

36
20/1



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

MÉTODO GRÁFICO PARA OBTENER PERMEABILIDADES
RELATIVAS EN UN SISTEMA AGUA - ACEITE.

Tesis Profesional

Que para obtener el título de

INGENIERO PETROLERO

P r e s e n t a

RAMON TAPIA VARGAS



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

	PAG.
RESUMEN	1
CAPITULO 1 INTRODUCCION	3
CAPITULO 2 PRINCIPIOS BASICOS	6
CAPITULO 3 DESARROLLO TEORICO	34
CAPITULO 4 EJEMPLO DE APLICACION	45
CONCLUSIONES	65
APENDICES	68
NOMENCLATURA	100
REFERENCIAS	103

R E S U M E N

EN ESTE TRABAJO SE PRESENTA UN MÉTODO GRÁFICO PARA CALCULAR PERMEABILIDADES RELATIVAS A CADA UNA DE LAS FASES CONTENIDAS EN UN YACIMIENTO, A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS MEDIANTE PRUEBAS DE DESPLAZAMIENTO NO MISCIBLE, EN RÉGIMEN TRANSITORIO A PRESIÓN CONSTANTE.

EN LOS PRIMEROS CAPÍTULOS SE COMENTAN BREVEMENTE LOS FUNDAMENTOS DEL METODO Y SE DESARROLLAN, CON CIERTO GRADO DE DETALLE, LAS ECUACIONES QUE SE EMPLEAN.

SE ILUSTRÁ, MEDIANTE UN EJEMPLO DE APLICACIÓN PRÁCTICA, PASO A PASO, EL PROCESO DE CÁLCULO, ASÍ COMO LA SECUENCIA DE OPERACIONES NECESARIAS PARA REALIZAR EL DESPLAZAMIENTO.

ASIMISMO, SE PRESENTAN EN FORMA TABULAR Y GRÁFICA, LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE UNA PRUEBA EFECTUADA EN UNA MUESTRA DEL POZO MUSPAC No. 1 Y SE COMPARAN CON LOS OBTENIDOS A PARTIR DE UN PRO

GRAMA MECANIZADO QUE ACTUALMENTE SE UTILIZA EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA DE YACIMIENTOS EN VILLAHERMOSA, TABASCO.

FINALMENTE, EN LOS APÉNDICES SE PRESENTAN DEDUCCIONES MATEMÁTICAS DETALLADAS, QUE INCLUYEN LAS TEORÍAS DE BUCKLEY LEVERETT Y H. J. WELGE.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

PARA LLEVAR A CABO UNA EXPLOTACIÓN EFICAZ DE LOS YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS, ES INDISPENSABLE DISPONER DE LA INFORMACIÓN RELATIVA, TANTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA ROCA COMO LA DE LOS FLUIDOS QUE COMPONEN EL YACIMIENTO. INDUDABLEMENTE, LAS PROPIEDADES FÍSICAS PRINCIPALES QUE DEBEN CONOCERSE SON LA POROSIDAD, LA EFICIENCIA DE DESPLAZAMIENTO, LA SATURACIÓN RESIDUAL DE ACEITE, LA SATURACIÓN IRREDUCTIBLE DE AGUA, LA SATURACIÓN MEDIA EN EL FRENTE DE AVANCE, LA PRESIÓN CAPILAR, LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA, LAS PERMEABILIDADES EFECTIVAS, LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS A CADA UNA DE LAS FASES CONTENIDAS EN EL YACIMIENTO Y LA RELACIÓN DE PERMEABILIDADES RELATIVAS; ESTO ES EN CUANTO A LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA ROCA ALMACENADORA. PARA LOS FLUIDOS ALMACENADOS SON: LA DENSIDAD, LA VISCOSIDAD, LA PRESIÓN DE SATURACIÓN O DE ROCÍO, VOLUMEN RELATIVO, FACTOR DE VOLUMEN DEL ACEITE, RELACIÓN GAS DISUELTO-ACEITE, FACTOR DE VOLUMEN DEL GAS, FACTOR DE COMPRESIBILIDAD, SÓLO POR MENCIONAR ALGUNAS.

CON EL FIN DE DETERMINAR ESTAS PROPIEDADES, SE HAN PUBLICADO UNA GRAN CANTIDAD DE TRABAJOS TÉCNICOS, SIEMPRE TRATANDO DE SIMPLIFICAR SU OBTENCIÓN Y PARA MEJORAR SU PRECISIÓN. ENTRE LOS TRABAJOS DESARROLLADOS PARA LA EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA ROCA, SE TIENEN PRINCIPALMENTE A LOS REGISTROS GEOFÍSICOS Y AL ANÁLISIS MEDIANTE PEQUEÑAS MUESTRAS DE NÚCLEOS RECUPERADOS DURANTE LA PERFORACIÓN; MIENTRAS QUE PARA LAS PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS SE CUENTA ESENCIALMENTE CON LOS ANÁLISIS PVT.

