$$

Pseudoestable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pss} = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DA})_{pss} \quad (2.1.56)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DA})_{pss}$$

$$t_{DA_{ier-pss}} = \frac{1}{34.5575} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left(\frac{h_z}{L_w} \right) \quad (2.1.78)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ier-pss}$.

$$\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} = \frac{1}{34.5575} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left(\frac{h_z}{L_w} \right)$$

$$A = \frac{1}{109.7356} \frac{t_{ier-pss}}{\phi \mu c_t} \sqrt{k_y k_z} \left(\frac{L_w}{h_z} \right) \quad (2.1.79)$$

2.1.2.2. Intersecciones con el Primer Caso de Flujo Estable.

1. Primer Caso de Estable y Lineal Temprano:

Primer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss1} = 2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} t_{DA_{ss1}}^{-1} \quad (2.1.38)$$

Lineal temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{el} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (2.1.9)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} t_{D_{ss1}}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}}$$

$$(t_D)_{iss1-el}^{1.5} = 1156036.299 \frac{L_w^{0.05} h_x^{1.01} b_y^{2.7}}{h_y^{1.7} h_z^{0.2} r_w^{2.99}} \quad (2.1.80)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss1-el}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = 1156036.299 \frac{L_w^{0.05} h_x^{1.01} b_y^{2.7}}{h_y^{1.7} h_z^{0.2} r_w^{2.99}}$$

$$h_y = \left[2.69964 \frac{L_w^{0.05} h_x^{1.01} b_y^{2.7} r_w^{0.01}}{h_z^{0.2}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{k_y t_{iss1-el}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.7} \quad (2.1.81)$$

2. Primer Caso de Estable y Elíptico:

Primer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss1} = 2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} t_{DA,ss1}^{-1} \quad (2.1.38)$$

Elíptico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{Ell} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{DEll})^{0.36} \quad (2.1.13)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} t_{D,ss1}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{DEll})^{0.36}$$

$$(t_D)_{iss1-Ell}^{1.36} = 2528557.085 \frac{b_y^{2.7} h_x^{1.01}}{h_y^{1.7} h_z^{0.2} r_w^{2.73} L_w^{0.275}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \quad (2.1.82)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss1-Ell}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi\mu c_t r_w^2}\right)^{1.36} = 2528557.085 \frac{b_y^{2.7} h_x^{1.01}}{h_y^{1.7} h_z^{0.2} r_w^{2.73} L_w^{0.275}} \left(\frac{k_x}{k_y}\right)^{0.14}$$

$$h_y = \left[1.8315444 \times 10^{11} \frac{b_y^{2.7} h_x^{1.01} k_x^{0.14}}{h_z^{0.2} r_w^{0.01} L_w^{0.275} k_y^{1.5}} \left(\frac{\phi\mu c_t}{t_{iss1-El}}\right)^{1.36} \right]^{1/1.7} \quad (2.1.83)$$

3. Primer Caso de Estable y Pseudorradial:

Primer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss1} = 2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y}\right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w}\right)^{0.01} t_{DA_{ss1}}^{-1} \quad (2.1.38)$$

Pseudorradial:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (2.1.19)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y}\right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w}\right)^{0.01} t_{DA_{ss1}}^{-1} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}$$

$$t_{DA_{iss1-pr}} = \frac{4835689.538}{h_z^{0.2} L_w^{0.95}} \left(\frac{b_y}{h_y}\right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w}\right)^{0.01} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (2.1.84)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss1-pr}$.

$$\frac{0.0002637k_y t}{\phi\mu c_t h_x h_y} = \frac{4835689.538}{h_z^{0.2} L_w^{0.95}} \left(\frac{b_y}{h_y}\right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w}\right)^{0.01} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}}$$

$$h_y = \left[1.83378443 \times 10^{10} \frac{k_x^{0.5} \phi \mu c_t h_x^{1.01} b_y^{2.7}}{h_z^{0.2} L_w^{0.95} k_y^{1.5} r_w^{0.01} t_{iss1-pr}} \right]^{1/1.7} \quad (2.1.85)$$

4. Primer Caso de Estable y Lineal Tardío:

Primer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss1} = 2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} t_{DA_{ss1}}^{-1} \quad (2.1.38)$$

Lineal tardío:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ll} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (2.1.22)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} t_{D_{ss1}}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}$$

$$(t_D)_{iss1-ll}^{1.5} = 1156036.299 \frac{h_x^{2.01} b_y^{2.7}}{L_w^{0.95} h_z^{0.2} r_w^{3.01} h_y^{1.7}} \quad (2.1.86)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss1-ll}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = 1156036.299 \frac{h_x^{2.01} b_y^{2.7}}{L_w^{0.95} h_z^{0.2} r_w^{3.01} h_y^{1.7}}$$

$$h_y = \left[2.69964 \frac{h_x^{2.01} b_y^{2.7}}{L_w^{0.95} h_z^{0.2} r_w^{0.01}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{k_y t_{iss1-ll}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.7} \quad (2.1.87)$$

5. Primer Caso de Estable y Hemilineal:

Primer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss1} = 2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y}\right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w}\right)^{0.01} t_{DA_{ss1}}^{-1} \quad (2.1.38)$$

Hemilineal:

$$[t_D * (1/q_D)]_{hl} = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x}\right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} \quad (2.1.27)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y}\right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w}\right)^{0.01} t_{D_{ss1}}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x}\right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5}$$

$$(t_D)_{iss1-hl}^{1.5} = 357100.2181 \frac{h_x^{2.01} b_y^{2.7}}{L_w^{0.95} h_z^{0.2} h_y^{1.7} r_w^{3.01}} \quad (2.1.88)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss1-hl}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = 357100.2181 \frac{h_x^{2.01} b_y^{2.7}}{L_w^{0.95} h_z^{0.2} h_y^{1.7} r_w^{3.01}}$$

$$h_y = \left[8.3392102 \times 10^{10} \frac{h_x^{2.01} b_y^{2.7}}{L_w^{0.95} h_z^{0.2} r_w^{0.01}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{k_y t_{iss1-hl}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.7} \quad (2.1.89)$$

6. Primer Caso de Estable y Parabólico:

Primer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss1} = 2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y}\right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w}\right)^{0.01} t_{DA_{ss1}}^{-1} \quad (2.1.38)$$

Parabólico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{PB} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} \quad (2.1.32)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} t_{D_{ss1}}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5}$$

$$(t_D)_{iss1-PB}^{0.5} = 501284.3425 \frac{b_y^{0.4} h_x^{1.01}}{h_z^{0.58} h_y^{0.65} r_w^{0.76} L_w^{0.57}} \quad (2.1.90)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss1-PB}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = 501284.3425 \frac{b_y^{0.4} h_x^{1.01}}{h_z^{0.58} h_y^{0.65} r_w^{0.76} L_w^{0.57}}$$

$$h_y = \left[30869463.01 \frac{b_y^{0.4} h_x^{1.01} r_w^{0.24}}{h_z^{0.58} L_w^{0.57}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{k_y t_{iss1-PB}} \right)^{0.5} \right]^{1/0.65} \quad (2.1.91)$$

2.1.2.3. Intersecciones con el Segundo Caso de Flujo Estable

1. Segundo Caso de Estable y Lineal Temprano:

Segundo Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss2} = 915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{DA_{ss2}}^{-1} \quad (2.1.40)$$

Lineal temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{el} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (2.1.9)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{D_{ss2}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} = \frac{118 r_w}{100 h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}}$$

$$(t_D)_{iss2-el}^{1.5} = 437790.9265 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92} h_z^{1.04} A}{h_y^{2.8} r_w^3} \quad (2.1.92)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss2-el}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = 437790.9265 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92} h_z^{1.04} A}{h_y^{2.8} r_w^3}$$

$$A = 1.0223546 \times 10^{11} \left(\frac{k_y t_{iss2-el}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \frac{h_y^{2.8}}{L_w^{0.1} b_y^{2.92} h_z^{1.04}} \quad (2.1.93)$$

2. Segundo Caso de Estable y Elíptico:

Segundo Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss2} = 915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{DA_{ss2}}^{-1} \quad (2.1.40)$$

Elíptico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{Ell} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \quad (2.1.13)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{D_{ss2}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}$$

$$(t_D)_{iss2-Ell}^{1.36} = 957564.524 \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04} A}{h_y^{2.8} L_w^{0.18} r_w^{2.72}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \quad (2.1.94)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss2-Ell}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.36} = 957564.524 \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04} A}{h_y^{2.8} L_w^{0.18} r_w^{2.72}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14}$$

$$A = \frac{1}{7.0543706 \times 10^{10}} \left(\frac{t_{iss2-Ell}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.36} \frac{h_y^{2.8} L_w^{0.18} k_y^{1.5}}{b_y^{2.92} h_z^{0.04} k_x^{0.14}} \quad (2.1.95)$$

3. Segundo Caso de Estable y Pseudorradial:

Segundo Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss2} = 915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{DA_{ss2}}^{-1} \quad (2.1.40)$$

Pseudorradial:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (2.1.19)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{DA_{ss2}}^{-1} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}$$

$$t_{DA_{iss2-pr}} = 1831275.544 \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04}}{h_y^{2.8} L_w^{0.9}} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (2.1.96)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss2-pr}$.

$$\frac{0.0002637k_y t}{\phi\mu c_t A} = 1831275.544 \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04}}{h_y^{2.8} L_w^{0.9}} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}}$$

$$A = \frac{1}{6944541312} \frac{t_{iss2-pr}}{\phi\mu c_t} \frac{k_y^{1.5} h_y^{2.8} L_w^{0.9}}{k_x^{0.5} b_y^{2.92} h_z^{0.04}} \quad (2.1.97)$$

4. Segundo Caso de Estable y Lineal Tardío:

Segundo Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss2} = 915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{DA_{ss2}}^{-1} \quad (2.1.40)$$

Lineal tardío:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ll} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (2.1.22)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{D_{ss2}}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}$$

$$(t_D)_{iss2-ll}^{1.5} = 437790.9265 \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04}}{h_y^{1.8} L_w^{0.9}} \frac{h_x^2}{r_w^3} \quad (2.1.98)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss2-ll}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi\mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = 437790.9265 \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04}}{h_y^{1.8} L_w^{0.9}} \frac{h_x^2}{r_w^3}$$

$$h_y = \left[1.0223546 \times 10^{11} \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04} h_x^2}{L_w^{0.9}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{k_y t_{iss2-hl}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.8} \quad (2.1.99)$$

5. Segundo Caso de Estable y Hemilineal:

Segundo Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss2} = 915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{DA_{ss2}}^{-1} \quad (2.1.40)$$

Hemilineal:

$$[t_D * (1/q_D)]_{hl} = \frac{382\sqrt{\pi} L_w}{100 h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{-0.5} \quad (2.1.27)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{D_{ss2}}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{382\sqrt{\pi} L_w}{100 h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{-0.5}$$

$$(t_D)_{iss2-hl}^{1.5} = 135233.8464 \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04} h_x^2}{h_y^{1.8} L_w^{0.9} r_w^3} \quad (2.1.100)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss2-hl}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = 135233.8464 \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04} h_x^2}{h_y^{1.8} L_w^{0.9} r_w^3}$$

$$h_y = \left[3.158058757 \times 10^{10} \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04} h_x^2}{L_w^{0.9}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{k_y t_{iss2-hl}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.8} \quad (2.1.101)$$

6. Segundo Caso de Estable y Parabólico:

Segundo Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss2} = 915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{DA_{ss2}}^{-1} \quad (2.1.40)$$

Parabólico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{PB} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5} \quad (2.1.32)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{DA_{ss2}}^{-1} \frac{A}{r_w^2} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5}$$

$$(t_D)_{iss2-PB}^{0.5} = 189836.3718 \frac{A b_y^{0.62}}{h_z^{0.34} h_y^{1.75} L_w^{0.52} r_w^{0.75}} \quad (2.1.102)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss2-PB}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = 189836.3718 \frac{A b_y^{0.62}}{h_z^{0.34} h_y^{1.75} L_w^{0.52} r_w^{0.75}}$$

$$A = \frac{1}{11690265.11} \left(\frac{k_y t_{iss2-PB}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \frac{h_z^{0.34} h_y^{1.75} L_w^{0.52}}{r_w^{0.25} b_y^{0.62}} \quad (2.1.103)$$

2.1.2.4. Intersecciones con el Tercer Caso de Flujo Estable.

1. Tercer Caso de Estable y Lineal Temprano:

Tercer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss3} = \frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{DA_{ss3}}^{-1} \quad (2.1.44)$$

Lineal temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{el} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (2.1.9)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{D_{ss3}}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}}$$

$$(t_D)_{iss3-el}^{1.5} = \frac{1}{1709.7092} \frac{L_w^{0.85} h_y^{2.7} h_z^{0.14}}{r_w^3} \quad (2.1.104)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss3-el}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_i r_w^2} \right)^{1.5} = \frac{1}{1709.7092} \frac{L_w^{0.85} h_y^{2.7} h_z^{0.14}}{r_w^3}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{136.588} \frac{1}{L_w^{0.85} h_z^{0.14}} \left(\frac{k_y t_{iss3-el}}{\phi \mu c_i} \right)^{1.5} \right]^{1/2.7} \quad (2.1.105)$$

2. Tercer Caso de Estable y Elíptico:

Tercer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss3} = \frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{DA_{ss3}}^{-1} \quad (2.1.44)$$

Elíptico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{Ell} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{DEll})^{0.36} \quad (2.1.13)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{D_{ss3}}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}$$

$$(t_D)_{iss3-Ell}^{1.36} = \frac{1}{781.6655} \frac{L_w^{0.57} h_y^{2.7} h_z^{0.14}}{r_w^{2.72}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \quad (2.1.106)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss3-Ell}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.36} = \frac{1}{781.6655} \frac{L_w^{0.57} h_y^{2.7} h_z^{0.14}}{r_w^{2.72}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{94.24738} \left(\frac{t_{iss3-Ell}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.36} \frac{k_y^{1.5}}{L_w^{0.57} h_z^{0.14} k_x^{0.14}} \right]^{1/2.7} \quad (2.1.107)$$

3. Tercer Caso de Estable y Pseudorradial:

Tercer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss3} = \frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{DA_{ss3}}^{-1} \quad (2.1.44)$$

Pseudorradial:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (2.1.19)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{DA_{ss3}}^{-1} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}$$

$$t_{DA_{ss3-pr}} = \frac{1}{408.72887} \frac{h_y^{1.7} h_z^{0.14}}{L_w^{0.15} h_x} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (2.1.108)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss3-pr}$.

$$\frac{0.0002637k_y t}{\phi\mu c_t h_x h_y} = \frac{1}{408.72887} \frac{h_y^{1.7} h_z^{0.14}}{L_w^{0.15} h_x} \sqrt{k_x}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{9.278} \frac{k_y^{1.5} t_{iss3-pr} L_w^{0.15}}{\phi\mu c_t k_x^{0.5} h_z^{0.14}} \right]^{1/2.7} \quad (2.1.109)$$

4. Tercer Caso de Estable y Lineal Tardío:

Tercer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss3} = \frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{D_{As3}}^{-1} \quad (2.1.44)$$

Lineal tardío:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ll} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (2.1.22)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{D_{ss3}}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}$$

$$(t_D)_{iss3-ll}^{1.5} = \frac{1}{1709.7092} \frac{h_y^{2.7} h_z^{0.14} h_x}{r_w^3 L_w^{0.15}} \quad (2.1.110)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss3-ll}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi\mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = \frac{1}{1709.7092} \frac{h_y^{2.7} h_z^{1.14} h_x}{r_w^3 L_w^{0.15}}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{136.588} \left(\frac{k_y t_{iss3-hl}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.15}}{h_z^{1.14} h_x} \right]^{1/2.7} \quad (2.1.111)$$

5. Tercer Caso de Estable y Hemilineal:

Tercer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss3} = \frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{DAss3}^{-1} \quad (2.1.44)$$

Hemilineal:

$$[t_D * (1/q_D)]_{hl} = \frac{382\sqrt{\pi} L_w}{100 h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{Dhl} \right]^{0.5} \quad (2.1.27)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{Dss3}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{382\sqrt{\pi} L_w}{100 h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{Dhl} \right]^{0.5}$$

$$(t_D)_{iss3-hl}^{1.5} = \frac{1}{5534.821} \frac{h_y^{2.7} h_z^{0.14}}{L_w^{0.15}} \frac{h_x}{r_w^3} \quad (2.1.112)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss3-hl}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = \frac{1}{5534.821} \frac{h_y^{2.7} h_z^{0.14}}{L_w^{0.15}} \frac{h_x}{r_w^3}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{42.1921} \left(\frac{k_y t_{iss3-hl}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.14} h_x} \right]^{1/2.7} \quad (2.1.113)$$

6. Tercer Caso de Estable y Parabólico:

Tercer Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss3} = \frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{DA_{ss3}}^{-1} \quad (2.1.44)$$

Parabólico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{PB} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5} \quad (2.1.32)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{D_{ss3}}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5}$$

$$(t_D)_{iss3-PB}^{0.5} = \frac{1}{169.481} \frac{L_w^{0.23} h_y^{3.75}}{h_z^{0.24} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \quad (2.1.114)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss3-PB}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = \frac{1}{169.481} \frac{L_w^{0.23} h_y^{3.75}}{h_z^{0.24} r_w^{0.75} b_y^{2.3}}$$

$$h_y = \left[2.752175 \left(\frac{k_y t_{iss3-PB}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \frac{h_z^{0.24} b_y^{2.3}}{r_w^{0.25} L_w^{0.23}} \right]^{1/3.75} \quad (2.1.115)$$

2.1.2.5. Intersecciones con el Cuarto Caso de Flujo Estable.

1. Cuarto Caso de Estable y Lineal Temprano:

Cuarto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss4} = \frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss4}^{-1} \quad (2.1.48)$$

Lineal temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{el} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (2.1.9)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_D)_{ss4}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}}$$

$$(t_D)_{iss4-el}^{1.5} = \frac{1}{2250.449} \frac{L_w^{0.85} h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^3} \quad (2.1.116)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss4-el}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = \frac{1}{2250.449} \frac{L_w^{0.85} h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^3}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{103.7685} \frac{1}{L_w^{0.85} h_z^{0.25} h_x^{0.2}} \left(\frac{k_y t_{iss4-el}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (2.1.117)$$

2. Cuarto Caso de Estable y Elíptico:

Cuarto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss4} = \frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss4}^{-1} \quad (2.1.48)$$

Elíptico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{EII} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{EII}})^{0.36} \quad (2.1.13)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_D)_{ss4}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}$$

$$(t_D)_{iss4-Ell}^{1.36} = \frac{1}{1028.8876} \frac{L_w^{0.57} h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^{2.72}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \quad (2.1.118)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss4-Ell}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.36} = \frac{1}{1028.8876} \frac{L_w^{0.57} h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^{2.72}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{71.60153} \left(\frac{t_{iss4-Ell}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.36} \frac{k_y^{1.5}}{L_w^{0.57} h_z^{0.25} h_x^{0.2} k_x^{0.14}} \right]^{-0.4} \quad (2.1.119)$$

3. Cuarto Caso de Estable y Pseudorradial:

Cuarto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss4} = \frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss4}^{-1} \quad (2.1.48)$$

Pseudorradial:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (2.1.19)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss4}^{-1} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}$$

$$t_{DA_{iss4-pr}} = \frac{1}{538} \frac{h_y^{1.5} h_z^{0.25}}{h_x^{0.8} L_w^{0.15}} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (2.1.120)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss4-pr}$.

$$\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_t h_x h_y} = \frac{1}{538} \frac{h_y^{1.5} h_z^{0.25}}{h_x^{0.8} L_w^{0.15}} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{7.04867675} \frac{k_y^{1.5} t_{iss4-pr}}{\phi \mu c_t} \frac{L_w^{0.15}}{h_x^{0.2} h_z^{0.25} k_x^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (2.1.121)$$

4. Cuarto Caso de Estable y Lineal Tardío:
Cuarto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss4} = \frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss4}^{-1} \quad (2.1.48)$$

Lineal Tardío:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ll} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (2.1.22)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_D)_{ss4}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}$$

$$(t_D)_{iss4-ll}^{1.5} = \frac{1}{2250.449} \frac{h_y^{2.5} h_x^{1.2} h_z^{0.25}}{L_w^{0.15} r_w^3} \quad (2.1.122)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss4-ll}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = \frac{1}{2250.449} \frac{h_y^{2.5} h_x^{1.2} h_z^{0.25}}{L_w^{0.15} r_w^3}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{103.7685} \left(\frac{k_y t_{iss4-hl}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.15}}{h_x^{1.2} h_z^{0.25}} \right]^{0.4} \quad (2.1.123)$$

5. Cuarto Caso de Estable y Hemilineal:

Cuarto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss4} = \frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss4}^{-1} \quad (2.1.48)$$

Hemilineal:

$$[t_D * (1/q_D)]_{hl} = \frac{382\sqrt{\pi} L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{Dhl} \right]^{0.5} \quad (2.1.27)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_D)_{ss4}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{382\sqrt{\pi} L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{Dhl} \right]^{0.5}$$

$$(t_D)_{iss4-hl}^{1.5} = \frac{1}{7285.3525} \frac{h_y^{2.5} h_x^{1.2} h_z^{0.25}}{L_w^{0.15} r_w^3} \quad (2.1.124)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss4-hl}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = \frac{1}{7285.3525} \frac{h_y^{2.5} h_x^{1.2} h_z^{0.25}}{L_w^{0.15} r_w^3}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{32.05414777} \left(\frac{k_y t_{iss4-hl}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.15}}{h_x^{1.2} h_z^{0.25}} \right]^{0.4} \quad (2.1.125)$$

6. Cuarto Caso de Estable y Parabólico:

Cuarto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss4} = \frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss4}^{-1} \quad (2.1.48)$$

Parabólico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{PB} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5} \quad (2.1.32)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_D)_{ss4}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5}$$

$$(t_D)_{iss4-PB}^{0.5} = \frac{1}{223.08378} \frac{L_w^{0.23} h_y^{3.55} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \quad (2.1.126)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss4-PB}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = \frac{1}{223.08378} \frac{L_w^{0.23} h_y^{3.55} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}}$$

$$h_y = \left[3.6226 \left(\frac{k_y t_{iss4-PB}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \frac{h_z^{0.13} b_y^{2.3}}{r_w^{0.25} L_w^{0.23} h_x^{0.2}} \right]^{1/3.55} \quad (2.1.127)$$

2.1.2.6. Intersecciones con el Quinto Caso de Flujo Estable.

1. Quinto Caso de Estable y Lineal Temprano:

Quinto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss5} = \frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss5}^{-1} \quad (2.1.52)$$

Lineal temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{el} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (2.1.9)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_D)_{ss5}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}}$$

$$(t_D)_{iss5-el}^{1.5} = \frac{1}{12968.51723} \frac{L_w^{0.85} h_y^{2.5} h_x^{0.2} h_z^{0.25}}{r_w^3} \quad (2.1.128)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss5-el}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_i r_w^2} \right)^{1.5} = \frac{1}{12968.51723} \frac{L_w^{0.85} h_y^{2.5} h_x^{0.2} h_z^{0.25}}{r_w^3}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{18} \frac{1}{L_w^{0.85} h_x^{0.2} h_z^{0.25}} \left(\frac{k_y t_{iss5-el}}{\phi \mu c_i} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (2.1.129)$$

2. Quinto Caso de Estable y Elíptico:

Quinto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss5} = \frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss5}^{-1} \quad (2.1.52)$$

Elíptico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{Ell} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{DEll})^{0.36} \quad (2.1.13)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_D)^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}$$

$$(t_D)_{iss5-Ell}^{1.36} = \frac{1}{5929.1035} \frac{L_w^{0.57} h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^{2.72}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \quad (2.1.130)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss5-Ell}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.36} = \frac{1}{5929.1035} \frac{L_w^{0.57} h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^{2.72}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{12.425137} \left(\frac{t_{iss5-Ell}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.36} \frac{k_y^{1.5}}{L_w^{0.57} h_z^{0.25} h_x^{0.2} k_x^{0.14}} \right]^{0.4} \quad (2.1.131)$$

3. Quinto Caso de Estable y Pseudorradial:

Quinto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss5} = \frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss5}^{-1} \quad (2.1.52)$$

Pseudorradial:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (2.1.19)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss5}^{-1} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}$$

$$t_{DA_{iss5-pr}} = \frac{1}{3100.2976} \frac{h_z^{0.25} h_y^{1.5}}{L_w^{0.15} h_x^{0.8}} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (2.1.132)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss5-pr}$.

$$\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t h_x h_y} = \frac{1}{3100.2976} \frac{h_z^{0.25} h_y^{1.5}}{L_w^{0.15} h_x^{0.8}} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{1.22316906} \frac{t_{iss5-pr}}{\phi \mu c_t} \frac{L_w^{0.15} k_y^{1.5}}{h_x^{0.2} h_z^{0.25} k_x^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (2.1.133)$$

4. Quinto Caso de Estable y Lineal Tardío:

Quinto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss5} = \frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss5}^{-1} \quad (2.1.52)$$

Lineal Tardío:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ll} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (2.1.22)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_D)_{ss5}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}$$

$$(t_D)_{iss5-ll}^{1.5} = \frac{1}{12968.51723} \frac{h_y^{2.5} h_x^{1.2} h_z^{0.25}}{L_w^{0.15} r_w^3} \quad (2.1.134)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss5-ll}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = \frac{1}{12968.51723} \frac{h_y^{2.5} h_x^{1.2} h_z^{0.25}}{L_w^{0.15} r_w^3}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{18} \left(\frac{k_y t_{iss5-hl}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.15}}{h_x^{1.2} h_z^{0.25}} \right]^{0.4} \quad (2.1.135)$$

5. Quinto Caso de Estable y Hemilineal:

Quinto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss5} = \frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss5}^{-1} \quad (2.1.52)$$

Hemilineal:

$$[t_D * (1/q_D)]_{hl} = \frac{382\sqrt{\pi} L_w}{100 h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} \quad (2.1.27)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_D)_{ss5}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = \frac{382\sqrt{\pi} L_w}{100 h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5}$$

$$(t_D)_{iss5-hl}^{1.5} = \frac{1}{41982.827} \frac{h_z^{0.25} h_y^{2.5} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \quad (2.1.136)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss5-hl}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = \frac{1}{41982.827} \frac{h_z^{0.25} h_y^{2.5} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3}$$

$$h_y = \left[\frac{1}{5.5624} \left(\frac{k_y t_{iss5-hl}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right]^{0.4} \quad (2.1.137)$$

6. Quinto Caso de Estable y Parabólico:

Quinto Caso Estable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss5} = \frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss5}^{-1} \quad (2.1.52)$$

Parabólico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{PB} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5} \quad (2.1.32)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_D)_{ss5}^{-1} \frac{h_x h_y}{r_w^2} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5}$$

$$(t_D)_{iss5-PB}^{0.5} = \frac{1}{29907.33083} \frac{L_w^{0.23} h_y^{3.55} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \quad (2.1.138)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{iss5-PB}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = \frac{1}{29907.33083} \frac{L_w^{0.23} h_y^{3.55} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}}$$

$$h_y = \left[485.66043 \left(\frac{k_y t_{iss5-PB}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \frac{h_z^{0.13} b_y^{2.3}}{r_w^{0.25} L_w^{0.23} h_x^{0.2}} \right]^{1/3.55} \quad (2.1.139)$$

2.1.2.7. Intersecciones con el Flujo Pseudoestable.

1. Pseudoestable y Lineal Temprano:

Estado Pseudoestable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pss} = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DA})_{pss} \quad (2.1.56)$$

Lineal temprano:

$$[t_D * (1/q_D)]_{el} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (2.1.9)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) t_{D_{pss}} \frac{r_w^2}{A} = \frac{118}{100} \frac{r_w}{h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}}$$

$$(t_D)_{ipss-el}^{0.5} = \frac{1}{8.26143744} \frac{A}{L_w r_w} \sqrt{\pi} \quad (2.1.140)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ipss-el}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = \frac{1}{8.26143744} \frac{A}{L_w r_w} \sqrt{\pi}$$

$$A = \frac{L_w}{7.454} \left(\frac{k_y t_{ipss-el}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \quad (2.1.141)$$

2. Pseudoestable y Elíptico:

Estado Pseudoestable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pss} = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DA})_{pss} \quad (2.1.56)$$

Elíptico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{Ell} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36} \quad (2.1.13)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) t_{D_{pss}} \frac{r_w^2}{A} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{Ell}})^{0.36}$$

$$(t_D)_{ipss-Ell}^{0.64} = \frac{1}{18.07} \frac{A}{L_w^{0.72} r_w^{1.28}} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} \quad (2.1.142)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ipss-Ell}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.64} = \frac{1}{18.07} \frac{A}{L_w^{0.72} r_w^{1.28}} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14}$$

$$A = \frac{L_w^{0.72} k_y^{0.5} k_x^{0.14}}{10.802676} \left(\frac{t_{ipss-Ell}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.64} \quad (2.1.143)$$

3. Pseudoestable y Pseudorradial:

Estado Pseudoestable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pss} = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DA})_{pss} \quad (2.1.56)$$

Pseudorradial:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (2.1.19)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DA})_{pss} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}$$

$$t_{DA_{ipss-pr}} = \frac{1}{34.5575} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (2.1.144)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ipss-pr}$.

$$\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t A} = \frac{1}{34.5575} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}$$

$$A = \frac{1}{109.735} \frac{t_{ipss-pr}}{\phi \mu c_t} (k_y k_x)^{0.5} \quad (2.1.145)$$

4. Pseudoestable y Lineal Tardío:

Estado Pseudoestable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pss} = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DA})_{pss} \quad (2.1.56)$$

Lineal Tardío:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ll} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}} \quad (2.1.22)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) t_{D_{pss}} \frac{r_w^2}{A} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{ll}}}$$

$$(t_D)_{ipss-ll}^{0.5} = \frac{1}{8.26143744} \frac{A}{r_w h_x} \quad (2.1.146)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ipss-ll}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = \frac{1}{8.26143744} \frac{A}{r_w h_x}$$

$$A = \frac{h_x}{7.454} \left(\frac{k_y t_{ipss-ll}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \quad (2.1.147)$$

5. Pseudoestable y Hemilineal:

Estado Pseudoestable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pss} = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DA})_{pss} \quad (2.1.56)$$

Hemilineal:

$$[t_D * (1/q_D)]_{hl} = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} \quad (2.1.27)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) t_{D_{pss}} \frac{r_w^2}{A} = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5}$$

$$(t_D)_{ipss-hl}^{0.5} = \frac{1}{2.551962} \frac{A}{r_w h_x} \quad (2.1.148)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ipss-hl}$.

$$\left(\frac{0.0002637k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{0.5} = \frac{1}{2.551962} \frac{A}{r_w h_x}$$

$$A = \frac{h_x}{24.13074} \left(\frac{k_y t_{ipss-hl}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \quad (2.1.149)$$

6. Pseudoestable y Parabólico:

Estado Pseudoestable:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pss} = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DA})_{pss} \quad (2.1.156)$$

Parabólico:

$$[t_D * (1/q_D)]_{PB} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5} \quad (2.1.152)$$

Igualando las anteriores ecuaciones gobernantes de ambos flujos, se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$\frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) t_{Dpss} \frac{r_w^2}{A} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{DPB})^{-0.5}$$

$$(t_D)_{ipss-PB}^{1.5} = \frac{1}{3.58235} \frac{h_z^{0.38} b_y^{2.3} A}{L_w^{0.38} h_y^{1.05} r_w^{3.25}} \quad (2.1.150)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_{ipss-PB}$.

$$\left(\frac{0.0002637 k_y t}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)^{1.5} = \frac{1}{3.58235} \frac{h_z^{0.38} b_y^{2.3} A}{L_w^{0.38} h_y^{1.05} r_w^{3.25}}$$

$$A = \frac{1}{65187.8291} \left(\frac{k_y t_{ipss-PB}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.38} h_y^{1.05} r_w^{0.25}}{h_z^{0.38} b_y^{2.3}} \quad (2.1.151)$$

2.2. ANÁLISIS DE TRASIENTE DE CAUDAL EN YACIMIENTOS DE GAS.

Interpretando pruebas de caudal aplicadas en yacimientos gasíferos hay que rescribir las ecuaciones para yacimientos de gas mostradas en el capítulo anterior para pruebas PTA a ecuaciones para interpretar pruebas RTA en yacimientos de gas. Basándose en la siguiente expresión:

$$P_D \approx \frac{1}{q_D} \quad (2.2.1)$$

Que indica que el caudal adimensional dentro de un yacimiento posee un comportamiento aproximadamente igual al inverso de la presión adimensional se obtienen las siguientes ecuaciones para conversión de adimensional a dimensional en el caso de pruebas de caudal en yacimientos gasíferos:

$$m(1/q_D) = \frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} m(1/q_g) \quad (2.2.2)$$

$$t_D * m(1/q_D)' = \frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t * m(1/q_g)'] \quad (2.2.3)$$

2.2.1. ECUACIONES DE FLUJO EN POZOS HORIZONTALES EN YACIMIENTOS DE GAS (RTA).

2.2.1.1. Flujo Radial Temprano (Early Radial (er)):

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes al recíproco del caudal y a la derivada del recíproco del caudal para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$(1/q_D)_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left[\ln \left(\sqrt{\frac{k_z}{k_y}} t_{Der} \right) + 0.80907 + 2s_m \right] \quad (2.1.4)$$

$$[t_D * (1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.1.5)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudo-recíproco del caudal y de la Derivada de Pseudo-recíproco del caudal para yacimientos de gas:

$$[m(1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left[\ln \left(\sqrt{\frac{k_z}{k_y}} t_{Daer} \right) + 0.80907 + 2s_m' \right] \quad (2.2.4)$$

$$[t_D * m(1/q_D)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \quad (2.2.5)$$

Reemplazando la expresión de la derivada del recíproco del caudal adimensional, Ec. (2.2.3), en la Ec. (2.2.5), se obtiene la ecuación resultante para el producto $(k_y k_z)^{0.5}$ en donde $[t * m(1/q)]_{er1}$ es la derivada del recíproco del caudal del flujo radial temprano, leído a $t=1$ hr.

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t * m(1/q)]_{er} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}}$$

$$\sqrt{k_y k_z} = \frac{711.26T}{L_w \Delta P [t * m(1/q)]_{er1}} \quad (2.2.6)$$

Se procede a obtener la ecuación para determinar el daño mecánico aparente ocurrido en el pozo como se explicó en el capítulo 1. Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.4) en la ecuación gobernante de la derivada del pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.5) se tiene:

$$\frac{m(1/q_D)}{t_D * m(1/q_D)'} = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \left[\ln \left(\sqrt{\frac{k_z}{k_y}} t_{Da} \right) + 0.80907 + 2s_m' \right]}{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}}}$$

$$s_m' = \frac{1}{2} \left[\frac{m(1/q_D)}{t_D * m(1/q_D)'} - \ln \left(\sqrt{\frac{k_z}{k_y}} t_{Da} \right) - 0.80907 \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.2.6), (2.2.2) y (2.2.3) en la anterior ecuación, se tiene:

$$s_m' = \frac{1}{2} \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} m(1/q)}{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t * m(1/q)]_{er}} - \ln \left(\sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P) \right) - 0.80907 \right]$$

$$s_m' = \frac{1}{2} \left[\frac{m(1/q)}{[t^* m(1/q)]} - \left[\ln \left(\frac{\sqrt{k_z k_y}}{\phi r_w^2} \right) t_a(P) + \ln(0.0002637) \right] - 0.80907 \right]$$

$$s_m' = \frac{1}{2} \left[\frac{[m(1/q)]_{er}}{[t^* m(1/q)]_{er}} - \ln \left(\frac{\sqrt{k_z k_y} t_a(P)_{er}}{\phi r_w^2} \right) + 7.4316 \right] \quad (2.2.7)$$

En donde $[t^* m(1/q)]_{er}$ es la derivada del pseudo-recíproco del caudal del flujo radial temprano, leído a $t_a(P)_{er}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.2.1.2. Flujo Lineal Temprano (Early Linear (el)).

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes al Recíproco del caudal y a la Derivada del recíproco del caudal para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$(1/q_D)_{el} = \frac{236r_w}{100h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_z + s_m) \quad (2.1.8)$$

$$[t_D^* (1/q_D)]_{el} = \frac{118r_w}{100h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (2.1.9)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudo-recíproco del caudal y de la Derivada de pseudo-recíproco del caudal para yacimientos de gas:

$$[m(1/q_D)]_{el} = \frac{236r_w}{100h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_z + s_m') \quad (2.2.8)$$

$$[t_D^* m(1/q_D)]_{el} = \frac{118r_w}{100h_z} \sqrt{\pi t_{D_{el}}} \quad (2.2.9)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.6) y (2.2.3) en la Ec. (2.2.9), se obtiene la ecuación resultante para el hallar k_y y L_w .

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t^* m(1/q)] = \frac{118r_w}{100h_z} \sqrt{\pi \left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P)}$$

$$\frac{k_y}{k_y^{0.5}} L_w = \frac{1422.52(118)Tr_w}{100\Delta Ph_z [t^* m(1/q)]'} \sqrt{\pi \left(\frac{0.0002637}{\phi r_w^2} \right) t_a(P)}$$

Despejando k_y y L_w .

$$L_w = \frac{48.3137T}{\Delta Ph_z [t^* m(1/q)]'_{el}} \sqrt{\left(\frac{t_a(P)_{el}}{\phi k_y} \right)} \quad (2.2.10)$$

$$k_y = \left(\frac{t_a(P)_{el}}{\phi} \right) \left[\frac{48.3137T}{L_w \Delta Ph_z [t^* m(1/q)]'_{el}} \right]^2 \quad (2.2.11)$$

Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.8) en la ecuación gobernante de la Derivada del pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.9) se obtiene la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m' + s_z$):

$$\frac{[m(1/q_D)]}{[t_D^* m(1/q_D)]'} = \frac{236r_w \sqrt{\pi t_{Da}}}{100h_z} + \frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_z + s_m')}{\frac{118r_w \sqrt{\pi t_{Da}}}{100h_z}}$$

$$(s_z + s_m') = \left[\frac{[m(1/q_D)]}{[t_D^* m(1/q_D)]'} - 2 \right] \left[\frac{118r_w \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \sqrt{\pi t_{Da}}}{100h_z} \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.2.6), (2.2.2) y (2.2.3) en la anterior ecuación, se tiene:

$$(s_z + s_m') = \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} m(1/q)}{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t^* m(1/q)]'} - 2 \right] \left[\frac{118r_w \sqrt{\left(\frac{0.0002637 \pi k_z}{\phi r_w^2} \right) t_a(P)}}{100h_z} \right]$$

$$(s_z + s_m') = \left[\frac{1}{29.4434h_z} \sqrt{\left(\frac{k_z t_a(P)_{el}}{\phi} \right)} \right] \left[\frac{m(1/q)_{el}}{[t^* m(1/q)]'_{el}} - 2 \right] \quad (2.2.12)$$

En donde $[t^* m(1/q)]'_{el}$ es la derivada del pseudo-recíproco del caudal del flujo lineal temprano, leído a $t_a(P)_{el}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.2.1.3. Flujo Elíptico (Elliptical (EI)).

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes al Recíproco del caudal y a la Derivada del recíproco del caudal para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$(1/q_D)_{EI} = 2.65615 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{EI}})^{0.36} + s_{EI} \quad (2.1.16)$$

$$[t_D * (1/q_D)]_{EI} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{EI}})^{0.36} \quad (2.1.13)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudo-recíproco del caudal y de la Derivada de pseudo-recíproco del caudal para yacimientos de gas:

$$[m(1/q_D)]_{EI} = 2.65615 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{aEI}})^{0.36} + s_{EI} \quad (2.2.13)$$

$$[t_D * m(1/q_D)]_{EI} = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{D_{aEI}})^{0.36} \quad (2.2.14)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.6) y (2.2.3) en la Ec. (2.2.14), se obtiene la ecuación resultante para el hallar k_y y k_x .

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t * m(1/q)] = 0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} \left[\left(\frac{0.0002637k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P) \right]^{0.36}$$

Despejando L_w .

$$L_w = \left[70.0186 \frac{T}{k_y^{0.5} k_x^{0.14} \Delta P h_z [t * m(1/q)]_{EI} \left[\frac{t_a(P)_{EI}}{\phi} \right]^{0.36}} \right]^{1/0.72} \quad (2.2.15)$$

Despejando k_y .

$$k_y = \left[70.0186 \frac{T}{L_w^{0.72} k_x^{0.14} \Delta P h_z [t^* m(1/q)]_{Ell} \left[\frac{t_a(P)_{Ell}}{\phi} \right]^{0.36}} \right]^2 \quad (2.2.16)$$

Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.13) en la ecuación gobernante de la Derivada del pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.14) se obtiene la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo (s_{Ell}):

$$\frac{[m(1/q_D)]}{[t_D^* m(1/q_D)]} = \frac{2.65615 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{Da_{Ell}})^{0.36}}{0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{Da_{Ell}})^{0.36}} + \frac{s_{Ell}}{0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{Da_{Ell}})^{0.36}}$$

$$s_{Ell} = \left[0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} (t_{Da_{Ell}})^{0.36} \right] \left[\frac{[m(1/q_D)]}{[t_D^* m(1/q_D)]} - 2.777 \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores dimensionales (1.2.6), (2.2.2) y (2.2.3) en la anterior ecuación, se tiene:

$$s_{Ell} = \left[0.95621522 \frac{r_w^{0.72} L_w^{0.28}}{h_z} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} \left(\left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P) \right)^{0.36} \right] \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52 T} m(1/q)}{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52 T} [t^* m(1/q)]} - 2.777 \right]$$

$$s_{Ell} = \left[\frac{1}{20.3163} \frac{k_y^{0.5} L_w^{0.28}}{k_x^{0.14} h_z} \left(\frac{t_a(P)_{Ell}}{\phi} \right)^{0.36} \right] \left[\frac{m(1/q)_{Ell}}{[t^* m(1/q)]_{Ell}} - 2.777 \right] \quad (2.2.17)$$

En donde $[t^* m(1/q)]_{Ell}$ es la derivada del pseudo-recíproco del caudal del flujo elíptico, leído a $t_a(P)_{Ell}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.2.1.4. Flujo Pseudorradial o Radial Tardío (pseudorradial (pr)).

Las ecuaciones dimensionales gobernantes correspondientes al Recíproco del caudal y a la Derivada del recíproco del caudal para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$(1/q_D)_{pr} = \frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \left[\ln \left(\frac{16k_x r_w^2}{k_y L_w^2} t_{Dpr} \right) + 0.80907 \right] + \frac{k_y}{\sqrt{k_x k_z}} (s_m + s_z) \quad (2.1.18)$$

$$[t_D * (1/q_D)]_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (2.1.19)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudo-recíproco del caudal y de la Derivada de pseudo-recíproco del caudal para yacimientos de gas:

$$[m(1/q_D)]_{pr} = \frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \left[\ln \left(\frac{16k_x r_w^2}{k_y L_w^2} t_{Da_{pr}} \right) + 0.80907 \right] + \frac{k_y}{\sqrt{k_x k_z}} (s_m' + s_z) \quad (2.2.18)$$

$$[t_D * m(1/q_D)]_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (2.2.19)$$

Reemplazando la expresión de la derivada del recíproco del caudal adimensional, Ec. (2.2.3), en la Ec. (2.2.19), se obtiene la ecuación resultante para el producto $(k_y k_x)^{0.5}$ en donde $[t^* m(1/q)]_{pr1}$ es la derivada del recíproco del caudal del flujo pseudorradial, leído a $t=1$ hr.