EXISTEN VARIOS MÉTODOS DE LABORATORIO QUE PERMITEN ESTIMAR LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS A CADA UNA DE LAS FASES; TODOS ELLOS TOMAN COMO BASE UN PEQUEÑO NÚCLEO DE LA FORMACIÓN.

ESTA GRAN VARIEDAD DE MÉTODOS SE PUEDEN CLASIFICAR EN DOS GRANDES GRUPOS: MÉTODOS DE RÉGIMEN PERMANENTE Y MÉTODOS DE RÉGIMEN TRANSITORIO O VARIABLE. EL PRIMERO DE ESTOS CONSISTE EN MANTENER CONSTANTE EL RITMO DE INYECCIÓN DE FLUIDOS DENTRO DEL NÚCLEO, LO CUAL IMPLICA QUE LAS SATURACIONES SON UNIFORMES Y CONSTANTES. EN EL SEGUNDO GRUPO, EL RITMO DE INYECCIÓN NO ES FUNCIÓN DEL TIEMPO Y CONSISTE PRINCIPALMENTE EN EFECTUAR PRUEBAS DE DESPLAZAMIENTO A PRESIÓN CONSTANTE Y GASTO VARIABLE Y/O GASTO CONSTANTE Y PRESIÓN VARIABLE.

UNA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS MÁS IMPORTANTE QUE DEBE DETERMI

NARSE ES LA DE LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS DE LA FORMACIÓN A LOS FLUIDOS QUE SE ENCUENTRAN ALMACENADOS EN EL YACIMIENTO.

EN ESTE TRABAJO SE PRESENTA UNA FORMA GRÁFICA RÁPIDA Y SENCILLA DE EVALUAR ESTOS PARÁMETROS. ESTE MÉTODO GRÁFICO SE BASA EN LAS ECUACIONES DESARROLLADAS POR W.O. ROSZELLE & S.C. JONES^{(1)*}. LA INTERPRETACIÓN GRÁFICA TOMA COMO BASE LOS DATOS OBTENIDOS EN UNA PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO EFECTUADA A PRESIÓN CONSTANTE Y GASTO VARIABLE. EL ESTUDIO SE FUNDAMENTA EN LA TEORÍA DE BUCKLEY-LEVERETT⁽²⁾ Y LA MODIFICACIÓN PROPUESTA POR JONHSON⁽³⁾ & WELGE⁽⁴⁾ QUE FUE DESARROLLADA ORIGINALMENTE PARA EL CASO DE ACEITE DESPLAZADO POR AGUA DENTRO DEL YACIMIENTO. SIN EMBARGO, CON CIERTAS CONSIDERACIONES, SE PUEDE APLICAR AL CASO DE DESPLAZAMIENTO DE ACEITE POR GAS.

SE PRESENTA UN EJEMPLO DE APLICACIÓN DONDE LOS DATOS REQUERIDOS SE OBTUVIERON EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA DE YACIMIENTOS, EN VILLAHERMOSA, TABASCO, DONDE SE REALIZÓ UNA PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO EN UNA MUESTRA DE NÚCLEO OBTENIDA DURANTE LA PERFORACIÓN DEL POZO MUSPAC No.1. LA PRUEBA SE FECTUÓ UTILIZANDO UN SISTEMA AGUA-ACEITE Y SE DETERMINARON LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS AL AGUA Y AL ACEITE.

FINALMENTE, LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO GRÁFICO SE COMPARARON CON LOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO TRADICIONAL DE CÁLCULO, OBSERVANDO ENTRE ELLOS UNA MUY BUENA CONCORDANCIA.

* Referencias al final.

CAPITULO 2

PRINCIPIOS BASICOS

EL CONOCIMIENTO DEL FLUJO DE FLUIDOS DENTRO DEL MEDIO POROSO, ES UNA INQUIETUD QUE SE HA MANIFESTADO DURANTE MUCHOS AÑOS A TRAVÉS DE LOS ESTUDIOS QUE SE HAN EFECTUADO CON EL FIN DE CARACTERIZAR LOS YACIMIENTOS. ASIMISMO, EN EL LABORATORIO SE EFECTÚAN CONSTANTEMENTE PRUEBAS DE DESPLAZAMIENTO PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL SISTEMA ROCA-FLUIDOS.