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t^* m(1/q)]_{pr} = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}$$

$$\sqrt{k_y k_x} = \frac{711.26TL_w}{h_z L_w \Delta P [t^* m(1/q)]_{pr}} \quad (2.2.20)$$

Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.18) en la ecuación gobernante de la Derivada del pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.19) se obtiene la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo $(s_m' + s_z)$:

$$\frac{[m(1/q_D)]_{pr}}{[t_D * m(1/q_D)]_{pr}} = \frac{\frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \left[\ln \left(\frac{16k_x r_w^2}{k_y L_w^2} t_{Da} \right) + 0.80907 \right] + \frac{k_y}{\sqrt{k_x k_z}} (s_m' + s_z)}{\frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}} + \frac{\frac{k_y}{\sqrt{k_x k_z}} (s_m' + s_z)}{\frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}}$$

$$(s_m' + s_z) = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \frac{\sqrt{k_x k_z}}{k_y} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \left[\frac{[m(1/q_D)]}{[t_D^* m(1/q_D)]} - \ln \left(\frac{16k_x r_w^2}{k_y L_w^2} t_{Da} \right) - 0.80907 \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.2.6), (2.2.2) y (2.2.3) en la anterior ecuación, se tiene:

$$(s_m' + s_z) = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \frac{\sqrt{k_x k_z}}{k_y} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} m(1/q)}{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t^* m(1/q)]} - \ln \left(\frac{16k_x r_w^2}{k_y L_w^2} \left(\frac{0.0002637 k_y t_a(P)}{\phi r_w^2} \right) \right) - 0.80907 \right]$$

$$(s_m' + s_z) = \frac{1}{2} \frac{L_w}{h_z} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\frac{m(1/q)_{pr}}{[t^* m(1/q)]_{pr}} - \ln \left(\frac{k_x t_a(P)_{pr}}{L_w^2 \phi} \right) + 4.659 \right] \quad (2.2.21)$$

En donde $[t^* m(1/q)]_{pr}$ es la derivada del pseudo-recíproco del caudal del flujo pseudorradial, leído a $t_a(P)_{pr}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.2.1.5. Flujo Lineal Tardío (Late Linear (II)).

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes al Recíproco del caudal y a la Derivada del recíproco del caudal para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$(1/q_D)_{II} = \frac{236}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{II}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m) \quad (2.1.25)$$

$$[t_D^* (1/q_D)]_{II} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{D_{II}}} \quad (2.1.22)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudo-recíproco del caudal y de la Derivada de pseudo-recíproco del caudal para yacimientos de gas:

$$[m(1/q_D)]_{II} = \frac{236}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{Da_{II}}} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m') \quad (2.2.22)$$

$$[t_D^* m(1/q_D)]_{II} = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{Da_{II}}} \quad (2.2.23)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.6) y (2.2.3) en la Ec. (2.2.23), se obtiene la ecuación resultante para el producto k_y y h_x :

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t^* m(1/q)] = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\left(\frac{0.0002637 \pi k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P)}$$

$$\frac{k_y}{k_y^{0.5}} h_x = \left(\frac{48.3137 T L_w r_w}{h_z L_w \Delta P [t^* m(1/q)]} \right) \sqrt{\left(\frac{t_a(P)}{\phi r_w^2} \right)}$$

Despejando k_y y h_x :

$$h_x = \left(\frac{48.3137 T}{h_z \Delta P [t^* m(1/q)]_{II}} \right) \sqrt{\left(\frac{t_a(P)_{II}}{k_y \phi} \right)} \quad (2.2.24)$$

$$k_y = \frac{t_a(P)_{II}}{\phi} \left(\frac{48.3137 T}{h_x h_z \Delta P [t^* m(1/q)]_{II}} \right)^2 \quad (2.2.25)$$

Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.22) en la ecuación gobernante de la Derivada del pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.23) se obtiene la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m' + s_z + s_x$):

$$\frac{[m(1/q_D)]}{[t_D^* m(1/q_D)]} = \frac{236}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{Da}} + \frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m')}{\frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\pi t_{Da}}}$$

$$(s_x + s_z + s_m') = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \sqrt{\pi t_{Da}} \left[\frac{[m(1/q_D)]}{[t_D^* m(1/q_D)]} - 2 \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.2.6), (2.2.2) y (2.2.3) en la anterior ecuación, se tiene:

$$(s_x + s_z + s_m') = \frac{118}{100} \left(\frac{L_w r_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \sqrt{\left(\frac{0.0002637 \pi k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P)} \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} m(1/q)}{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t^* m(1/q)]} - 2 \right]$$

$$(s_x + s_z + s_m) = \frac{1}{29.4434} \left(\frac{L_w}{h_x h_z} \right) \sqrt{\left(\frac{k_z t_a(P)_{ll}}{\phi} \right)} \left[\frac{m(1/q)_{ll}}{[t^* m(1/q)]_{ll}} - 2 \right] \quad (2.2.26)$$

En donde $[t^* m(1/q)]_{ll}$ es la derivada del pseudo-recíproco del caudal del flujo lineal tardío, leído a $t_a(P)_{ll}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.2.1.6. Flujo Hemilineal (Hemilinear (hl)).

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes al Recíproco del caudal y a la Derivada del recíproco del caudal para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$(1/q_D)_{hl} = \frac{764\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{hl}) \quad (2.1.30)$$

$$[t_D^* (1/q_D)]_{hl} = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{hl}} \right]^{0.5} \quad (2.1.27)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudo-recíproco del caudal y de la Derivada de pseudo-recíproco del caudal para yacimientos de gas:

$$[m(1/q_D)]_{hl} = \frac{764\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{ahl}} \right]^{0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{hl}) \quad (2.2.27)$$

$$[t_D^* m(1/q_D)]_{hl} = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{D_{ahl}} \right]^{0.5} \quad (2.2.28)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.6) y (2.2.3) en la Ec. (2.2.28), se obtienen ecuaciones para determinar k_y y h_x :

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t^* m(1/q)] = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 \left(\frac{0.0002637k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P) \right]^{0.5}$$

$$\frac{k_y}{k_y^{0.5}} h_x = \frac{156.4054TL_w}{h_z L_w \Delta P [t^* m(1/q)]} \sqrt{\frac{t_a(P)}{\phi}}$$

Despejando k_y y h_x :

$$k_y = \frac{t_a(P)_{hl}}{\phi} \left[\frac{156.4054T}{h_x h_z \Delta P [t^* m(1/q)]_{hl}} \right]^2 \quad (2.2.29)$$

$$h_x = \frac{156.4054T}{h_z \Delta P [t^* m(1/q)]_{hl}} \sqrt{\frac{t_a(P)_{hl}}{k_y \phi}} \quad (2.2.30)$$

Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.27) en la ecuación gobernante de la Derivada del pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.28) se obtiene la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m' + s_z + s_x + s_{hl}$):

$$\frac{[m(1/q_D)]}{[t_D^* m(1/q_D)]} = \frac{\frac{764\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{Da} \right]^{-0.5}}{\frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{Da} \right]^{-0.5}} + \frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m' + s_{hl})}{\frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \left[\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 t_{Da} \right]^{-0.5}}$$

$$(s_x + s_z + s_m' + s_{hl}) = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \sqrt{\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 \frac{k_z}{k_y} t_{Da}} \left[\frac{[m(1/q_D)]}{[t_D^* m(1/q_D)]} - 2 \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.2.6), (2.2.2) y (2.2.3) en la anterior ecuación, se tiene:

$$(s_x + s_z + s_m' + s_{hl}) = \frac{382\sqrt{\pi}L_w}{100h_z} \sqrt{\left(\frac{r_w}{h_x} \right)^2 \frac{k_z}{k_y} \left(\frac{0.0002637k_y}{\phi r_w^2} \right) t_a(P)} \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} m(1/q)}{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t^* m(1/q)]} - 2 \right]$$

$$(s_x + s_z + s_m' + s_{hl}) = \frac{L_w}{9.0951h_z h_x} \sqrt{\left(\frac{k_z t_a(P)_{hl}}{\phi} \right)} \left[\frac{m(1/q)_{hl}}{[t^* m(1/q)]_{hl}} - 2 \right] \quad (2.2.31)$$

En donde $[t^* m(1/q)]_{hl}$ es la derivada del pseudo-recíproco del caudal del flujo hemilineal, leído a $t_a(P)_{hl}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.2.1.7. Flujo Parabólico (Parabolic (PB)).

Las ecuaciones adimensionales gobernantes correspondientes al Recíproco del caudal y a la Derivada del recíproco del caudal para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite son:

$$(1/q_D) = -9.6466 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m + s_{PB}) \quad (2.1.34)$$

$$[t_D * (1/q_D)]_{PB} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{D_{PB}})^{-0.5} \quad (2.1.32)$$

Rescribiendo las anteriores ecuaciones obtenemos las ecuaciones adimensionales gobernantes de Pseudo-recíproco del caudal y de la Derivada de pseudo-recíproco del caudal para yacimientos de gas:

$$[m(1/q_D)]_{PB} = -9.6466 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{Da_{PB}})^{-0.5} + \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m' + s_{PB}) \quad (2.2.32)$$

$$[t_D * m(1/q_D)]_{PB} = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{Da_{PB}})^{-0.5} \quad (2.2.33)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.6) y (2.2.3) en la Ec. (2.2.33), se obtiene la ecuación resultante para determinar b_y .

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t * m(1/q)] = 4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \sqrt{\frac{\phi r_w^2}{0.0002637 k_y t_a(P)}}$$

Despejando b_y .

$$b_y = \left[\frac{1}{422520.3114} \frac{\Delta P k_y^{1.5} L_w^{0.38} h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{0.25}}{T} [t * m(1/q)]_{PB} \left(\frac{t_a(P)_{PB}}{\phi} \right)^{0.5} \right]^{1/2.3} \quad (2.2.34)$$

Se procede a obtener la sumatoria de los daños ocurridos dentro del pozo ($s_x + s_z + s_m + s_{PB}$) como sigue:

Dividiendo la ecuación gobernante de Pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.32) en la ecuación gobernante de la Derivada del pseudo-recíproco del caudal adimensional (2.2.33) se obtiene la ecuación para determinar la sumatoria de los daños ocurridos en el pozo ($s_m' + s_z + s_x + s_{PB}$):

$$\frac{[m(1/q_D)]}{[t_D^* m(1/q_D)]'} = \frac{-9.6466 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{Da_{PB}})^{-0.5}}{4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{Da_{PB}})^{-0.5}} + \frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_z}} (s_x + s_z + s_m' + s_{PB})}{4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{Da_{PB}})^{-0.5}}$$

$$(s_x + s_z + s_m' + s_{PB}) = \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} (t_{Da_{PB}})^{-0.5} \right] \left[\frac{[m(1/q_D)]}{[t_D^* m(1/q_D)]'} + 2 \right]$$

Finalmente, reemplazando los valores adimensionales (1.2.6), (2.2.2) y (2.2.3) en la anterior ecuación, se tiene:

$$(s_x + s_z + s_m' + s_{PB}) = \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[4.8233 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \sqrt{\frac{\phi r_w^2}{0.0002637 k_y t_a(P)}} \right] \left[\frac{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52 T} m(1/q)}{\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52 T} [t^* m(1/q)]'} + 2 \right]$$

$$(s_x + s_z + s_m' + s_{PB}) = \left[297.0224 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{k_y h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}} \sqrt{\frac{k_z \phi}{t_a(P)_{PB}}} \right] \left[\frac{m(1/q)_{PB}}{[t^* m(1/q)]'_{PB}} + 2 \right] \quad (2.2.35)$$

En donde $[t^* m(1/q)]'_{PB}$ es la derivada del pseudo-recíproco del caudal del flujo parabólico leído a $t_a(P)_{PB}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.2.1.8. Flujo Estable (Steady State (ss)).

1. Pozo cerca de la frontera abierta y la frontera lejana abierta.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada del recíproco del caudal para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite:

$$[t_D^* (1/q_D)]'_{ss1} = 2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} t_{DA_{ss1}}^{-1} \quad (2.1.38)$$

Rescribiendo la anterior ecuación se obtiene la ecuación adimensional gobernante de la Derivada de pseudo-recíproco del caudal para yacimientos de gas:

$$[t_D^* m(1/q_D)]_{ss1} = 2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} t_{DaA_{ss1}}^{-1} \quad (2.2.36)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.8) y (2.2.3) en la Ec. (2.2.36), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t^* m(1/q)] = 2417844.769 \frac{L_w^{0.05}}{h_z^{1.2}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} \left[\left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi h_x h_y} \right) t_a(P) \right]^{-1}$$

Despejando h_y .

$$h_y^{1.7} = 2417844.769 \frac{1422.52 T L_w^{0.05} b_y^{2.7} \phi h_x}{k_y L_w \Delta P h_z^{1.2} [t^* (1/q)] (0.0002637) k_y t} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01}$$

$$h_y = \left[1.3043 \times 10^{13} \frac{\phi T b_y^{2.7} h_x^{1.01}}{k_y^2 L_w^{0.95} \Delta P h_z^{1.2} r_w^{0.01} [t^* m(1/q)]_{ss1} t_a(P)_{ss1}} \right]^{1/1.7} \quad (2.2.37)$$

En donde $[t^* m(1/q)]_{ss1}$ es la derivada del pseudo-recíproco del caudal del primer caso de flujo estable, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{ss1}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2. Pozo cerca de la frontera abierta y la frontera lejana cerrada.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada del recíproco del caudal para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite:

$$[t_D^* (1/q_D)]_{ss2} = 915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{DA_{ss2}}^{-1} \quad (2.1.40)$$

Rescribiendo la anterior ecuación se obtiene la ecuación adimensional gobernante de la Derivada de pseudo-recíproco del caudal para yacimientos de gas:

$$[t_D^* m(1/q_D)]_{ss2} = 915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} t_{DA_{ss2}}^{-1} \quad (2.2.38)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.8) y (2.2.3) en la Ec. (2.2.38), se obtiene la ecuación resultante para determinar A.

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t^* m(1/q)'] = 915637.772 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}{h_z^{0.96} h_y^{2.8}} \left[\left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi A} \right) t_a(P) \right]^{-1}$$

Despejando A.

$$A = \frac{1}{4.93937445 \times 10^{12}} \frac{k_y^2 L_w^{0.9} \Delta P}{T} \frac{h_z^{0.96} h_y^{2.8}}{b_y^{2.92}} [t^* m(1/q)']_{ss2} \left[\frac{t_a(P)_{ss2}}{\phi} \right] \quad (2.2.39)$$

En donde $[t^* m(1/q)']_{ss2}$ es la derivada del pseudo-recíproco del caudal del segundo caso de flujo estable, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{ss2}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

3. Pozo cerca de la frontera cerrada y la frontera lejana abierta.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada del recíproco del caudal para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite:

$$[t_D^* (1/q_D)']_{ss3} = \frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{Da_{ss3}}^{-1} \quad (2.1.44)$$

Rescribiendo la anterior ecuación se obtiene la ecuación adimensional gobernante de la Derivada de pseudo-recíproco del caudal para yacimientos de gas:

$$[t_D^* m(1/q_D)']_{ss3} = \frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} t_{Da_{ss3}}^{-1} \quad (2.2.40)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.8) y (2.2.3) en la Ec. (2.2.40), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t^* m(1/q)'] = \frac{1}{817.45774} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}{h_z^{0.86} h_x} \left[\left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi h_y h_x} \right) t_a(P) \right]^{-1}$$

Despejando h_y .

$$h_y = \left[\frac{1}{6599.07313} \frac{k_y^2 L_w^{0.15} \Delta P h_z^{0.86} t_a(P)_{ss3}}{T \phi} [t^* m(1/q)']_{ss3} \right]^{1/2.7} \quad (2.2.41)$$

En donde $[t^*m(l/q)]_{ss3}$ es la derivada del pseudo-recíproco del caudal del tercer caso de flujo estable, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{ss3}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

4. Pozo centrado con una frontera abierta.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada del recíproco del caudal para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite:

$$[t_D^* (1/q_D)]_{ss4} = \frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss4}^{-1} \quad (2.1.48)$$

Rescribiendo la anterior ecuación se obtiene la ecuación adimensional gobernante de la Derivada de pseudo-recíproco del caudal para yacimientos de gas:

$$[t_D^* m(1/q_D)]_{ss4} = \frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DaA})_{ss4}^{-1} \quad (2.2.42)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.8) y (2.2.3) en la Ec. (2.2.42), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t^* m(1/q)] = \frac{1}{1076} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} \left[\left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi h_x h_y} \right) t_a(P) \right]^{-1}$$

Despejando h_y .

$$h_y = \left[\frac{1}{5013.44183} \frac{k_y^2 L_w^{0.15} \Delta P h_z^{0.75}}{h_x^{0.2}} [t^* m(1/q)]_{ss4} \left(\frac{t_a(P)_{ss4}}{\phi T} \right) \right]^{0.4} \quad (2.2.43)$$

En donde $[t^*m(l/q)]_{ss4}$ es la derivada del recíproco del caudal del cuarto caso de flujo estable, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{ss4}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

5. Pozo centrado con ambas fronteras abiertas.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada del recíproco del caudal para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite:

$$[t_D * (1/q_D)]_{ss5} = \frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DA})_{ss5}^{-1} \quad (2.1.52)$$

Rescribiendo la anterior ecuación se obtiene la ecuación adimensional gobernante de la Derivada de pseudo-recíproco del caudal para yacimientos de gas:

$$[t_D * m(1/q_D)]_{ss5} = \frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} (t_{DaA})_{ss5}^{-1} \quad (2.2.44)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.8) y (2.2.3) en la Ec. (2.2.44), se obtiene la ecuación resultante para determinar h_y .

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t * m(1/q)] = \frac{1}{6200.5952} \frac{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}{h_z^{0.75} h_x^{0.8}} \left[\left(\frac{0.0002637k_y}{\phi h_x h_y} \right) t_a(P) \right]^{-1}$$

Despejando h_y .

$$h_y = \left[\frac{1}{869.9912} \frac{k_y^2 L_w^{0.15} \Delta P h_z^{0.75}}{h_x^{0.2}} [t * m(1/q)]_{ss5} \left(\frac{t_a(P)_{ss5}}{\phi T} \right) \right]^{0.4} \quad (2.2.45)$$

En donde $[t * m(1/q)]_{ss5}$ es la derivada del pseudo-recíproco del caudal del quinto caso de flujo estable, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{ss5}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.2.1.9. Flujo Pseudoestable (Pseudosteady State (pss)).

6. Ambas fronteras cerradas pozo centrado o descentrado.

La ecuación adimensional gobernante correspondiente a la derivada del recíproco del caudal para este flujo, para el caso de yacimientos de aceite:

$$[t_D * (1/q_D)]_{pss} = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DA})_{pss} \quad (2.1.56)$$

Rescribiendo la anterior ecuación se obtiene la ecuación adimensional gobernante de la Derivada de pseudo-recíproco del caudal para yacimientos de gas:

$$[t_D * m(1/q_D)]_{pss} = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) (t_{DaA})_{pss} \quad (2.2.46)$$

Reemplazando las variables adimensionales Ecs. (1.2.8) y (2.2.3) en la Ec. (2.2.46), se obtiene la ecuación resultante para determinar A.

$$\frac{k_y L_w \Delta P}{1422.52T} [t^* m(1/q)] = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{L_w}{h_z} \right) \left(\frac{0.0002637 k_y}{\phi A} \right) t_a(P)$$

Despejando A.

$$A = \frac{55}{10} \pi \left(\frac{1422.52T}{h_z \Delta P [t^* m(1/q)]} \right) \left(\frac{0.0002637 t_a(P)}{\phi} \right)$$

$$A = \frac{1}{6.48158} \left(\frac{T}{h_z \Delta P [t^* m(1/q)]_{pss}} \right) \left(\frac{t_a(P)_{pss}}{\phi} \right) \quad (2.2.47)$$

En donde $[t^* m(1/q)]_{pss}$ es la derivada del pseudo-recíproco del caudal del flujo pseudoestable, leído al pseudotiempo $t_a(P)_{pss}$ siendo este un punto conveniente durante este periodo.

2.2.2. INTERSECCIONES YACIMIENTOS DE GAS (RTA).

Tomando las ecuaciones gobernantes adimensionales de las Derivadas de Pseudo-recíproco del caudal de dos flujos con diferente pendiente e igualándolas, se obtienen las expresiones para hallar parámetros característicos del yacimiento y el pozo por medio del punto de intersección entre dichos flujos.

2.2.2.1. Intersecciones con el Flujo Radial Temprano.

1. Radial Temprano y Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.5) y (2.2.9), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{D_{ier-el}} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{k_y}{k_z} \right) \left(\frac{h_z}{r_w} \right)^2 \quad (2.2.48)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ier-el}$.

$$k_z = 301.7727 \frac{\phi h_z^2}{t_a(P)_{ier-el}} \quad (2.2.49)$$

2. Radial Temprano y Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.5) y (2.2.14), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da_{ier-El}})^{0.36} = \frac{1}{1.91243044} \frac{k_y^{0.36} k_x^{0.14} h_z}{k_z^{0.5} r_w^{0.72} L_w^{0.28}} \quad (2.2.50)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ier-El}$.

$$k_z = \left[10.158152 \frac{k_x^{0.14} h_z}{L_w^{0.28}} \left(\frac{\phi}{t_a(P)_{ier-El}} \right)^{0.36} \right]^2 \quad (2.2.51)$$

3. Radial Temprano y Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.5) y (2.2.23), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{Da_{ier-l}} = \frac{1}{17.4974} \frac{k_y}{k_z} \left(\frac{h_x h_z}{L_w r_w} \right)^2 \quad (2.2.52)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ier-l}$.

$$k_z = 216.7285 \frac{\phi}{t_a(P)_{ier-l}} \left(\frac{h_x h_z}{L_w} \right)^2 \quad (2.2.53)$$

4. Radial Temprano y Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.5) y (2.2.28), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{Da_{ier-hl}} = \frac{1}{183.3735} \frac{k_y}{k_z} \left(\frac{h_x h_z}{r_w L_w} \right)^2 \quad (2.2.54)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable k_z , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ier-hl}$.

$$k_z = 20.6801 \frac{\phi}{t_a(P)_{ier-hl}} \left(\frac{h_x h_z}{L_w} \right)^2 \quad (2.2.55)$$

5. Radial Temprano y Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.5) y (2.2.33), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{Da_{ier-PB}}^{-0.5} = \frac{1}{9.6466} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{1.25}}{L_w^{0.62} b_y^{2.3}} \quad (2.2.56)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable b_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ier-PB}$.

$$b_y = \left[\frac{1}{594.0448} \frac{k_y h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{0.25}}{k_z^{0.5} L_w^{0.62}} \left(\frac{t_a(P)_{ier-PB}}{\phi} \right)^{0.5} \right]^{1/2.3} \quad (2.2.57)$$

6. Radial Temprano y Primer Caso de Estable:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.5) y (2.2.36), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{Da_{ier-ss1}}^{-1} = \frac{1}{4835689.538} \sqrt{\frac{k_y}{k_z}} \frac{h_z^{1.2}}{L_w^{0.05}} \left(\frac{h_y}{b_y} \right)^{2.7} \left(\frac{r_w}{h_x} \right)^{0.01} \quad (2.2.58)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ier-ss1}$.

$$h_y = \left[1.8337844 \times 10^{10} \left(\frac{\phi}{t_a(P)_{ier-ss1}} \right) \frac{k_z^{0.5} h_x^{1.01} L_w^{0.05} b_y^{2.7}}{k_y^{1.5} h_z^{1.2} r_w^{0.01}} \right]^{1/1.7} \quad (2.2.59)$$

7. Radial Temprano y Segundo Caso de Estable:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.5) y (2.2.38), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DaA_{ier-ss2}}^{-1} = \frac{1}{1831275.544} \sqrt{\frac{k_y}{k_z} \frac{h_z^{0.96} h_y^{2.8}}{L_w^{0.1} b_y^{2.92}}} \quad (2.2.60)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ier-ss2}$.

$$A = \frac{1}{6944541312} \left(\frac{t_a(P)_{ier-ss2}}{\phi} \right) \frac{k_y^{1.5} h_z^{0.96} h_y^{2.8}}{k_z^{0.5} L_w^{0.1} b_y^{2.92}} \quad (2.2.61)$$

8. Radial Temprano y Tercer Caso de Estable:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.5) y (2.2.40), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DaA_{ier-ss3}}^{-1} = 408.7288 \sqrt{\frac{k_y}{k_z} \frac{h_z^{0.86} h_x}{L_w^{0.85} h_y^{1.7}}} \quad (2.2.62)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ier-ss3}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{9.278} \frac{k_y^{1.5} h_z^{0.86}}{k_z^{0.5} L_w^{0.85}} \left(\frac{t_a(P)_{ier-ss3}}{\phi r_w} \right) \right]^{1/2.7} \quad (2.2.63)$$

9. Radial Temprano y Cuarto Caso de Estable:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.5) y (2.2.42), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{DaA})_{ier-ss4}^{-1} = 538 \sqrt{\frac{k_y}{k_z} \frac{h_z^{0.75} h_x^{0.8}}{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}} \quad (2.2.64)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ier-ss4}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{7.048676} \frac{k_y^{1.5} h_z^{0.75}}{k_z^{0.5} L_w^{0.85} h_x^{0.2}} \left(\frac{t_a(P)_{ier-ss4}}{\phi} \right) \right]^{1/2.5} \quad (2.2.65)$$

10. Radial Temprano y Quinto Caso de Estable:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.5) y (2.2.44), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{DaA})_{ier-ss5}^{-1} = 3100.2976 \sqrt{\frac{k_y}{k_z} \frac{h_z^{0.75} h_x^{0.8}}{L_w^{0.85} h_y^{1.5}}} \quad (2.2.66)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ier-ss5}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{1.22317} \frac{k_y^{1.5} h_z^{0.75}}{k_z^{0.5} L_w^{0.85} h_x^{0.2}} \left(\frac{t_a(P)_{ier-ss5}}{\phi} \right) \right]^{0.4} \quad (2.2.67)$$

11. Radial Temprano y Pseudoestable:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.5) y (2.2.46), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DaA_{ier-pss}} = \frac{1}{34.5575} \sqrt{\frac{k_y}{k_z} \left(\frac{h_z}{L_w} \right)} \quad (2.2.68)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ier-pss}$.

$$A = \frac{1}{109.7356} \frac{t_a(P)_{ier-pss}}{\phi} \sqrt{k_y k_z} \left(\frac{L_w}{h_z} \right) \quad (2.2.69)$$

2.2.2.2. Intersecciones con el Primer Caso de Flujo Estable.

1. Primer Caso de Estable y Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.36) y (2.2.9), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss1-el}^{1.5} = 1364122.833 \frac{L_w^{0.05} h_x^{1.01} b_y^{2.7}}{h_y^{1.7} h_z^{0.2} r_w^{2.99}} \quad (2.2.70)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss1-el}$.

$$h_y = \left[3.1855783 \times 10^{11} \frac{L_w^{0.05} h_x^{1.01} b_y^{2.7} r_w^{0.01}}{h_z^{0.2}} \left(\frac{\phi}{k_y t_a(P)_{iss1-el}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.7} \quad (2.2.71)$$

2. Primer Caso de Estable y Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.36) y (2.2.14), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss1-El}^{1.36} = 2528557.085 \frac{b_y^{2.7} h_x^{1.01}}{h_y^{1.7} h_z^{0.2} r_w^{2.73} L_w^{0.275}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \quad (2.2.72)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss1-El}$.

$$h_y = \left[1.8315444 \times 10^{11} \frac{b_y^{2.7} h_x^{1.01} k_x^{0.14}}{h_z^{0.2} r_w^{0.01} L_w^{0.275} k_y^{1.5}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{t_{iss1-El}} \right)^{1.36} \right]^{1/1.7} \quad (2.2.73)$$

3. Primer Caso de Estable y Pseudorradial:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.36) y (2.2.19), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{Da_{iss1-pr}} = \frac{4835689.538}{h_z^{0.2} L_w^{0.95}} \left(\frac{b_y}{h_y} \right)^{2.7} \left(\frac{h_x}{r_w} \right)^{0.01} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (2.2.74)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss1-pr}$.

$$h_y = \left[1.83378443 \times 10^{10} \frac{k_x^{0.5} \phi \mu c_t h_x^{1.01} b_y^{2.7}}{h_z^{0.2} L_w^{0.95} k_y^{1.5} r_w^{0.01} t_{iss1-pr}} \right]^{1/1.7} \quad (2.2.75)$$

4. Primer Caso de Estable y Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.36) y (2.2.23), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss1-ll}^{1.5} = 1156036.299 \frac{h_x^{2.01} b_y^{2.7}}{L_w^{0.95} h_z^{0.2} r_w^{3.01} h_y^{1.7}} \quad (2.2.76)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss1-ll}$.

$$h_y = \left[2.69964 \frac{h_x^{2.01} b_y^{2.7}}{L_w^{0.95} h_z^{0.2} r_w^{0.01}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{k_y t_{iss1-ll}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.7} \quad (2.2.77)$$

5. Primer Caso de Estable y Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.36) y (2.2.28), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss1-hl}^{1.5} = 357100.2181 \frac{h_x^{2.01} b_y^{2.7}}{L_w^{0.95} h_z^{0.2} h_y^{1.7} r_w^{3.01}} \quad (2.2.78)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss1-hl}$.

$$h_y = \left[8.3392102 \times 10^{10} \frac{h_x^{2.01} b_y^{2.7}}{L_w^{0.95} h_z^{0.2} r_w^{0.01}} \left(\frac{\phi}{k_y t_a(P)_{iss1-hl}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.7} \quad (2.2.79)$$

6. Primer Caso de Estable y Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.36) y (2.2.33), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss1-PB}^{0.5} = 501284.3425 \frac{b_y^{0.4} h_x^{1.01}}{h_z^{0.58} h_y^{0.65} r_w^{0.76} L_w^{0.57}} \quad (2.2.80)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss1-PB}$.

$$h_y = \left[30869463.01 \frac{b_y^{0.4} h_x^{1.01} r_w^{0.24}}{h_z^{0.58} L_w^{0.57}} \left(\frac{\phi}{k_y t_a(P)_{iss1-PB}} \right)^{0.5} \right]^{1/0.65} \quad (2.2.81)$$

2.2.2.3. Intersecciones con el Segundo Caso de Flujo Estable.

1. Segundo Caso de Estable y Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.38) y (2.2.9), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss2-el}^{1.5} = 516593.2933 \frac{L_w^{0.1} b_y^{2.92} h_z^{1.04} A}{h_y^{2.8} r_w^3} \quad (2.2.82)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss2-el}$.

$$A = \frac{1}{1.206378 \times 10^{11}} \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss2-el}}{\phi} \right)^{1.5} \frac{h_y^{2.8}}{L_w^{0.1} b_y^{2.92} h_z^{1.04}} \quad (2.2.83)$$

2. Segundo Caso de Estable y Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.38) y (2.2.14), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss2-Ell}^{1.36} = 957564.524 \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04} A}{h_y^{2.8} L_w^{0.18} r_w^{2.72}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \quad (2.2.84)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss2-Ell}$.

$$A = \frac{1}{7.0543706 \times 10^{10}} \left(\frac{t_a(P)_{iss2-Ell}}{\phi} \right)^{1.36} \frac{h_y^{2.8} L_w^{0.18} k_y^{1.5}}{b_y^{2.92} h_z^{0.04} k_x^{0.14}} \quad (2.2.85)$$

3. Segundo Caso de Estable y Pseudorradial:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.38) y (2.2.19), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DaA_{iss2-pr}} = 1831275.544 \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04}}{h_y^{2.8} L_w^{0.9}} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (2.2.86)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss2-pr}$.

$$A = \frac{1}{6944541312} \frac{t_a(P)_{iss2-pr}}{\phi} \frac{k_y^{1.5} h_y^{2.8} L_w^{0.9}}{k_x^{0.5} b_y^{2.92} h_z^{0.04}} \quad (2.2.87)$$

4. Segundo Caso de Estable y Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.38) y (2.2.23), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss2-ll}^{1.5} = 437790.9265 \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04} h_x^2}{h_y^{1.8} L_w^{0.9} r_w^3} \quad (2.2.88)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss2-ll}$.

$$h_y = \left[1.0223546 \times 10^{11} \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04} h_x^2}{L_w^{0.9}} \left(\frac{\phi}{k_y t_a (P)_{iss2-hl}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.8} \quad (2.2.89)$$

5. Segundo Caso de Estable y Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.38) y (2.2.28), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss2-hl}^{1.5} = 135233.8464 \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04} h_x^2}{h_y^{1.8} L_w^{0.9} r_w^3} \quad (2.2.90)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss2-hl}$.

$$h_y = \left[3.158058757 \times 10^{10} \frac{b_y^{2.92} h_z^{0.04} h_x^2}{L_w^{0.9}} \left(\frac{\phi}{k_y t_a (P)_{iss2-hl}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.8} \quad (2.2.91)$$

6. Segundo Caso de Estable y Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.38) y (2.2.33), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss2-PB}^{0.5} = 189836.3718 \frac{A b_y^{0.62}}{h_z^{0.34} h_y^{1.75} L_w^{0.52} r_w^{0.75}} \quad (2.2.92)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss2-PB}$.

$$A = \frac{1}{11690265.11} \left(\frac{k_y t_a (P)_{iss2-PB}}{\phi} \right)^{0.5} \frac{h_z^{0.34} h_y^{1.75} L_w^{0.52}}{r_w^{0.25} b_y^{0.62}} \quad (2.2.93)$$

2.2.2.4. Intersecciones con el Tercer Caso de Flujo Estable.

1. Tercer Caso de Estable y Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.40) y (2.2.9), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss3-el}^{1.5} = \frac{1}{1448.906} \frac{L_w^{0.85} h_y^{2.7} h_z^{0.14}}{r_w^3} \quad (2.2.94)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss3-el}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{161.1738553 L_w^{0.85} h_z^{0.14}} \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss3-el}}{\phi} \right)^{1.5} \right]^{1/2.7} \quad (2.2.95)$$

2. Tercer Caso de Estable y Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.40) y (2.2.14), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss3-Ell}^{1.36} = \frac{1}{781.6655} \frac{L_w^{0.57} h_y^{2.7} h_z^{0.14}}{r_w^{2.72}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \quad (2.2.96)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss3-Ell}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{94.24738} \left(\frac{t_a(P)_{iss3-Ell}}{\phi} \right)^{1.36} \frac{k_y^{1.5}}{L_w^{0.57} h_z^{0.14} k_x^{0.14}} \right]^{1/2.7} \quad (2.2.97)$$

3. Tercer Caso de Estable y Pseudorradial:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.40) y (2.2.19), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DaA_{iss3-pr}} = \frac{1}{408.72887} \frac{h_y^{1.7} h_z^{0.14}}{L_w^{0.15} h_x} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (2.2.98)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss3-pr}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{9.278} \frac{k_y^{1.5} t_a(P)_{iss3-pr} L_w^{0.15}}{\phi k_x^{0.5} h_z^{0.14}} \right]^{1/2.7} \quad (2.2.99)$$

4. Tercer Caso de Estable y Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.40) y (2.2.23), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss3-ll}^{1.5} = \frac{1}{1709.7092} \frac{h_y^{2.7} h_z^{1.14} h_x}{r_w^3 L_w^{0.15}} \quad (2.2.100)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss3-ll}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{136.588} \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss3-ll}}{\phi} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.15}}{h_z^{1.14} h_x} \right]^{1/2.7} \quad (2.2.101)$$

5. Tercer Caso de Estable y Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.40) y (2.2.28), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss3-hl}^{1.5} = \frac{1}{5534.821} \frac{h_y^{2.7} h_z^{0.14} h_x}{L_w^{0.15} r_w^3} \quad (2.2.102)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss3-hl}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{42.1921} \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss3-hl}}{\phi} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.14} h_x} \right]^{1/2.7} \quad (2.2.103)$$

6. Tercer Caso de Estable y Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.40) y (2.2.33), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss3-PB}^{0.5} = \frac{1}{169.481} \frac{L_w^{0.23} h_y^{3.75}}{h_z^{0.24} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \quad (2.2.104)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss3-PB}$.

$$h_y = \left[2.752175 \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss3-PB}}{\phi} \right)^{0.5} \frac{h_z^{0.24} b_y^{2.3}}{r_w^{0.25} L_w^{0.23}} \right]^{1/3.75} \quad (2.2.105)$$

2.2.2.5. Intersecciones con el Cuarto Caso de Flujo Estable.

1. Cuarto Caso de Estable y Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.42) y (2.2.9), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss4-el}^{1.5} = \frac{1}{1076\sqrt{\pi}} \frac{L_w^{0.85} h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^3} \quad (2.2.106)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss4-el}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{122.447 L_w^{0.85} h_z^{0.25} h_x^{0.2}} \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss4-el}}{\phi} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (2.2.107)$$

2. Cuarto Caso de Estable y Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.42) y (2.2.14), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss4-Ell}^{1.36} = \frac{1}{1028.8876} \frac{L_w^{0.57} h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^{2.72}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \quad (2.2.108)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss4-Ell}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{71.60153} \left(\frac{t_a(P)_{iss4-Ell}}{\phi} \right)^{1.36} \frac{k_y^{1.5}}{L_w^{0.57} h_z^{0.25} h_x^{0.2} k_x^{0.14}} \right]^{0.4} \quad (2.2.109)$$

3. Cuarto Caso de Estable y Pseudorradial:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.42) y (2.2.19), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DaA_{iss4-pr}} = \frac{1}{538} \frac{h_y^{1.5} h_z^{0.25}}{h_x^{0.8} L_w^{0.15}} \sqrt{k_x} \quad (2.2.110)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss4-pr}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{7.04867675} \frac{k_y^{1.5} t_a(P)_{iss4-pr}}{\phi} \frac{L_w^{0.15}}{h_x^{0.2} h_z^{0.25} k_x^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (2.2.111)$$

4. Cuarto Caso de Estable y Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.42) y (2.2.23), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss4-ll}^{1.5} = \frac{1}{2250.449} \frac{h_y^{2.5} h_x^{1.2} h_z^{0.25}}{L_w^{0.15} r_w^3} \quad (2.2.112)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss4-ll}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{103.7685} \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss4-ll}}{\phi} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.15}}{h_x^{1.2} h_z^{0.25}} \right]^{0.4} \quad (2.2.113)$$

5. Cuarto Caso de Estable y Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.42) y (2.2.28), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss4-hl}^{1.5} = \frac{1}{7285.3525} \frac{h_y^{2.5} h_x^{1.2} h_z^{0.25}}{L_w^{0.15} r_w^3} \quad (2.2.114)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss4-hl}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{32.05414777} \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss4-hl}}{\phi} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.15}}{h_x^{1.2} h_z^{0.25}} \right]^{0.4} \quad (2.2.115)$$

6. Cuarto Caso de Estable y Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.42) y (2.2.33), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss4-PB}^{0.5} = \frac{1}{223.08378} \frac{L_w^{0.23} h_y^{3.55} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \quad (2.2.116)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss4-PB}$.

$$h_y = \left[3.6226 \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss4-PB}}{\phi} \right)^{0.5} \frac{h_z^{0.13} b_y^{2.3}}{r_w^{0.25} L_w^{0.23} h_x^{0.2}} \right]^{1/3.55} \quad (2.2.117)$$

2.2.2.6. Intersecciones con el Quinto Caso de Flujo Estable.

1. Quinto Caso de Estable y Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.44) y (2.2.9), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss5-el}^{1.5} = \frac{1}{10990.26884} \frac{L_w^{0.85} h_y^{2.5} h_x^{0.2} h_z^{0.25}}{r_w^3} \quad (2.2.118)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss5-el}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{21.2484 L_w^{0.85} h_x^{0.2} h_z^{0.25}} \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss5-el}}{\phi} \right)^{1.5} \right]^{0.4} \quad (2.2.119)$$

2. Quinto Caso de Estable y Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.44) y (2.2.14), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss5-Ell}^{1.36} = \frac{1}{5929.1035} \frac{L_w^{0.57} h_y^{2.5} h_z^{0.25} h_x^{0.2}}{r_w^{2.72}} \left(\frac{k_x}{k_y} \right)^{0.14} \quad (2.2.120)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss5-Ell}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{12.425137} \left(\frac{t_a(P)_{iss5-Ell}}{\phi} \right)^{1.36} \frac{k_y^{1.5}}{L_w^{0.57} h_z^{0.25} h_x^{0.2} k_x^{0.14}} \right]^{0.4} \quad (2.2.121)$$

3. Quinto Caso de Estable y Pseudorradial:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.44) y (2.2.19), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DaA_{iss5-pr}} = \frac{1}{3100.2976} \frac{h_z^{0.25} h_y^{1.5}}{L_w^{0.15} h_x^{0.8}} \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \quad (2.2.122)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss5-pr}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{1.22316906} \frac{t_a(P)_{iss5-pr}}{\phi} \frac{L_w^{0.15} k_y^{1.5}}{h_x^{0.2} h_z^{0.25} k_x^{0.5}} \right]^{0.4} \quad (2.2.123)$$

4. Quinto Caso de Estable y Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.44) y (2.2.23), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss5-ll}^{1.5} = \frac{1}{12968.51723} \frac{h_y^{2.5} h_x^{1.2} h_z^{0.25}}{L_w^{0.15} r_w^3} \quad (2.2.124)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss5-ll}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{18} \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss5-ll}}{\phi} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.15}}{h_x^{1.2} h_z^{0.25}} \right]^{0.4} \quad (2.2.125)$$

5. Quinto Caso de Estable y Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.44) y (2.2.28), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss5-hl}^{1.5} = \frac{1}{41982.827} \frac{h_z^{0.25} h_y^{2.5} h_x^{1.2}}{L_w^{0.15} r_w^3} \quad (2.2.126)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss5-hl}$.

$$h_y = \left[\frac{1}{5.5624} \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss5-hl}}{\phi} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.15}}{h_z^{0.25} h_x^{1.2}} \right]^{0.4} \quad (2.2.127)$$

6. Quinto Caso de Estable y Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.44) y (2.2.33), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{iss5-PB}^{0.5} = \frac{1}{29907.33083} \frac{L_w^{0.23} h_y^{3.55} h_x^{0.2}}{h_z^{0.13} r_w^{0.75} b_y^{2.3}} \quad (2.2.128)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable h_y , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{iss5-PB}$.

$$h_y = \left[485.66043 \left(\frac{k_y t_a(P)_{iss5-PB}}{\phi} \right)^{0.5} \frac{h_z^{0.13} b_y^{2.3}}{r_w^{0.25} L_w^{0.23} h_x^{0.2}} \right]^{1/3.55} \quad (2.2.129)$$

2.2.2.7. Intersecciones con el Flujo Pseudoestable.

1. Pseudoestable y Lineal Temprano:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.46) y (2.2.9), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ipss-el}^{0.5} = \frac{1}{9.748496} \frac{A}{L_w r_w} \sqrt{\pi} \quad (2.2.130)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A , pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ipss-el}$.

$$A = \frac{L_w}{11.1965} \left(\frac{k_y t_a(P)_{ipss-el}}{\phi} \right)^{0.5} \quad (2.2.131)$$

2. Pseudoestable y Elíptico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.46) y (2.2.14), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ipss-El}^{0.64} = \frac{1}{18.07} \frac{A}{L_w^{0.72} r_w^{1.28}} \left(\frac{k_y}{k_x} \right)^{0.14} \quad (2.2.132)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ipss-Ell}$.

$$A = \frac{L_w^{0.72} k_y^{0.5} k_x^{0.14}}{10.802676} \left(\frac{t_a(P)_{ipss-Ell}}{\phi} \right)^{0.64} \quad (2.2.133)$$

3. Pseudoestable y Pseudorradial:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.46) y (2.2.19), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$t_{DaA_{ipss-pr}} = \frac{1}{34.5575} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (2.2.134)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ipss-pr}$.

$$A = \frac{1}{109.735} \frac{t_a(P)_{ipss-pr}}{\phi} (k_y k_x)^{0.5} \quad (2.2.135)$$

4. Pseudoestable y Lineal Tardío:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.46) y (2.2.23), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ipss-ll}^{0.5} = \frac{1}{8.26143744} \frac{A}{r_w h_x} \quad (2.2.136)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ipss-ll}$.

$$A = \frac{h_x}{7.454} \left(\frac{k_y t_a(P)_{ipss-ll}}{\phi} \right)^{0.5} \quad (2.2.137)$$

5. Pseudoestable y Hemilineal:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.46) y (2.2.28), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ipss-hl}^{0.5} = \frac{1}{2.551962} \frac{A}{r_w h_x} \quad (2.2.138)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ipss-hl}$.

$$A = \frac{h_x}{24.13074} \left(\frac{k_y t_a(P)_{ipss-hl}}{\phi} \right)^{0.5} \quad (2.2.139)$$

6. Pseudoestable y Parabólico:

Igualando las ecuaciones gobernantes de ambos flujos (2.2.46) y (2.2.33), se obtiene la expresión correspondiente al tiempo de intersección adimensional entre dichos flujos:

$$(t_{Da})_{ipss-PB}^{1.5} = \frac{1}{3.58235} \frac{h_z^{0.38} b_y^{2.3} A}{L_w^{0.38} h_y^{1.05} r_w^{3.25}} \quad (2.2.140)$$

Reemplazando el valor del tiempo adimensional se obtiene la expresión para hallar la variable A, pero está abierta a despejar cualquier otro parámetro que se quiera determinar leído al tiempo de intersección entre los flujos $t_a(P)_{ipss-PB}$.

$$A = \frac{1}{65187.8291} \left(\frac{k_y t_a(P)_{ipss-PB}}{\phi} \right)^{1.5} \frac{L_w^{0.38} h_y^{1.05} r_w^{0.25}}{h_z^{0.38} b_y^{2.3}} \quad (2.2.141)$$

CAPÍTULO III. EJERCICIOS DE APLICACIÓN

ANÁLISIS DE TRASIENTE DE PRESIÓN EN YACIMIENTOS DE ACEITE.

3.1. EJEMPLO SINTÉTICO N° 1.

Se simuló una prueba de presión para un yacimiento de crudo alargado homogéneo isotrópico con un pozo horizontal descentrado cercano a la frontera de presión constante, Ver (**Figura 4**), con los siguientes datos de entrada:

Compresibilidad total, $c_t = 1 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$

Viscosidad, $\mu = 1.2 \text{ cp}$

Factor volumétrico, $B = 1.2 \text{ bbl/STB}$

Espesor de la formación, $h_z = 150 \text{ ft}$

Caudal, $q = 600 \text{ bbl/día}$

Radio del pozo, $r_w = 0.4 \text{ ft}$

Longitud efectiva del pozo, $L_w = 500 \text{ ft}$

Coordenada Sur con respecto al pozo, $S = 20000 \text{ ft}$

Coordenada Este con respecto al pozo, $E = 6000 \text{ ft}$

Coordenada Norte con respecto al pozo, $N = 300000 \text{ ft}$

Coordenada Oeste con respecto al pozo, $W = 6000 \text{ ft}$

Largo del yacimiento, $h_y = 320000 \text{ ft}$

Ancho del yacimiento, $h_x = 12000 \text{ ft}$

Permeabilidad en la dirección x , $k_x = 30 \text{ md}$

Permeabilidad en la dirección y , $k_y = 30 \text{ md}$

Permeabilidad en la dirección z , $k_z = 30 \text{ md}$

Porosidad de la matriz, $\phi = 15 \%$

Área del yacimiento, $A = 3840000000 \text{ ft}^2$

Almacenamiento en el pozo, $C = 0 \text{ bbl/psi}$

Los datos de la prueba de presión sintética se muestran en el (**ANEXO 1**)

Calcular:

- Permeabilidades en la dirección x , y , z (k_x , k_y , k_z)
- Longitud efectiva del pozo, (L_w) y Ancho del yacimiento, (h_x)
- Excentricidad del pozo dentro del yacimiento en el eje y , (b_y) y Área del yacimiento (A).
- Daños.
- Los parámetros (A) y (h_y) con las ecuaciones respectivas de intersecciones entre el segundo caso del flujo estable y los demás flujo presentes.
- Los parámetros (A) y (b_y) con las ecuaciones de los puntos máximo 1 y máximo 2.

Solución:

Paso 1. Generar una curva de ΔP y $t^*\Delta P'$ vs t con los datos de presión (**ANEXO 1**) obtenidos en la prueba. (**Gráfica 9**).

Paso2. Identificar los diferentes regímenes de flujo presentados en la gráfica. Se observan los siguientes regímenes de flujo: flujo radial temprano, flujo elíptico, flujo pseudorradial, flujo lineal tardío, flujo parabólico y segundo caso del estado estable.

Paso 3. Leer de la gráfica (**Gráfica 9**) ΔP y $t^*\Delta P'$ vs t , los diferentes valores de los puntos característicos:

- El delta de presión ΔP_{er} , La derivada de presión $(t^*\Delta P')_{er}$ y el tiempo (t_{er}) del flujo radial temprano.
- El delta de presión ΔP_{Ell} , La derivada de presión $(t^*\Delta P')_{Ell}$ y el tiempo (t_{Ell}) del flujo elíptico.
- El delta de presión ΔP_{pr} , La derivada de presión $(t^*\Delta P')_{pr}$ y el tiempo (t_{pr}) del flujo radial tardío.
- El delta de presión ΔP_{ll} , La derivada de presión $(t^*\Delta P')_{ll}$ y el tiempo (t_{ll}) del flujo lineal tardío.
- El delta de presión ΔP_{PB} , La derivada de presión $(t^*\Delta P')_{PB}$ y el tiempo (t_{PB}) del flujo parabólico.
- El delta de presión ΔP_{ss2} , La derivada de presión $(t^*\Delta P')_{ss2}$ y el tiempo (t_{ss2}) del flujo estable 2.
- El tiempo en el punto de intersección entre los flujos: estable y radial temprano, $(t_{iss2-er})$.
- El tiempo en el punto de intersección entre los flujos: estable y elíptico, $(t_{iss2-Ell})$.
- El tiempo en el punto de intersección entre los flujos: estable y radial tardío, $(t_{iss2-pr})$.
- El tiempo en el punto de intersección entre los flujos: estable y lineal tardío, $(t_{iss2-ll})$.
- El tiempo en el punto de intersección entre los flujos: estable y parabólico, $(t_{iss2-PB})$.
- La derivada $(t^*\Delta P')_{X1}$ y el tiempo (t_{X1}) del Punto máximo.
- La derivada $(t^*\Delta P')_{X2}$ y el tiempo (t_{X2}) del Punto máximo.

Puntos leídos (**Gráfica 9**):

Tabla 3.1.a. Puntos característicos de los regímenes de flujo.

Tiempo (hr)		Delta de presión (psi)		Derivada de presión (psi)	
t_{er}	0.02	$(\Delta P)_{er}$	38.206	$(t^*\Delta P')_{er}$	3.840
t_{Ell}	0.254	$(\Delta P)_{Ell}$	50.131	$(t^*\Delta P')_{Ell}$	6.832
t_{pr}	50.612	$(\Delta P)_{pr}$	111.640	$(t^*\Delta P')_{pr}$	13.473
t_{ll}	1009.817	$(\Delta P)_{ll}$	160.708	$(t^*\Delta P')_{ll}$	26.770
t_{PB}	127128.379	$(\Delta P)_{PB}$	348.812	$(t^*\Delta P')_{PB}$	20.656
t_{ss2}	2014849.025	$(\Delta P)_{ss2}$	386.883	$(t^*\Delta P')_{ss2}$	8.387

Tabla 3.1.b. Tiempo de intersección entre regímenes de flujo.

Tiempo de intersección entre regímenes de flujo. (hr)	
$t_{iss2-er}$	4200000
$t_{iss2-Ell}$	38000
$t_{iss2-pr}$	1133032.871
$t_{iss2-ll}$	71489.541
$t_{iss2-PB}$	4510685.103

Tabla 3.1.c. Puntos Máximos Característicos.

Tiempo (hr)		Derivada de presión (psi)	
t_{X1}	7148.954	$(t^*\Delta P')_{X1}$	50.716
t_{X2}	714895.411	$(t^*\Delta P')_{X2}$	13.110

Paso 4. Calcular las permeabilidades: utilizando las ecuaciones disponibles en los regímenes de flujo presentes en la gráfica. Se debe tener en cuenta que el ejemplo presenta un yacimiento isotrópico ($k_x = k_y = k_z$).

- Flujo Radial temprano, con pendiente de 0 ($m=0$). Se puede obtener $(k_y k_z)^{0.5}$: Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{er} = 1$ hr; $(t^*\Delta P')_{er} = 3.840$ psi

Calcular $(k_y k_z)^{0.5}$:

$$\sqrt{k_y k_z} = \left(\frac{70.6 q \mu B}{L_w (t^* \Delta P')_{er1}} \right) \quad (1.1.11)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.a**) y los datos tomados del ejemplo.

$$\sqrt{k_y k_z} = \left(\frac{70.6(600)(1.2)(1.2)}{(500)(3.840)} \right)$$

$$\sqrt{k_y k_z} = 31.77 \text{ md}$$

• Flujo Elíptico, con pendiente de 0.36 ($m=0.36$). Se puede obtener k_y :
Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{EII} = 0.254$ hr; $(t^* \Delta P')_{EII} = 6.832$ psi

Calcular k_y :

$$k_y = \left[5.5962 \frac{q \mu^{0.64} B}{L_w^{0.72} k_x^{0.14} h_z [t^* \Delta P']_{EII}} \left(\frac{t_{EII}}{\phi c_t} \right)^{0.36} \right]^{1/0.5} \quad (1.1.21)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.a**) y los datos tomados del ejemplo.

$$k_y = \left[5.5962 \frac{(600)(1.2)^{0.64} (1.2)}{(500)^{0.72} (30)^{0.14} (150)(6.832)} \left(\frac{0.254}{(0.15)(10^{-6})} \right)^{0.36} \right]^{1/0.5}$$

$$k_y = 29.831 \text{ md}$$

• Flujo Pseudorradial, con pendiente de 0 ($m=0$). Se puede obtener $(k_x k_y)^{0.5}$:
Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{pr} = 1$ hr; $(t^* \Delta P')_{pr} = 6.832$ psi

Calcular Permeabilidad horizontal, $(k_x k_y)^{0.5}$:

$$\sqrt{k_x k_y} = \frac{70.6 q \mu B}{h_z (t^* \Delta P')_{pr1}} \quad (1.1.25)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.a**) y los datos tomados del ejemplo.

$$\sqrt{k_x k_y} = \left(\frac{(70.6)(600)(1.2)(1.2)}{(150)(13.473)} \right)$$

$$\sqrt{k_x k_y} = 30.182 \text{ md}$$

• Flujo lineal tardío, con pendiente de 0.5 ($m=0.5$). Se puede obtener k_y :
Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{II}=1009.817$ hr; $(t^*\Delta P')_{II}= 26.770$ psi

Calcular k_y :

$$k_y = \left(\frac{4.064qB}{h_z(t^*\Delta P')_{II}} \right)^2 \left(\frac{\mu t_{II}}{h_x^2 \phi c_t} \right) \quad (1.1.30)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.a**) y los datos tomados del ejemplo.

$$k_y = \left(\frac{4.064(600)(1.2)}{(150)(26.770)} \right)^2 \left(\frac{(1.2)(1009.817)}{(12000)^2 (0.15)(10^{-6})} \right)$$

$$k_y = 29.790 \text{ md}$$

Paso 5. Calcular la longitud efectiva del pozo (L_w) y el ancho del yacimiento (h_x):
utilizando las ecuaciones disponibles en los regímenes de flujo presentes en la gráfica.

• Flujo Elíptico, con pendiente de 0.36 ($m=0.36$). Se puede obtener L_w :
Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{Ell} = 0.254$ hr; $(t^*\Delta P')_{Ell}= 6.832$ psi

Calcular longitud efectiva del pozo (L_w):

$$L_w = \left[5.5962 \frac{q\mu^{0.64}B}{k_y^{0.5}k_x^{0.14}h_z[t^*\Delta P']_{Ell}} \left(\frac{t_{Ell}}{\phi c_t} \right)^{0.36} \right]^{1/0.72} \quad (1.1.20)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.a**) y los datos tomados del ejemplo.

$$L_w = \left[5.5962 \frac{(600)(1.2)^{0.64}(1.2)}{(30)^{0.5}(30)^{0.14}(150)(6.832)} \left(\frac{0.254}{(0.15)(10^{-6})} \right)^{0.36} \right]^{1/0.72}$$

$$L_w = 498.047 \text{ ft}$$

Flujo lineal tardío, con pendiente de 0.5 ($m=0.5$). Se puede obtener h_x :

Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{II}=1009.817$ hr; $(t*\Delta P')_{II}= 26.770$ psi

Calcular ancho del yacimiento (h_x):

$$h_x = \frac{4.064qB}{h_z(t*\Delta P')_{II}} \sqrt{\frac{\mu t_{II}}{k_y \phi c_t}} \quad (1.1.29)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.a**) y los datos tomados del ejemplo.

$$h_x = \frac{4.064(600)(1.2)}{(150)(26.770)} \sqrt{\frac{(1.2)(1009.817)}{(30)(0.15)(10^{-6})}}$$

$$h_x = 11957.852 \text{ ft}$$

Paso 6. Calcular la excentricidad del pozo dentro del yacimiento en el eje y, (b_y) y área del yacimiento (A).

- Flujo Parabólico, con pendiente de -0.5 ($m= -0.5$). Se puede obtener b_y :
Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{PB}=127128.379$ hr; $(t*\Delta P')_{PB}= 20.656$ psi

$$b_y = \left[\frac{1}{48403.5189} \frac{k_y^{1.5} L_w^{0.38} h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{0.25}}{q\mu^{1.5} B} (t*\Delta P')_{PB} \left(\frac{t_{PB}}{\phi c_t} \right)^{0.5} \right]^{1/2.3} \quad (1.1.38)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.a**) y los datos tomados del ejemplo.

$$b_y = \left[\frac{1}{48403.5189} \frac{(30)^{1.5} (500)^{0.38} (150)^{0.62} (320000)^{1.05} (0.4)^{0.25} (20.656)}{(600)(1.2)^{1.5} (1.2)} \left(\frac{127128.379}{(0.15)(10^{-6})} \right)^{0.5} \right]^{1/2.3}$$

$$b_y = 19943.051 \text{ ft}$$

- Segundo caso Flujo Estable, con pendiente de -1 ($m= -1$). Se puede obtener A:
Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{ss2}=127128.379$ hr; $(t*\Delta P')_{ss2}= 20.656$ psi

$$A = \frac{1}{1.726458976 \times 10^{11}} \frac{k_y^2 L_w^{0.83}}{\mu^2} \frac{h_z^{0.72} h_y^{2.95}}{b_y^{3.07}} [t*\Delta P']_{ss2} \left(\frac{t_{ss2}}{qB\phi c_t} \right) \quad (1.1.46)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.a**) y los datos tomados del ejemplo.

$$A = \frac{1}{1.726458976 \times 10^{11}} \frac{(30)^2 (500)^{0.83} (150)^{0.72} (320000)^{2.95}}{(1.2)^2 (20000)^{3.07}} (8.387) \left(\frac{2014849.025}{(600)(1.2)(0.15)(10^{-6})} \right)$$

$$A = 3945349290 \text{ ft}^2$$

Paso 7. Calcular los daños.

- Flujo Radial temprano

Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{er} = 0.02$ hr; $\Delta P_{er} = 38.206$ psi; $(t^* \Delta P')_{er} = 3.840$ psi

$$s_m = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta P_{er}}{(t^* \Delta P')_{er}} - \ln \left(\frac{\sqrt{k_y k_z} t_{er}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 7.43 \right] \quad (1.1.12)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.a**) y los datos tomados del ejemplo.

$$s_m = \frac{1}{2} \left[\frac{38.206}{3.840} - \ln \left(\frac{\sqrt{(30)(30)}(0.02)}{(0.15)(1.2)(10^{-6})(0.4)^2} \right) + 7.43 \right]$$

$$s_m = 0.2637$$

- Flujo Elíptico.

Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{Ell} = 0.254$ hr; $\Delta P_{Ell} = 50.131$ psi; $(t^* \Delta P')_{Ell} = 6.832$ psi

$$s_{Ell} = \frac{1}{25.231296} \left[\frac{\Delta P_{Ell}}{[t^* \Delta P']_{Ell}} - 2.77778 \right] \left[\frac{L_w^{0.28} k_y^{0.5}}{h_z k_x^{0.14}} \left(\frac{t_{Ell}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.36} \right] \quad (1.1.22)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.a**) y los datos tomados del ejemplo.

$$s_{Ell} = \frac{1}{25.231296} \left[\frac{50.131}{6.832} - 2.77778 \right] \left[\frac{(500)^{0.28} (30)^{0.5}}{(150)(30)^{0.14}} \left(\frac{0.254}{(0.15)(1.2)(10^{-6})} \right)^{0.36} \right]$$

$$s_{Ell} = 3.8216$$

- Flujo Pseudorradial.

Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{pr} = 50.611$ hr; $\Delta P_{pr} = 11.640$ psi; $(t^* \Delta P')_{pr} = 13.473$ psi

$$s_m + s_z = \frac{L_w}{2h_z} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[\frac{\Delta P_{pr}}{(t^* \Delta P')_{pr}} - \ln \left(\frac{k_x t_{pr}}{\phi \mu c_t L_w^2} \right) + 4.659 \right] \quad (1.1.26)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.a**) y los datos tomados del ejemplo.

$$s_m + s_z = \frac{500}{2(150)} \sqrt{\frac{30}{30}} \left[\frac{111.640}{13.473} - \ln \left(\frac{(30)(50.131)}{(0.15)(1.2)(10^{-6})(500)^2} \right) + 4.659 \right]$$

$$s_m + s_z = 4.1979$$

- Flujo Lineal tardío.

Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{II} = 1009.817$ hr; $\Delta P_{II} = 160.708$ psi; $(t^* \Delta P')_{II} = 26.770$ psi

$$(s_m + s_z + s_x) = \frac{0.029 L_w}{h_x h_z} \sqrt{\frac{k_z t_{II}}{\phi \mu c_t}} \left[\frac{\Delta P_{II}}{(t^* \Delta P')_{II}} - 2 \right] \quad (1.1.31)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.a**) y los datos tomados del ejemplo.

$$(s_m + s_z + s_x) = \frac{0.029(500)}{(12000)(150)} \sqrt{\frac{(30)(1009.817)}{(0.15)(1.2)(10^{-6})}} \left[\frac{160.708}{26.770} - 2 \right]$$

$$(s_m + s_z + s_x) = 13.2300$$

- Flujo Parabólico.

Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{PB} = 127128.379$ hr; $\Delta P_{PB} = 348.812$ psi; $(t^* \Delta P')_{PB} = 20.656$ psi

$$(s_x + s_z + s_m + s_{PB}) = \left[342.777 \frac{L_w^{0.62} b_y^{2.3}}{k_y h_z^{0.62} h_y^{1.05} r_w^{0.25}} \left(\frac{k_z \phi \mu c_t}{t_{PB}} \right)^{0.5} \right] \left[\frac{\Delta P_{PB}}{[t^* \Delta P']_{PB}} + 2 \right] \quad (1.1.40)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.a**) y los datos tomados del ejemplo.

$$(s_x + s_z + s_m + s_{PB}) = \left[342.777 \frac{(500)^{0.62} (20000)^{2.3}}{30(150)^{0.62} (320000)^{1.05} (0.4)^{0.25}} \left(\frac{(30)(0.15)(1.2)(10^{-6})}{127128.379} \right)^{0.5} \right] \left[\frac{348.812}{20.656} + 2 \right]$$

$$(s_x + s_z + s_m + s_{PB}) = 48.2794$$

Paso 8. Calcular los parámetros (A) y (h_y) con las ecuaciones respectivas de intersecciones entre el segundo caso del flujo estable y los demás flujo presentes.

- Intersección entre Segundo caso del flujo Estable y Radial Temprano.

Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{ier-ss2} = 4200000$ hr.

$$A = \frac{1}{2445409329} \frac{h_z^{0.72} h_y^{2.95} k_y^{1.5} t_{ier-ss2}}{L_w^{0.17} b_y^{3.07} \phi \mu c_t k_z^{0.5}} \quad (1.1.77)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.b**) y los datos tomados del ejemplo.

$$A = \frac{1}{2445409329} \frac{(150)^{0.72} (320000)^{2.95} (30)^{1.5} (4200000)}{(500)^{0.17} (20000)^{3.07} (0.15)(1.2)(10^{-6})(30)^{0.5}}$$

$$A = 3987839130 \text{ft}^2$$

• Intersección entre segundo caso del flujo Estable y Elíptico.
Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{iss2-El} = 38000$ hr.

$$A = \frac{1}{30850422960} \frac{L_w^{0.11} h_y^{2.95} k_y^{1.5}}{h_z^{0.28} b_y^{3.07} k_x^{0.14}} \left(\frac{t_{iss2-El}}{\phi \mu c_t} \right)^{1.36} \quad (1.1.100)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.b**) y los datos tomados del ejemplo.

$$A = \frac{1}{30850422960} \frac{(500)^{0.11} (320000)^{2.95} (30)^{1.5}}{(150)^{0.28} (20000)^{3.07} (30)^{0.14}} \left(\frac{38000}{(0.15)(1.2)(10^{-6})} \right)^{1.36}$$

$$A = 4411338310 \text{ft}^2$$

• Intersección entre segundo caso del flujo Estable y Pseudorradial.
Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{iss2-pr} = 1133032.871$ hr.

$$A = \frac{1}{2445409315} \frac{h_y^{2.95} L_w^{0.83} k_y^{1.5} t_{iss2-pr}}{b_y^{3.07} h_z^{0.28} \phi \mu c_t k_x^{0.5}} \quad (1.1.102)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.b**) y los datos tomados del ejemplo.

$$A = \frac{1}{2445409315} \frac{(320000)^{2.95} (500)^{0.83} (30)^{1.5} (1133032.871)}{(20000)^{3.07} (150)^{0.28} (0.15)(1.2)(10^{-6})(30)^{0.5}}$$

$$A = 3585994320 \text{ft}^2$$

• Intersección entre segundo caso del flujo Estable y Lineal Tardío.
Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{iss2-l} = 71489.541$ hr.

$$h_y = \left[42480690310 \frac{h_z^{0.28} b_y^{3.07} h_x^2}{L_w^{0.83}} \left(\frac{\phi \mu c_t}{k_y t_{iss2-ll}} \right)^{1.5} \right]^{1/1.95} \quad (1.1.104)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.b**) y los datos tomados del ejemplo.

$$h_y = \left[42480690310 \frac{(150)^{0.28} (20000)^{3.07} (12000)^2}{(500)^{0.83}} \left(\frac{(0.15)(1.2)(10^{-6})}{(30)(71489.541)} \right)^{1.5} \right]^{1/1.95}$$

$$h_y = 324067.699 \text{ ft}$$

- Intersección entre segundo caso del flujo Estable y Parabólico.

Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{iss2-PB} = 4510685.103$ hr.

$$A = \frac{1}{3567056.779} \frac{h_z^{0.1} h_y^{1.9} L_w^{0.45}}{b_y^{0.77} r_w^{0.25}} \left(\frac{k_y t_{iss2-PB}}{\phi \mu c_t} \right)^{0.5} \quad (1.1.108)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.b**) y los datos tomados del ejemplo.

$$A = \frac{1}{3567056.779} \frac{(150)^{0.1} (320000)^{1.9} (500)^{0.45}}{(20000)^{0.77} (0.4)^{0.25}} \left(\frac{(30)(4510685.103)}{(0.15)(1.2)(10^{-6})} \right)^{0.5}$$

$$A = 3675852696 \text{ ft}^2$$

Paso 9. Calcular los parámetros (A) y (b_y) con las ecuaciones disponibles de los puntos máximo 1 y máximo 2.

- Máximo 1.

Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{X1} = 7148.954$ hr.

$$b_y = \left[\frac{1}{1.2693567} \frac{r_w^{0.5}}{h_y^{0.9}} \left(\frac{L_w}{h_z} \right)^{0.11} \frac{k_y t_{X1}}{\phi \mu c_t} \right]^{1/1.6} \quad (1.1.41)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.c**) y los datos tomados del ejemplo.

$$b_y = \left[\frac{1}{1.2693567} \frac{(0.4)^{0.5}}{(320000)^{0.9}} \left(\frac{500}{150} \right)^{0.11} \frac{(30)(7148.954)}{(0.15)(1.2)(10^{-6})} \right]^{1/1.6}$$

$$b_y = 19850.070 \text{ ft}$$

- Máximo 1.

Puntos leídos (**Gráfica 9**): $(t*\Delta P')_{X1} = 50.716$ psi.

$$b_y = \left[\frac{1}{25001.12616} \frac{h_z^{0.675} h_y^{1.5} k_y L_w^{0.325} (t * \Delta P')_{X1}}{q \mu B} \right]^{1/1.5} \quad (1.1.42)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.c**) y los datos tomados del ejemplo.

$$b_y = \left[\frac{1}{25001.12616} \frac{(150)^{0.675} (320000)^{1.5} (30)(500)^{0.325} (50.716)}{(600)(1.2)(1.2)} \right]^{1/1.5}$$

$$b_y = 19999.997 \text{ ft}$$

- Máximo 2.

Puntos leídos (**Gráfica 9**): $t_{X2} = 714895.411$ hr.

$$A = \frac{1}{1247935.124} \frac{h_z^{0.05} L_w^{0.5} h_y^{0.55} k_y t_{X2}}{b_y^{0.67} \phi \mu c_i} \quad (1.1.47)$$

Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.c**) y los datos tomados del ejemplo.

$$A = \frac{1}{1247935.124} \frac{(150)^{0.05} (500)^{0.5} (320000)^{0.55} (30)(714895.411)}{(20000)^{0.67} (0.15)(1.2)(10^{-6})}$$

$$A = 3839999844 \text{ ft}^2$$

- Máximo 2.

Puntos leídos (**Gráfica 9**): $(t*\Delta P')_{X2} = 13.110$ psi.

$$b_y = \left[\frac{1}{78839.82484} \frac{h_z^{0.67} h_y^{2.4} k_y L_w^{0.33} (t * \Delta P')_{X2}}{q \mu B} \right]^{1/2.4} \quad (1.1.48)$$

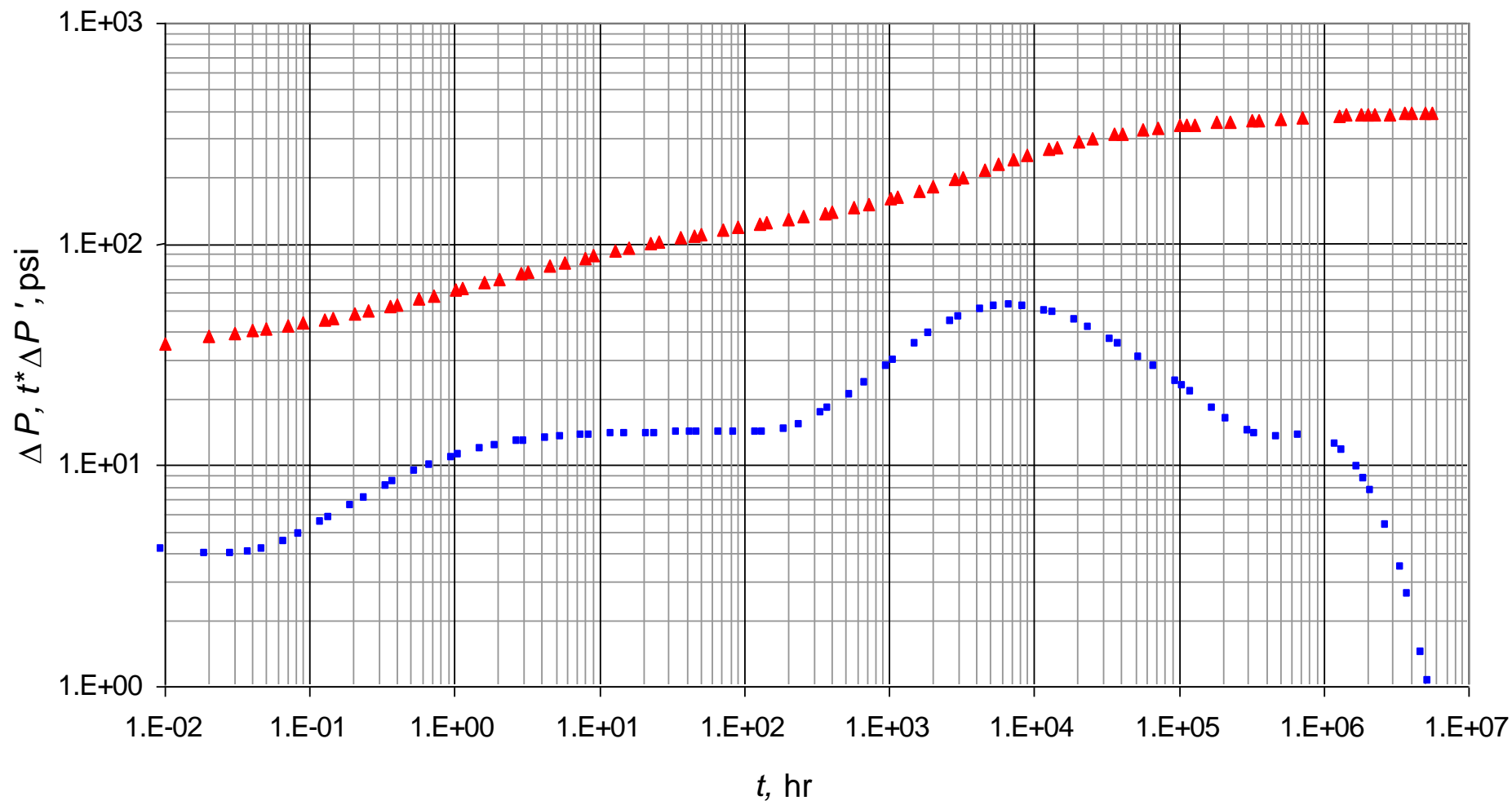
Reemplazando los puntos leídos (**Tabla 3.1.c**) y los datos tomados del ejemplo.

$$b_y = \left[\frac{1}{78839.82484} \frac{(150)^{0.67} (320000)^{2.4} (30)(500)^{0.33} (13.110)}{(600)(1.2)(1.2)} \right]^{1/2.4}$$

$$b_y = 20000 \text{ ft}$$

Tabla 3.1.d. Resumen de los parámetros calculados en el ejercicio sintético 1.

Ecuación	Parámetro Obtenido	Dato de entrada	Valor obtenido Metodología Tiab.	Unidad	Porcentaje de error (%)
(1.1.11)	$(k_z k_y)^{0.5}$	30	31.768	md	5.8947
(1.1.21)	k_y	30	29.831	md	0.5620
(1.1.25)	$(k_x k_y)^{0.5}$	30	30.182	md	0.6075
(1.1.30)	k_y	30	29.790	md	0.7012
(1.1.20)	L_w	500	498.047	Ft	0.3906
(1.1.29)	h_x	12000	11957.852	Ft	0.3512
(1.1.38)	b_y	20000	199943.051	Ft	0.2848
(1.1.46)	A	3840000000	3945349290	ft ²	2.7435
(1.1.12)	s_m		0.2635		
(1.1.22)	s_{EII}		3.8196		
(1.1.26)	$s_m + s_z$		4.1976		
(1.1.31)	$s_m + s_z + s_x$		13.2300		
(1.1.40)	$s_x + s_z + s_m + s_{PB}$		48.2794		
(1.1.77)	A	3840000000	3987839130	ft ²	3.8500
(1.1.100)	A	3840000000	4411338310	ft ²	14.8786
(1.1.102)	A	3840000000	3585994320	ft ²	6.6147
(1.1.104)	h_y	320000	324067.6993	Ft	1.2712
(1.1.108)	A	3840000000	3675852696	ft ²	4.2747
(1.1.41)	b_y	20000	19850.070	Ft	0.7497
(1.1.42)	b_y	20000	19999.997	Ft	0.000015
(1.1.47)	A	3840000000	3839999844	ft ²	0.0000041
(1.1.48)	b_y	20000	20000	Ft	0.000000025



Gráfica 9. Prueba sintética 1, Gráfica t vs $\Delta P, t^* \Delta P'$.

ANÁLISIS DE TRASIENTE DE CAUDAL EN YACIMIENTOS DE ACEITE.

3.2. EJEMPLO SINTÉTICO N° 2.

Se simuló una prueba de caudal para un yacimiento de Crudo alargado homogéneo isotrópico con un pozo horizontal descentrado con una frontera abierta y otra cerrada, el pozo se encuentra cercano a la frontera cerrada, Ver (**Figura 5**), con los siguientes datos de entrada:

Compresibilidad total, $c_t = 3 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$

Viscosidad, $\mu = 1 \text{ cp}$

Factor volumétrico, $B = 1 \text{ bbl/STB}$

Espesor de la formación, $h_z = 100 \text{ ft}$

Diferencia de presión, $\Delta P = 300 \text{ psia}$

Radio del pozo, $r_w = 0.3 \text{ ft}$

Longitud efectiva del pozo, $L_w = 2000 \text{ ft}$

Coordenada Sur con respecto al pozo, $S = 17000 \text{ ft}$

Coordenada Este con respecto al pozo, $E = 10000 \text{ ft}$

Coordenada Norte con respecto al pozo, $N = 250000 \text{ ft}$

Coordenada Oeste con respecto al pozo, $W = 10000 \text{ ft}$

Largo del yacimiento, $h_y = 267000 \text{ ft}$

Ancho del yacimiento, $h_x = 20000 \text{ ft}$

Permeabilidad en la dirección x , $k_x = 50 \text{ md}$

Permeabilidad en la dirección y , $k_y = 50 \text{ md}$

Permeabilidad en la dirección z , $k_z = 50 \text{ md}$

Porosidad de la matriz, $\phi = 10 \%$

Área del yacimiento, $A = 5340000000 \text{ ft}^2$

Almacenamiento en el pozo, $C = 0 \text{ bbl/psi}$

Los datos de la prueba de recíproco de caudal sintética se muestran en el (**ANEXO 2**)

Calcular:

- Permeabilidades en la dirección x , y , z (k_x , k_y , k_z).
- Longitud efectiva del pozo, (L_w) y Ancho del yacimiento, (h_x).
- Largo del yacimiento, (h_y).
- Daños.
- El parámetro (h_y) con las ecuaciones respectivas de intersecciones entre el tercer caso del flujo estable y los demás flujo presentes.
- Los parámetros (A) y (h_y) con las ecuaciones de los puntos máximo 3.

Solución:

Paso 1. Generar una curva de $(1/q)$ y $t^*(1/q)'$ vs t con los datos del recíproco de caudal (ANEXO 2) obtenidos en la prueba. (Gráfica 10).

Paso 2. Identificar los diferentes regímenes de flujo presentados en la gráfica. Se observan los siguientes regímenes de flujo: flujo lineal temprano, flujo elíptico, flujo radial tardío, flujo lineal tardío, flujo hemilineal y tercer caso del estado estable.

Paso 3. Leer de la gráfica (Gráfica 10) $(1/q)$ y $t^*(1/q)'$ vs t , los diferentes valores de los puntos característicos:

- El recíproco de caudal $(1/q)_{el}$, La derivada del recíproco de caudal $[t^*(1/q)']_{el}$ y el tiempo (t_{el}) del flujo lineal temprano.
- El recíproco de caudal $(1/q)_{Ell}$, La derivada del recíproco de caudal $[t^*(1/q)']_{Ell}$ y el tiempo (t_{Ell}) del flujo elíptico.
- El recíproco de caudal $(1/q)_{pr}$, La derivada del recíproco de caudal $[t^*(1/q)']_{pr}$ y el tiempo (t_{pr}) del flujo radial tardío.
- El recíproco de caudal $(1/q)_{ll}$, La derivada del recíproco de caudal $[t^*(1/q)']_{ll}$ y el tiempo (t_{ll}) del flujo lineal tardío.
- El recíproco de caudal $(1/q)_{hl}$, La derivada del recíproco de caudal $[t^*(1/q)']_{hl}$ y el tiempo (t_{hl}) del flujo hemilineal.
- El recíproco de caudal $(1/q)_{ss3}$, La derivada del recíproco de caudal $[t^*(1/q)']_{ss3}$ y el tiempo (t_{ss3}) del flujo Estable.
- El tiempo en el punto de intersección entre los flujos: estable y lineal temprano, $(t_{iss3-el})$.
- El tiempo en el punto de intersección entre los flujos: estable y elíptico, $(t_{iss3-Ell})$.
- El tiempo en el punto de intersección entre los flujos: estable y radial tardío, $(t_{iss3-pr})$.
- El tiempo en el punto de intersección entre los flujos: estable y lineal tardío, $(t_{iss3-ll})$.
- El tiempo en el punto de intersección entre los flujos: estable y hemilineal, $(t_{iss3-hl})$.
- La derivada del recíproco de caudal $[t^*(1/q)']_{X3}$ y el tiempo (t_{X3}) del Punto máximo.

Puntos leídos (**Gráfica 10**):

Tabla 3.2.a. Puntos característicos de los regímenes de flujo.

Tiempo (hr)		Recíproco de caudal (d/STB)		Derivada del recíproco de caudal (d/STB)	
t_{el}	0.04	$(1/q)_{el}$	$(2.636)(10^{-5})$	$[t^*(1/q)]_{el}$	$(4.003)(10^{-6})$
t_{Ell}	2.524	$(1/q)_{Ell}$	$(7.742)(10^{-5})$	$[t^*(1/q)]_{Ell}$	$(2.478)(10^{-5})$
t_{pr}	200.475	$(1/q)_{pr}$	$(2.447)(10^{-4})$	$[t^*(1/q)]_{pr}$	$(4.309)(10^{-5})$
t_{ll}	798.105	$(1/q)_{ll}$	$(3.091)(10^{-4})$	$[t^*(1/q)]_{ll}$	$(5.808)(10^{-5})$
t_{hl}	20047.489	$(1/q)_{hl}$	$(1.304)(10^{-3})$	$[t^*(1/q)]_{hl}$	$(9.048)(10^{-4})$
t_{ss3}	634000	$(1/q)_{ss3}$	$(7.292)(10^{-3})$	$[t^*(1/q)]_{ss3}$	$(1.111)(10^{-3})$

Tabla 3.2.b. Tiempo de intersección entre regímenes de flujo.

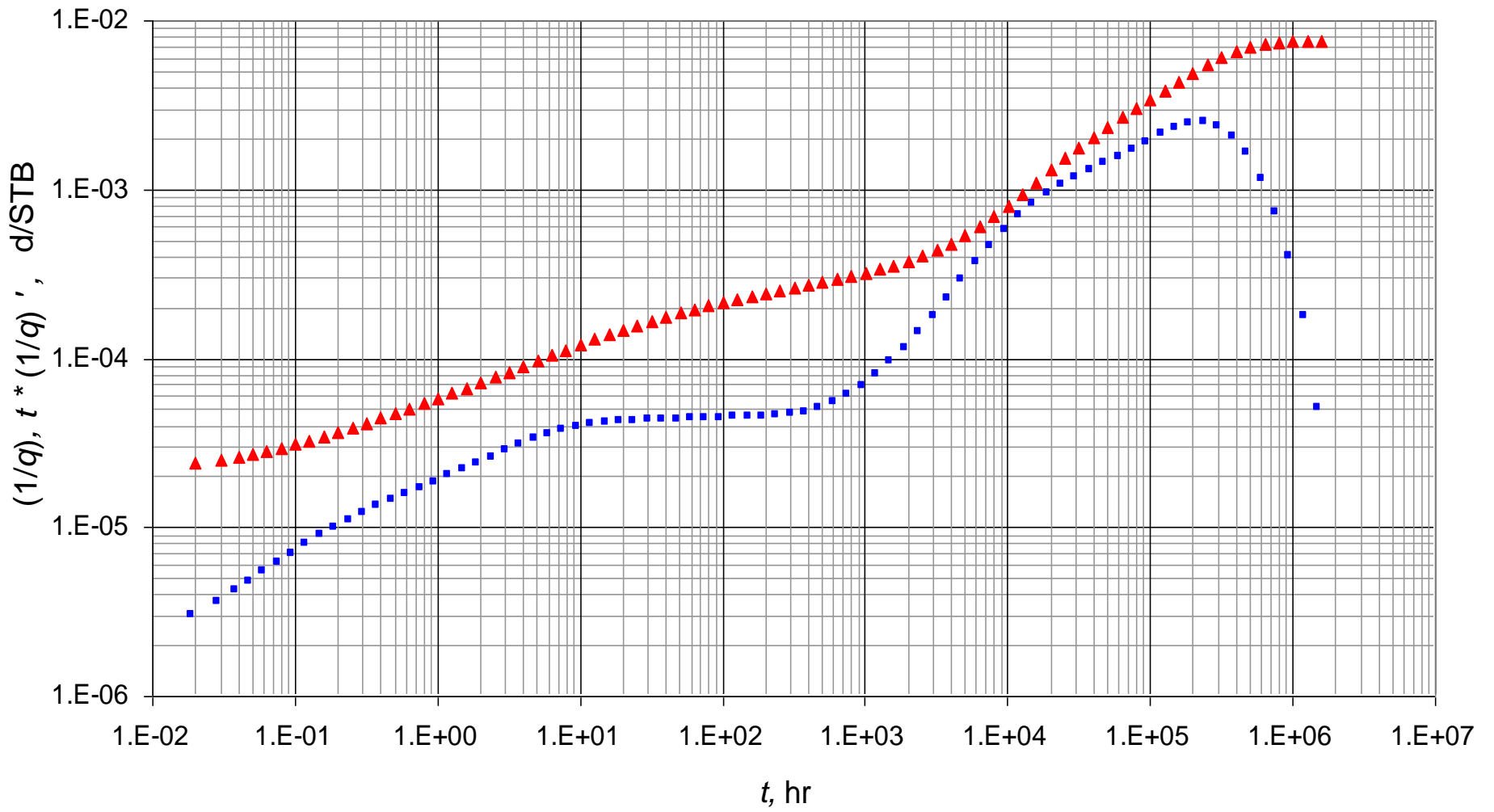
Tiempo de intersección entre regímenes de flujo. (hr)	
$t_{iss3-el}$	120000
$t_{iss3-Ell}$	480000
$t_{iss3-pr}$	19000000
$t_{iss3-ll}$	400000
$t_{iss3-hl}$	250000

Tabla 3.2.c. Puntos Máximos Característicos.

Tiempo (hr)		Derivada de presión (d/STB)	
t_{X3}	252000	$[t^*(1/q)]_{X3}$	$(2.373)(10^{-3})$

Tabla 3.2.d. Resumen de los parámetros calculados en el ejercicio sintético 2.

Ecuación	Parámetro Obtenido	Dato de entrada	Valor obtenido Metodología Tiab.	Unidad	Porcentaje de error (%)
(2.1.11)	k_y	50	53.160	md	6.3196
(2.1.15)	k_y	50	49.903	md	0.1941
(2.1.20)	$(k_x k_y)^{0.5}$	50	54.614	md	9.2275
(2.1.23)	k_y	50	50.379	md	0.7589
(2.1.28)	k_y	50	54.654	md	9.3079
(2.1.10)	L_w	2000	2062.228	ft	3.111
(2.1.14)	L_w	2000	1997.303	ft	0.1349
(2.1.24)	h_x	20000	20075.750	ft	0.3788
(2.1.29)	h_x	20000	20910.080	ft	4.5504
(2.1.45)	h_y	267000	265300.333	ft	0.6366
(2.1.12)	$s_m + s_z$		4.0214		
(2.1.17)	s_{Ell}		1.8203		
(2.1.21)	$s_m + s_z$		13.0719		
(2.1.26)	$s_m + s_z + s_x$		41.158		
(2.1.31)	$s_x + s_z + s_m + s_{hl}$		-112.2969		
(2.1.105)	h_y	267000	285529.328	ft	6.9398
(2.1.107)	h_y	267000	295964.253	ft	10.8480
(2.1.109)	h_y	267000	289957.437	ft	8.5983
(2.1.111)	h_y	267000	237557.390	ft	11.0272
(2.1.113)	h_y	267000	282699.233	ft	5.8799
(2.1.46)	A	5340000000	6141319653	ft ²	15.0060
(2.1.47)	h_y	267000	267665.171	ft	0.2491



Gráfica 10. Prueba sintética 2, Gráfica t vs $(1/q), t^*(1/q)'$.

ANÁLISIS DE TRASIENTE DE PRESIÓN EN YACIMIENTOS DE GAS.

3.3. EJEMPLO SINTÉTICO N° 3.

Se simuló una prueba de presión para un yacimiento de gas alargado homogéneo isotrópico con un pozo horizontal descentrado con una ambas fronteras cerradas, el pozo se encuentra cercano a la frontera de cerrada, Ver (**Figura 8.B**), con los siguientes datos de entrada:

Compresibilidad total, $c_t = 3 \times 10^{-6}$ psi-1
Temperatura, $T = 272$ °F = 671.67 °R
Presión de inicial de yacimiento, $P_i = 5000$ psi
Espesor de la formación, $h_z = 130$ ft
Caudal, $q = 10000$ Mscf/d
Radio del pozo, $r_w = 0.3$ ft
Longitud efectiva del pozo, $L_w = 2000$ ft
Coordenada Sur con respecto al pozo, $S = 20000$ ft
Coordenada Este con respecto al pozo, $E = 6000$ ft
Coordenada Norte con respecto al pozo, $N = 340000$ ft
Coordenada Oeste con respecto al pozo, $W = 6000$ ft
Largo del yacimiento, $h_y = 360000$ ft
Ancho del yacimiento, $h_x = 12000$ ft
Permeabilidad en la dirección x , $k_x = 50$ md
Permeabilidad en la dirección y , $k_y = 50$ md
Permeabilidad en la dirección z , $k_z = 50$ md
Porosidad de la matriz, $\phi = 10$ %
Área del yacimiento, $A = 4320000000$ ft²
Almacenamiento en el pozo, $C = 0$ bbl/psi

Los datos de la prueba de recíproco de caudal sintética se muestran en el (**ANEXO 3**)

Calcular:

- Permeabilidades en la dirección x , y , z (k_x , k_y , k_z)
- Longitud efectiva del pozo, (L_w) y Ancho del yacimiento, (h_x)
- Área del yacimiento (A)
- Daños

Solución:

Paso 1. Generar una curva de $\Delta m(P)$ y $t^* \Delta m(P)$ vs $t_a(P)$ con los datos del recíproco de caudal (**ANEXO 3**) obtenidos en la prueba. (**Gráfica 11**).

Paso 2. Identificar los diferentes regímenes de flujo presentados en la gráfica. Se observan los siguientes regímenes de flujo: flujo radial temprano, flujo lineal temprano, flujo elíptico, flujo radial tardío, flujo lineal tardío, flujo hemilineal y estado pseudoestable.

Paso 3. Leer de la gráfica (**Gráfica 11**) $\Delta m(P)$ y $t^*\Delta m(P)$ vs $t_a(P)$, los diferentes valores de los puntos característicos:

- El delta de pseudopresión $\Delta m(P)_{er}$, La derivada de pseudopresión $[t^*\Delta m(P)]'_{er}$ y el pseudotiempo $t_a(P)_{er}$ del flujo radial temprano.
- El delta de pseudopresión $\Delta m(P)_{el}$, La derivada de pseudopresión $[t^*\Delta m(P)]'_{el}$ y el pseudotiempo $t_a(P)_{el}$ del flujo lineal temprano.
- El delta de pseudopresión $\Delta m(P)_{Ell}$, La derivada de pseudopresión $[t^*\Delta m(P)]'_{Ell}$ y El pseudotiempo $t_a(P)_{Ell}$ del flujo elíptico.
- El delta de pseudopresión $\Delta m(P)_{pr}$, La derivada de pseudopresión $[t^*\Delta m(P)]'_{pr}$ y El pseudotiempo $t_a(P)_{pr}$ del flujo radial tardío.
- El delta de pseudopresión $\Delta m(P)_{ll}$, La derivada de pseudopresión $[t^*\Delta m(P)]'_{ll}$ y El pseudotiempo $t_a(P)_{ll}$ del flujo lineal tardío.
- El delta de pseudopresión $\Delta m(P)_{hl}$, La derivada de pseudopresión $[t^*\Delta m(P)]'_{hl}$ y El pseudotiempo $t_a(P)_{hl}$ del flujo hemilineal.
- El delta de pseudopresión $\Delta m(P)_{pss}$, La derivada de pseudopresión $[t^*\Delta m(P)]'_{pss}$ y El pseudotiempo $t_a(P)_{pss}$ del flujo pseudoestable.
- El pseudotiempo en el punto de intersección entre los flujos: pseudoestable y radial temprano, $t_a(P)_{ipss-er}$.
- El pseudotiempo en el punto de intersección entre los flujos: pseudoestable y lineal temprano, $t_a(P)_{ipss-el}$.
- El pseudotiempo en el punto de intersección entre los flujos: pseudoestable y elíptico, $t_a(P)_{ipss-Ell}$.
- El pseudotiempo en el punto de intersección entre los flujos: pseudoestable y radial tardío, $t_a(P)_{ipss-pr}$.
- El pseudotiempo en el punto de intersección entre los flujos: pseudoestable y lineal tardío, $t_a(P)_{ipss-ll}$.
- El pseudotiempo en el punto de intersección entre los flujos: pseudoestable y hemilineal, $t_a(P)_{ipss-hl}$.

Puntos leídos (**Gráfica 11**):

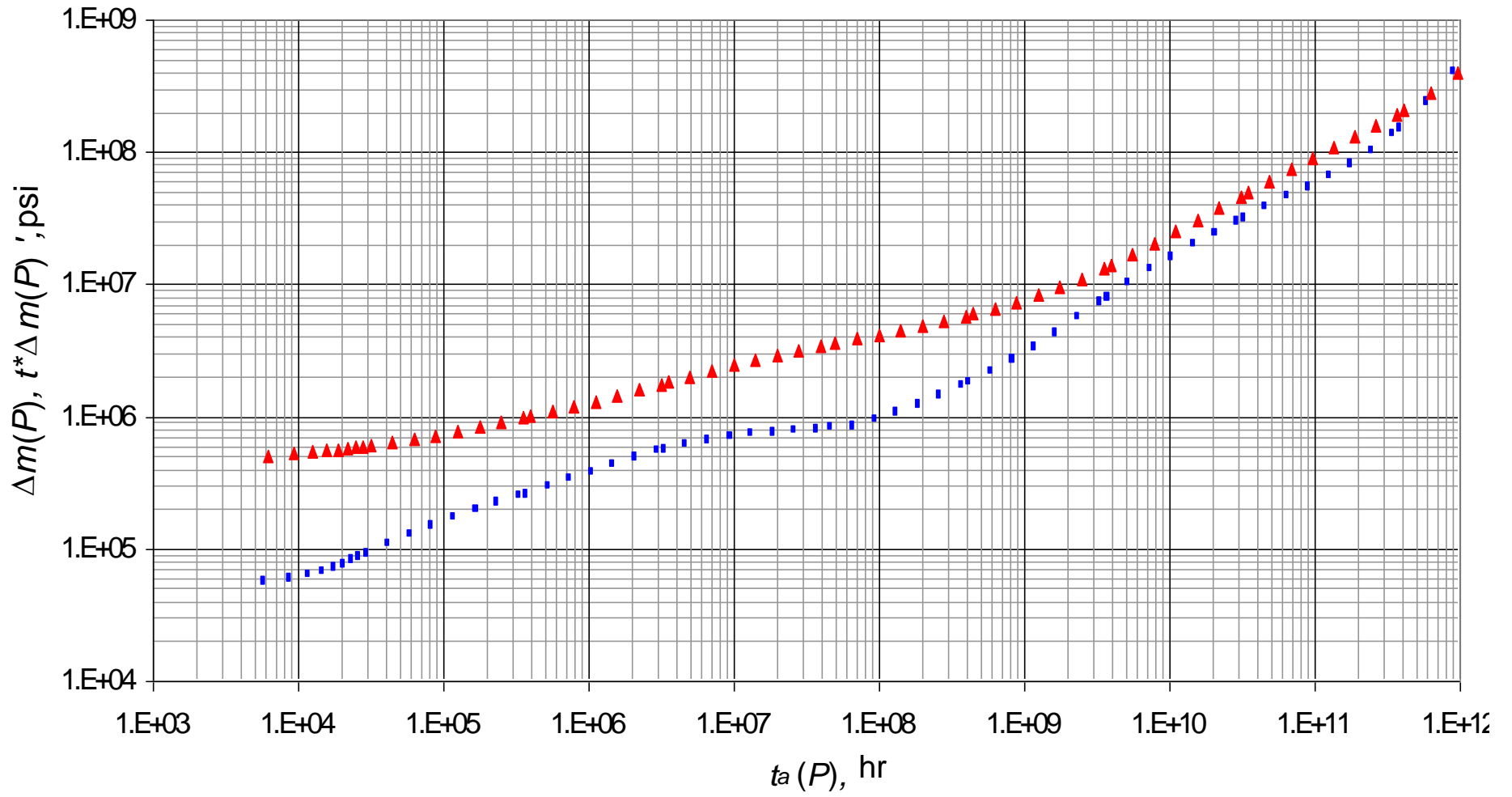
Tabla 3.3.a. Puntos característicos de los regímenes de flujo.

Tiempo (hr)		Delta de presión (psi)		Derivada de presión (psi)	
$t_a(P)_{er}$	6219.139	$\Delta m(P)_{er}$	503602.312	$[t^*\Delta m(P)]'_{er}$	53720.467
$t_a(P)_{el}$	62645.867	$\Delta m(P)_{el}$	676228.298	$[t^*\Delta m(P)]'_{el}$	119864.219
$t_a(P)_{Ell}$	4973580.082	$\Delta m(P)_{Ell}$	2016013.428	$[t^*\Delta m(P)]'_{Ell}$	576003.738
$t_a(P)_{pr}$	19792553.611	$\Delta m(P)_{pr}$	2931301.764	$[t^*\Delta m(P)]'_{pr}$	718063.837

$t_a(P)_{ll}$	442525350.157	$\Delta m(P)_{ll}$	5991643.762	$[t^*\Delta m(P)']_{ll}$	1709092.558
$t_a(P)_{hl}$	48673397043	$\Delta m(P)_{hl}$	60724878.622	$[t^*\Delta m(P)']_{hl}$	35743267.897
$t_a(P)_{pss}$	410600460521	$\Delta m(P)_{pss}$	207459858.77	$[t^*\Delta m(P)']_{pss}$	142549256.956

Tabla 3.3.b. Resumen de los parámetros calculados en el ejercicio sintético 3.

Ecuación	Parámetro Obtenido	Dato de entrada	Valor obtenido Metodología Tiab.	Unidad	Porcentaje de error (%)
(1.2.11)	$(k_z k_y)^{0.5}$	50	44.465	md	11.0708
(1.2.18)	k_y	50	48.772	md	2.4552
(1.2.24)	k_y	50	52.507	md	5.0145
(1.2.28)	$(k_x k_y)^{0.5}$	50	51.177	md	2.3547
(1.2.33)	k_y	50	47.072	md	5.8554
(1.2.37)	k_y	50	47.359	md	5.2821
(1.2.19)	L_w	2000	1975.296	ft	1.2352
(1.2.23)	L_w	2000	2069.124	ft	3.4562
(1.2.32)	h_x	12000	11643.376	ft	2.9719
(1.2.38)	h_x	12000	11678.7756	ft	2.6769
(1.2.55)	A	4320000000	3507644733	ft ²	18.8045
(1.2.15)	s_m'		-0.2767		
(1.2.20)	$s_m' + s_z$		4.5465		
(1.2.25)	s_{EII}		4.4618		
(1.2.29)	$s_m' + s_z$		7.1355		
(1.2.34)	$s_m' + s_z + s_x$		26.3334		
(1.2.39)	$s_x + s_z + s_m' + s_{hl}$		-109.6280		



Gráfica 11. Prueba sintética 3, Gráfica $t_a(P)$ vs $\Delta m(P), t^* \Delta m(P)'$.

CONCLUSIONES

- Se desarrollaron ecuaciones confiables para pozos horizontales en yacimientos de aceite para calcular parámetros característicos del yacimiento como las permeabilidades en las direcciones (x, y, z), la longitud del pozo, el ancho del yacimiento, la excentricidad del pozo con respecto al yacimiento, entre otros, para el caso de análisis de pruebas de presión se generaron ecuaciones de los siguientes flujos: 1) Flujo Hemilineal, 2) Flujo Parabólico, 3) Cinco Casos de Estado Estable, 4) Flujo Estado Pseudoestable. Para el caso de análisis de pruebas de caudal se generaron completamente todas las ecuaciones tales como: 1.) Flujo Radial Temprano, 2) Flujo Lineal Temprano, 3) Flujo Radial Tardío, 4) Flujo Lineal Tardío, 5) Flujo Hemilineal, 6) Flujo Parabólico, 7) Flujo elíptico, 8) Cinco Casos de Estado estable y 9) Estado pseudoestable. Además, para pozos horizontales en yacimientos de gas se formularon las ecuaciones de todos los flujos tanto para pruebas de presión como para pruebas de caudal.
- Se verificaron las ecuaciones desarrolladas mediante su aplicación a pruebas sintéticas (generadas con simuladores). Se encuentra que los resultados obtenidos con las ecuaciones poseían un alto grado de tolerancia con respecto a los valores de entrada y que dichas ecuaciones pueden ser utilizadas en pruebas reales con una desviación poco significativa en los valores obtenidos.

RECOMENDACIONES

- Debe tenerse especial cuidado en la lectura de los puntos característicos empleados para cada correlación, ya que una mala lectura genera resultados erróneos de los parámetros calculados.
- Tener un buen criterio para la identificación de los regímenes de flujo con sus respectivas pendientes.
- Considerar las distintas unidades de las ecuaciones para su aplicación de manera correcta.

NOMENCLATURA

$(1/q)$	Recíproco del caudal, d/STB
$(1/q_D)$	Recíproco del caudal adimensional
A	Área del yacimiento, ft ²
B	Factor de volumen de formación del aceite, rb/STB
b_y	Excentricidad del pozo dentro del yacimiento en el eje y, ft
C	Coefficiente de almacenamiento, bbl/psi
c_t	Compresibilidad total, 1/psi
D	Coefficiente de flujo no-Darcy (non-Darcy flow coefficient)
E	Coordenada Este con respecto al pozo, ft
h_x	Ancho del yacimiento, ft
h_y	Largo del yacimiento, ft
h_z	Espesor de la formación, ft
k	Permeabilidad
k_x	Permeabilidad en la dirección x
k_y	Permeabilidad en la dirección y
k_z	Permeabilidad en la dirección z
L_w	Longitud efectiva del pozo, ft
m	Pendiente
$m(1/q)$	Pseudo-recíproco del caudal
$m(P)$	Pseudopresión, psi
N	Coordenada Norte con respecto al pozo, ft
P	Presión, psi
P_D	Presión adimensional
P_i	Presión inicial del Yacimiento, psi
q	Rata de flujo, STB/d

r_w	Radio del pozo, ft
s	Daño (skin factor)
s_m	Daño mecánico
s_{Ell}	Pseudodaño elíptico (elliptical pseudoskin factor)
s_{hl}	Pseudodaño hemilineal (hemilinear pseudoskin factor)
s_{PB}	Pseudodaño parabólico (parabolic pseudoskin factor)
s_x	Pseudodaño en la dirección x (x-direction pseudoskin factor)
s_z	Pseudodaño en la dirección z (z-direction pseudoskin factor)
S	Coordenada Sur con respecto al pozo, ft
s_m	Daño mecánico
s_m'	Daño mecánico aparente
t	Tiempo, hr
T	Temperatura, (°R, °F)
t_D	Tiempo adimensional
t_{Da}	Pseudotiempo adimensional
t_{DaA}	Pseudotiempo adimensional con respecto al área del yacimiento
t_{Dhy}	Pseudotiempo adimensional con respecto al largo del yacimiento
$t_D^*P_D'$	Derivada de presión adimensional
$t^*\Delta P'$	Derivada de presión, psi
$t_D^*(1/q)_D'$	Derivada del recíproco del caudal adimensional
$t^*(1/q)'$	Derivada del recíproco del caudal, d/STB
$t_D^*m(P)_D'$	Derivada de la pseudopresión adimensional
$t^*\Delta m(P)'$	Derivada de a pseudopresión, d/Mscf
$t_a(P)$	Pseudotiempo, (hr)(psi)/cp
W	Coordenada Oeste con respecto al pozo, ft
W_D	Ancho Adimensional
X_D	Posición adimensional del pozo con respecto a x

Y_D	Posición adimensional del pozo con respecto a y
-------	---

Griego

Δ	Cambio
ϕ	Porosidad
γ	Gravedad específica
μ	Viscosidad del aceite, cp

Sufijos

D	Adimensional
el	Flujo lineal temprano
Ell	Flujo elíptico
er	Flujo radial temprano
$ier-el$	Intersección entre el flujo radial temprano y el flujo lineal temprano
$ier-Ell$	Intersección entre el flujo radial temprano y el flujo elíptico
$ier-hl$	Intersección entre el flujo radial temprano y el flujo hemilineal
$ier-ll$	Intersección entre el flujo radial temprano y el flujo lineal tardío
$ier-PB$	Intersección entre el flujo radial temprano y el flujo parabólico
$ier-pr$	Intersección entre el flujo radial temprano y el flujo pseudorradial
$ier-pss$	Intersección entre el flujo radial temprano y el estado pseudoestable
$ier-ss1$	Intersección entre el flujo radial temprano y el caso 1 estado estable
$ier-ss2$	Intersección entre el flujo radial temprano y el caso 2 estado estable
$ier-ss3$	Intersección entre el flujo radial temprano y el caso 3 estado estable
$ier-ss4$	Intersección entre el flujo radial temprano y el caso 4 estado estable
$ier-ss5$	Intersección entre el flujo radial temprano y el caso 5 estado estable
g	Gas
hl	Flujo hemilineal

<i>ll</i>	Flujo lineal tardío
<i>max</i>	Máximo
<i>min</i>	Mínimo
<i>PB</i>	Flujo parabólico
<i>pr</i>	Flujo pseudorradial
<i>pss</i>	Estado Pseudoestable.
<i>ipss-el</i>	Intersección entre el estado pseudoestable y el flujo lineal temprano
<i>ipss-Ell</i>	Intersección entre el estado pseudoestable y el flujo elíptico
<i>ipss-hl</i>	Intersección entre el estado pseudoestable y el flujo hemilineal
<i>ipss-ll</i>	Intersección entre el estado pseudoestable y el flujo lineal tardío
<i>ipss-pr</i>	Intersección entre el estado pseudoestable y el flujo pseudorradial
<i>ipss-PB</i>	Intersección entre el estado pseudoestable y el flujo parabólico
<i>ss1</i>	Caso 1 Estado Estable
<i>iss1-el</i>	Intersección entre el caso 1 estado estable y el flujo lineal temprano
<i>iss1-Ell</i>	Intersección entre el caso 1 estado estable y el flujo elíptico
<i>iss1-hl</i>	Intersección entre el caso 1 estado estable y el flujo hemilineal
<i>iss1-ll</i>	Intersección entre el caso 1 estado estable y el flujo lineal tardío
<i>iss1-pr</i>	Intersección entre el caso 1 estado estable y el flujo pseudorradial
<i>iss1-PB</i>	Intersección entre el caso 1 estado estable y el flujo parabólico
<i>ss2</i>	Caso 2 Estado Estable
<i>iss2-el</i>	Intersección entre el caso 2 estado estable y el flujo lineal temprano
<i>iss2-Ell</i>	Intersección entre el caso 2 estado estable y el flujo elíptico
<i>iss2-hl</i>	Intersección entre el caso 2 estado estable y el flujo hemilineal
<i>iss2-ll</i>	Intersección entre el caso 2 estado estable y el flujo lineal tardío
<i>iss2-pr</i>	Intersección entre el caso 2 estado estable y el flujo pseudorradial
<i>iss2-PB</i>	Intersección entre el caso 2 estado estable y el flujo parabólico
<i>ss3</i>	Caso 3 Estado Estable

<i>iss3-el</i>	Intersección entre el caso 3 estado estable y el flujo lineal temprano
<i>iss3-Ell</i>	Intersección entre el caso 3 estado estable y el flujo elíptico
<i>iss3-hl</i>	Intersección entre el caso 3 estado estable y el flujo hemilineal
<i>iss3-ll</i>	Intersección entre el caso 3 estado estable y el flujo lineal tardío
<i>iss3-pr</i>	Intersección entre el caso 3 estado estable y el flujo pseudorradial
<i>iss3-PB</i>	Intersección entre el caso 3 estado estable y el flujo parabólico
<i>ss4</i>	Caso 4 Estado Estable
<i>iss4-el</i>	Intersección entre el caso 4 estado estable y el flujo lineal temprano
<i>iss4-Ell</i>	Intersección entre el caso 4 estado estable y el flujo elíptico
<i>iss4-hl</i>	Intersección entre el caso 4 estado estable y el flujo hemilineal
<i>iss4-ll</i>	Intersección entre el caso 4 estado estable y el flujo lineal tardío
<i>iss4-pr</i>	Intersección entre el caso 4 estado estable y el flujo pseudorradial
<i>iss4-PB</i>	Intersección entre el caso 4 estado estable y el flujo parabólico
<i>ss5</i>	Caso 5 Estado Estable
<i>iss5-el</i>	Intersección entre el caso 5 estado estable y el flujo lineal temprano
<i>iss5-Ell</i>	Intersección entre el caso 5 estado estable y el flujo elíptico
<i>iss5-hl</i>	Intersección entre el caso 5 estado estable y el flujo hemilineal
<i>iss5-ll</i>	Intersección entre el caso 5 estado estable y el flujo lineal tardío
<i>iss5-pr</i>	Intersección entre el caso 5 estado estable y el flujo pseudorradial
<i>iss5-PB</i>	Intersección entre el caso 5 estado estable y el flujo parabólico
<i>X1</i>	Máximo 1.
<i>X2</i>	Máximo 2.
<i>X3</i>	Máximo 3.
<i>X4</i>	Máximo 4.
<i>X5</i>	Máximo 5.

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Hussainy, R., Ramey, H. J., & Crawford, P. B. (1966, May 1). The Flow of Real Gases Through Porous Media. *Journal of Petroleum Technology* (May 1996).
- Engler.T, Tiab.D, Analysis Of Pressure And Pressure Derivate Without Type-Curve Matching,5. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol:15, Pág:139-151. 1996.
- Engler.T, Tiab.D, Analysis Of Pressure And Pressure Derivate Without Type-Curve Matching,6. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol:15, Pág:153-168. 1996.
- Engler.T, Interpretation Of Pressure Tests In Naturally Fractured Reservoirs By The Direct Synthesis. Norman, Oklahoma. 1995.
- Escobar, Freddy Humberto. *Análisis Moderno De Pruebas De Presión*. Universidad Surcolombiana, Tercera Edición. 2014.
- Escobar, Freddy Humberto; Muñoz, Oscar Fernando and Sepúlveda, Jairo Antonio. Horizontal Permeability Determination From The Elliptical Flow Regime Of Horizontal Wells. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro - Vol. 2 Núm. 5 Dic.* 2004.
- Escobar, Freddy Humberto; Hernández, Yuly Andrea; Hernández, Claudia Marcela. Pressure Transient Analysis For Long Homogeneous Reservoirs Using TDS Technique. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2007.
- Martinez.J, Escobar.F.H, Bonilla.L.F, Reformulation Of The Elliptical Flow Governing Equation For A More Complete Well Test Data Interpretation In Horizontal Wells, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*,Vol:7, No.3. 2012.

ANEXOS

ANEXO 1: Data de la prueba de presión en yacimiento de aceite usada en el Ejemplo Sintético 1.

Tiempo (<i>t</i>)	ΔP	$t^* \Delta P'$
(hr)	(psia)	(psia)
1.00E-02	35.48675613	4.006548495
2.00E-02	38.20622965	3.840193426
3.00E-02	39.74356588	3.801573538
4.00E-02	40.83925889	3.871920131
5.00E-02	41.71419629	4.007152587
7.00E-02	43.11309709	4.347882918
9.00E-02	44.24737761	4.698095131
1.27E-01	45.96864823	5.294175325
1.43E-01	46.59076002	5.519700084
2.01E-01	48.62326189	6.272214059
2.54E-01	50.13074962	6.832076933
3.58E-01	52.64460536	7.737723362
4.02E-01	53.55342096	8.050274174
5.68E-01	56.49659137	8.989945198
7.15E-01	58.63717033	9.595920474
1.01E+00	62.09994799	10.43462207
1.13E+00	63.31632453	10.68970022
1.60E+00	67.13083136	11.3725658
2.01E+00	69.79508506	11.75433509
2.85E+00	73.94015091	12.22460325
3.19E+00	75.35550314	12.35659244
4.51E+00	79.68300739	12.68307351
5.68E+00	82.62402764	12.85356637
8.02E+00	87.09982465	13.05147167
9.00E+00	88.60567338	13.10457938
1.27E+01	93.15553858	13.23347141
1.60E+01	96.21057982	13.29864296
2.26E+01	100.8174663	13.37269354
2.54E+01	102.3582288	13.3922393
3.58E+01	106.9925849	13.43977654
4.51E+01	110.090027	13.46230235
5.06E+01	111.6404347	13.47334729
7.15E+01	116.3031647	13.49025969
9.00E+01	119.4022104	13.44167385
1.27E+02	124.0445025	13.47175842
1.43E+02	125.598261	13.5325983
2.01E+02	130.337987	14.02820398

2.54E+02	133.6388995	14.72719439
3.58E+02	138.9945736	16.45823636
4.02E+02	140.9308402	17.22534851
5.68E+02	147.3456624	20.09248925
7.15E+02	152.2354446	22.4732324
1.01E+03	160.7082949	26.76994009
1.13E+03	163.8810819	28.39859029
1.60E+03	174.5949136	33.76633962
2.01E+03	182.8077941	37.58362339
2.85E+03	196.7621826	43.10272843
3.19E+03	201.8243528	44.7500836
4.51E+03	218.0161764	48.65777541
5.68E+03	229.4227153	50.17434255
7.15E+03	241.0665697	50.71601648
9.00E+03	252.723829	50.30543619
1.27E+04	269.7826303	48.14134721
1.43E+04	275.2691793	47.08692668
2.01E+04	290.896362	43.22798664
2.54E+04	300.5169097	40.28617558
3.58E+04	313.6382627	35.67658082
4.02E+04	317.6567171	34.14301316
5.68E+04	328.6701065	29.68593925
7.15E+04	335.1795446	26.89644707
1.01E+05	343.787733	23.02706432
1.13E+05	346.3681817	21.82018601
1.27E+05	348.8120165	20.65555153
1.80E+05	355.3739588	17.43900577
2.26E+05	359.1718179	15.63288401
3.19E+05	364.2022901	13.72652294
3.58E+05	365.7571534	13.35560443
5.06E+05	370.2681098	12.9569661
7.15E+05	374.7662238	13.11018848
1.27E+06	382.1341152	11.89190083
1.43E+06	383.468468	11.2014406
1.80E+06	385.8568776	9.421118297
2.01E+06	386.8826349	8.386520069
2.26E+06	387.7879452	7.304978835
2.85E+06	389.2194561	5.167795788
3.58E+06	390.1826422	3.298451328
4.02E+06	390.5140939	2.519993741
5.01E+06	390.9303024	1.375214435

ANEXO 2: Data de la prueba de caudal en yacimiento de aceite usada en el Ejemplo Sintético 2.

Tiempo (<i>t</i>)	1/<i>q</i>	<i>t</i>*(1/<i>q</i>)'
(hr)	1/STBD	1/(STBD)
0	0	0
0.01	2.24E-05	9.92E-06
0.02	2.41E-05	2.89E-06
0.03	2.53E-05	3.46E-06
0.04	2.64E-05	4.00E-06
0.05035702	2.73E-05	4.52E-06
0.06339573	2.84E-05	5.16E-06
0.07981049	2.97E-05	5.88E-06
0.10047546	3.11E-05	6.68E-06
0.12649111	3.27E-05	7.56E-06
0.15924287	3.46E-05	8.50E-06
0.20047489	3.66E-05	9.50E-06
0.25238294	3.89E-05	1.05E-05
0.31773129	4.15E-05	1.16E-05
0.4	4.43E-05	1.27E-05
0.50357017	4.74E-05	1.39E-05
0.63395728	5.07E-05	1.51E-05
0.79810493	5.43E-05	1.63E-05
1.00475457	5.82E-05	1.77E-05
1.26491106	6.24E-05	1.92E-05
1.59242868	6.70E-05	2.09E-05
2.00474894	7.20E-05	2.27E-05
2.52382938	7.74E-05	2.48E-05
3.17731294	8.34E-05	2.70E-05
4	8.98E-05	2.93E-05
5.03570165	9.69E-05	3.16E-05
6.33957277	0.00010444	3.38E-05
7.98104926	0.00011252	3.58E-05
10.0475457	0.00012103	3.74E-05
12.6491106	0.00012989	3.87E-05
15.9242868	0.00013899	3.97E-05
20.0474894	0.00014826	4.04E-05
25.2382938	0.00015765	4.08E-05
31.7731294	0.0001671	4.11E-05
40	0.00017661	4.14E-05
50.3570165	0.00018617	4.16E-05
63.3957277	0.00019578	4.19E-05
79.8104926	0.00020545	4.21E-05
100.475457	0.00021518	4.24E-05
126.491106	0.00022497	4.26E-05

159.242868	0.00023482	4.28E-05
200.474894	0.00024469	4.31E-05
252.382938	0.00025461	4.35E-05
317.731294	0.00026462	4.44E-05
400	0.00027485	4.60E-05
503.570165	0.00028548	4.86E-05
633.957277	0.0002968	5.25E-05
798.104926	0.00030915	5.81E-05
1004.75457	0.00032294	6.58E-05
1264.91106	0.0003387	7.63E-05
1592.42868	0.00035708	9.06E-05
2004.74894	0.00037901	0.00010986
2523.82938	0.00040575	0.0001359
3177.31294	0.00043904	0.00017079
4000	0.00048115	0.00021686
5035.70165	0.00053494	0.00027645
6339.57277	0.00060389	0.00035134
7981.04926	0.00069193	0.00044215
10047.5457	0.00080312	0.00054745
12649.1106	0.00094101	0.00066347
15924.2868	0.00110785	0.00078454
20047.4894	0.00130399	0.00090477
25238.2938	0.00152794	0.00102022
31773.1294	0.00177734	0.00113067
40000	0.00205047	0.00124012
50357.0165	0.00234746	0.00135726
63395.7277	0.00267077	0.00149456
79810.4926	0.0030252	0.00164661
100000	0.00341747	0.00181948
126000	3.855E-03	2.019E-03
159000	4.345E-03	2.201E-03
200000	4.885E-03	2.336E-03
252000	5.461E-03	2.373E-03
318000	6.037E-03	2.246E-03
400000	6.563E-03	1.963E-03
504000	6.990E-03	1.560E-03
634000	7.292E-03	1.110E-03
798000	7.475E-03	6.969E-04
1000000	7.567E-03	3.824E-04
1260000	7.603E-03	1.688E-04
1590000	7.611E-03	4.820E-05

ANEXO 3: Data de la prueba de presión en yacimiento de gas usada en el Ejemplo Sintético 3.

$t_a(P)$ (hr)	$\Delta m(P)$ (psi ² /cp)	$t*\Delta m(P)'$ (psi ² /cp)
6219.13897	503602.3123	53720.4672
9328.45861	524765.331	56193.4178
12437.74816	540747.0609	59745.3462
15547.0139	554139.5521	63656.605
18656.25921	565965.486	68844.1495
21765.48622	576718.9306	72810.3335
24874.69644	586670.6194	77504.7128
27983.89106	595989.6601	82182.1523
31398.28631	605628.041	86197.8674
44350.58908	638012.9373	101624.001
62645.86653	676228.2975	119864.2186
88488.07412	720968.2483	139475.1464
124990.2436	772824.8947	160814.665
176549.4313	832349.7781	183897.8549
249376.3027	900144.6581	210401.6988
352243.1156	976947.8767	238234.13
395219.0654	1004712.468	245438.8633
558242.5102	1095120.65	277674.3962
788507.6801	1197391.308	316090.034
1113747.369	1313396.809	358629.7842
1573130.956	1445219.238	406448.5901
2221979.927	1594702.522	461507.6323
3138427.537	1762911.748	515193.3563
3521290.9	1823163.962	526204.779
4973580.082	2016013.429	576003.7379
7024777.755	2225639.976	624160.0017
9921843.702	2449759.79	662658.803
14013566.95	2685780.114	694019.6255
19792553.61	2931301.764	718063.8371
27954528.59	3183797.361	742176.5506
39482092.83	3440514.508	756268.7066
49700893.88	3614389.145	766836.7653
70195453.92	3882924.275	806658.8122
99140591.5	4169959.103	888517.936
140020206.9	4489888.504	1005321.1
197753815.5	4858664.952	1165833.542
279287638.2	5291358.234	1376981.085
394428857.4	5801743.436	1627573.047
442525350.2	5991643.762	1709092.558
624857623.4	6630529.439	2049238.572

882303407.9	7397801.382	2515735.926
1245792437	8343353.572	3157275.578
1758946253	9543592.153	4050615.869
2483272563	11099941.22	5273400.064
3505449542	13132214.48	6849265.277
3932191267	13937854.12	7425132.668
5549466536	16811764.64	9521429.82
7829648514	20480442.74	12068912.67
11042561080	25095290.79	15080419.17
15568374311	30825012.25	18634819.22
21938195724	37863281.26	23001251.22
30894951655	46433782.44	27922871.26
34521812140	49675448.27	29523278.47
48673397044	60724878.62	35743267.9
68395696467	74020183.19	43027028.26
95944889464	89924798.56	51510036.67
1.34618E+11	108809306.1	61858406.62
1.88417E+11	131278223.9	75734833.92
2.63313E+11	158645888.9	95928087.38
3.66619E+11	193494739.1	127677475.9
4.106E+11	207459858.8	142549257
6.32211E+11	280511056.7	226350507.3
9.62502E+11	394674886.9	379956471.7
1.39755E+12	560962800.3	646594451.7
1.78879E+12	733583878.2	895505031
2.12035E+12	905990063.4	1102888082

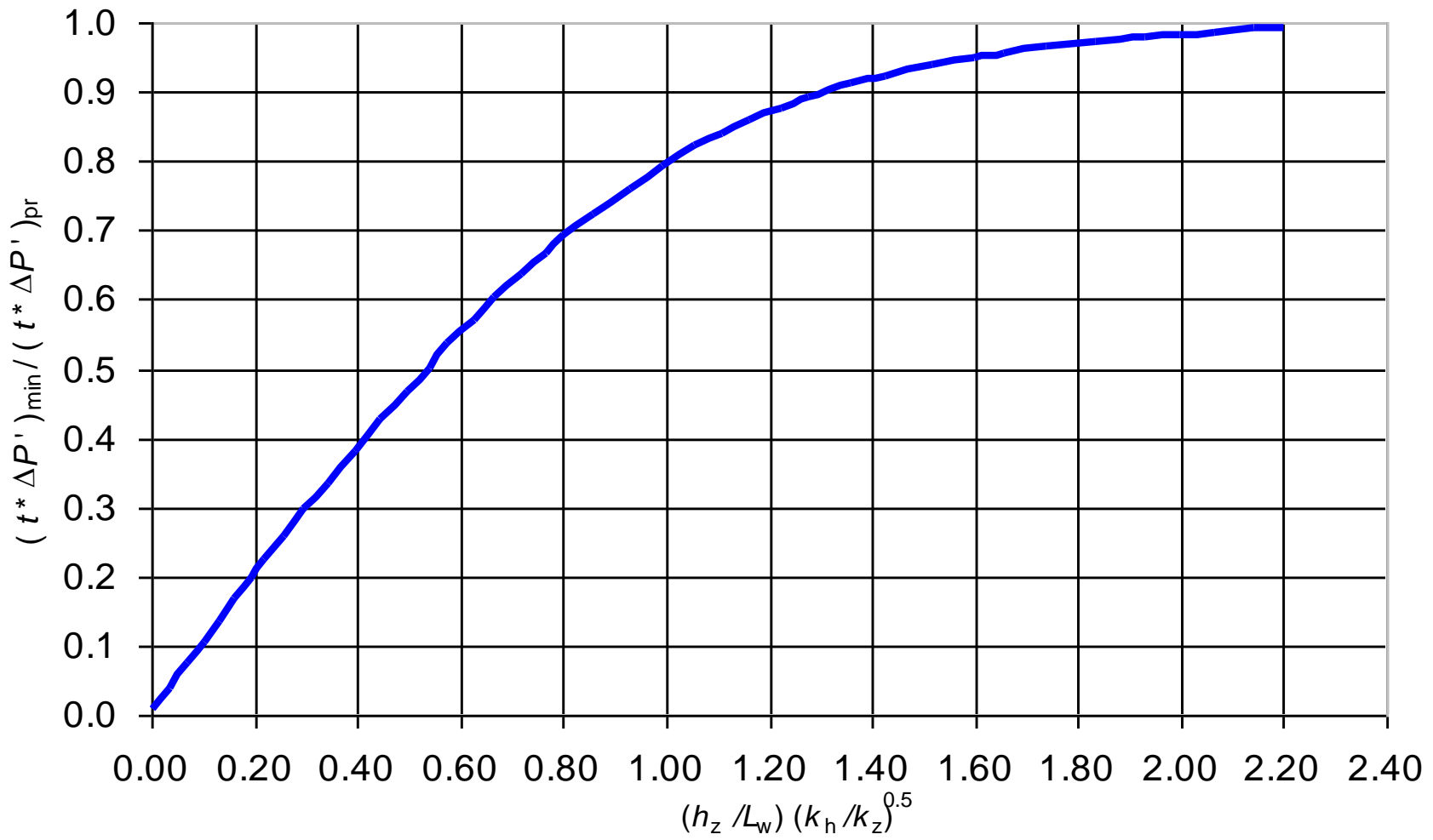
ANEXO 4: Punto mínimo.

Tomado de (Engler 1995). Cuando el flujo lineal temprano es observado en una prueba, la línea característica de pendiente 0.5 provee la posibilidad de determinar k_y o L_w . Sin embargo en ocasiones L_w no es significativamente mayor que el espesor de la formación h_z o la relación de permeabilidad es pequeña, provocando que este flujo no se encuentre presente. Afortunadamente, examinando la curva de derivada de presión en éstos casos se identifica un Punto Mínimo de derivada de presión localizado entre el Flujo Radial Temprano y el Flujo Radial Tardío.

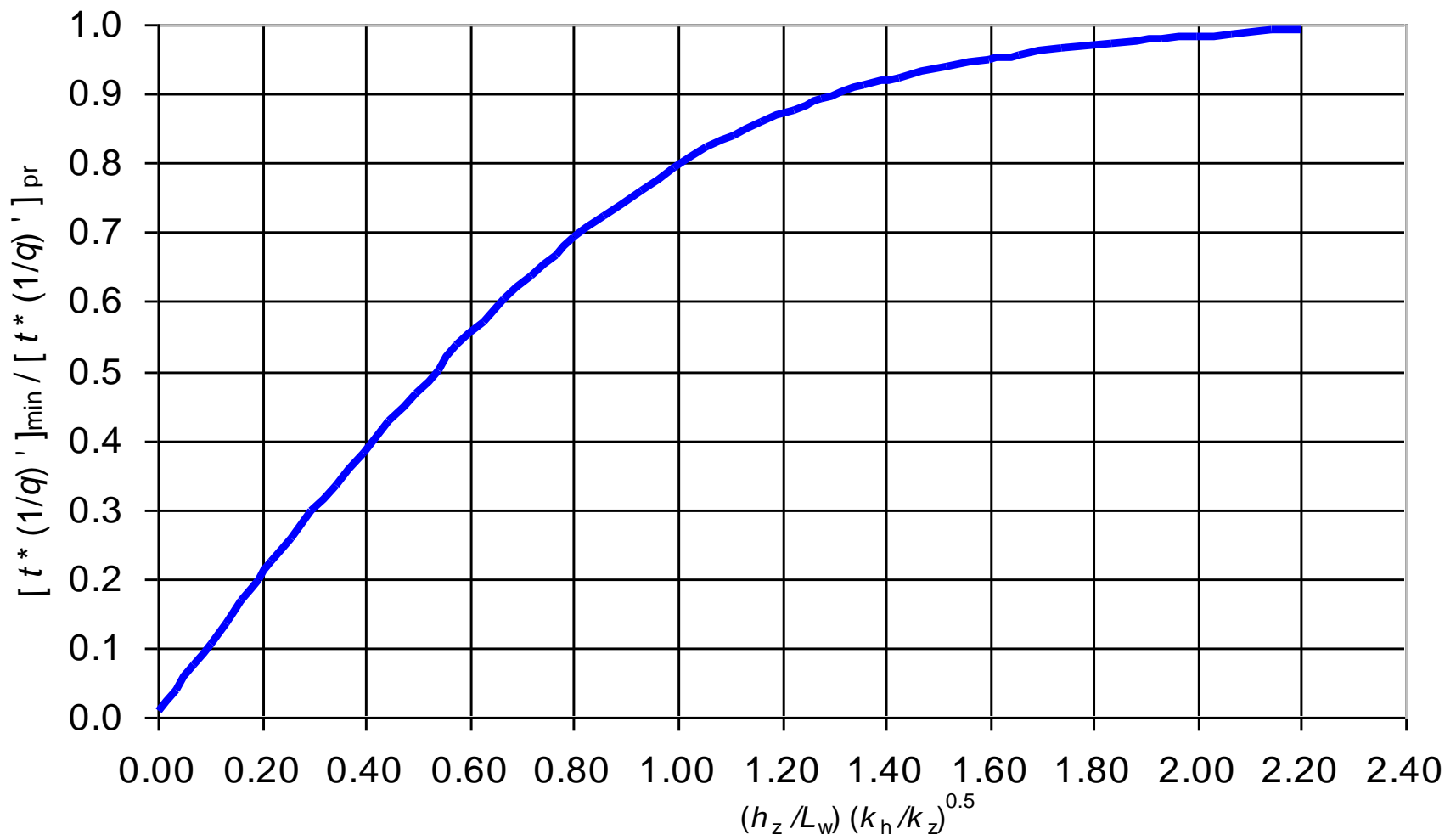
Normalizando este punto de derivada de presión con la línea de derivada de presión del flujo pseudorradial o radial tardío se obtiene una excelente corelación mostrada en la (Gráfica 12). De la relación de derivadas de presión se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{(t^* \Delta P')_{\min}}{(t^* \Delta P')_{pr}} \propto \frac{h_z}{L_w} \sqrt{\frac{k_x k_y}{k_z}}$$

Ésta relación es una útil herramienta para determinar parámetros del reservorio cuando el flujo lineal temprano se encuentra ausente.



Gráfica 12. Correlación del Punto Mínimo de la Derivada de Presión.



Gráfica 13. Correlación del Punto Mínimo de la Derivada del recíproco del caudal