ESTAS PRUEBAS DE DESPLAZAMIENTO SE INICIAN CON UN PEQUEÑO NÚCLEO SATURADO 100% CON LA FASE MOJANTE; POSTERIORMENTE SE USA ACEITE PARA DESPLAZAR EL AGUA HASTA OBTENER UNA SATURACIÓN IRREDUCTIBLE DE AGUA, A CONTINUACIÓN SE INYECTA AGUA, YA SEA A RÉGIMEN VARIABLE O CONSTANTE PARA DETERMINAR LA CAÍDA DE PRESIÓN O EL RITMO DE INYECCIÓN. DE ACUERDO AL RÉGIMEN DE QUE SE TRATE.

DURANTE LA PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO, SE TRATA ESENCIALMENTE DE LOGRAR UN GRADIENTE DE PRESIÓN A LO LARGO DEL NÚCLÉO PARA HACER

FLUIR EL ACEITE. ESTE DESPLAZAMIENTO SE LOGRA INYECTANDO UN FLUIDO (INMISCIBLE) QUE VA A LLENAR EL ESPACIO POROSO QUE VA DEJANDO EL ACEITE AL SER DESPLAZADO. PARA MANTENER ASÍ LA PRESIÓN REQUERIDA PARA CONTINUAR EL MOVIMIENTO DE FLUIDOS DENTRO DEL NÚCLEO.

LOS PRINCIPALES AGENTES DESPLAZANTES QUE SE USAN SON, EL AGUA Y EL ACEITE.

LOS MÉTODOS DE DESPLAZAMIENTO QUE ACTUALMENTE SE UTILIZAN, SE PUEDEN CLASIFICAR EN DOS GRANDES GRUPOS:

- 1) MÉTODO EN RÉGIMEN PERMANENTE.
- 2) MÉTODO EN RÉGIMEN TRANSITORIO O VARIABLE.

A CONTINUACIÓN SE MENCIONARÁ BREVEMENTE EN QUÉ CONSISTE CADA UNO DE ESTOS MÉTODOS, ASÍ COMO LA DEFINICIÓN DE ALGUNOS PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL MÉTODO QUE AQUÍ SE MENCIONA, PARA ESTIMAR LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS A CADA UNA DE LAS FASES PRESENTES EN EL YACIMIENTO.

METODO EN REGIMEN PERMANENTE

ESTE MÉTODO CONSISTE ESENCIALMENTE EN INYECTAR SIMULTÁNEAMENTE LAS FASES MOJANTE (AGUA) Y NO-MOJANTE (ACEITE) EN UN SISTEMA AGUA-ACEITE, Y LA FASE MOJANTE (ACEITE) Y NO-MOJANTE (GAS) EN

UN SISTEMA GAS-ACEITE EN LA CARA ANTERIOR DEL NÚCLEO Y FLUYEN A TRAVÉS DE ÉL HASTA PRODUCIR UN GASTO, EN LA CARA POSTERIOR, IGUAL AL DE INYECCIÓN; EN ESTE INSTANTE, EL SISTEMA DENTRO DEL NÚCLEO SE CONSIDERA BAJO CONDICIONES DE RÉGIMEN PERMANENTE, SIENDO LAS SATURACIONES DE FLUIDOS ESTABLES Y MEDIANTE UN BALANCE VOLUMÉTRICO, SON ESTIMADAS DICHAS SATURACIONES.

ÉL PROCEDIMIENTO SE REPITE PARA OTRO GASTO DE INYECCIÓN Y NUEVAMENTE SE DETERMINAN LAS SATURACIONES DE FLUIDOS Y ASÍ HASTA OBTENER UNA GAMA COMPLETA DE SATURACIONES.

METODO EN REGIMEN TRANSITORIO

EL PRINCIPIO BÁSICO DE ESTE MÉTODO ES INYECTAR UN FLUIDO A UN GASTO VARIABLE, OBTENIENDO UN GRADIENTE DE SATURACIÓN A LO LARGO DEL NÚCLEO, DONDE LA SATURACIÓN MAYOR DEL FLUIDO DESPLAZANTE SE LOCALIZA EN LA CARA DE ENTRADA Y LA MÍNIMA EN LA CARA DE SALIDA DEL NÚCLEO, ES DECIR, QUE SE TIENE UN CAMBIO CONTINUO DE LA RELACIÓN FLUIDO MOJANTE Y NO-MOJANTE PARA CADA PLANO DEL NÚCLEO. EN ESTE CASO, PARA DETERMINAR LA SATURACIÓN EN CADA PUNTO Y EN LA CARA DE SALIDA DEL NÚCLEO, SE UTILIZA EL MÉTODO PROPUESTO POR WELGE,⁽⁴⁾ DERIVADO DE LA ECUACIÓN DE AVANCE FRONTAL DE BUCKLEY-LEVERETT,⁽²⁾ EL CUAL PERMITE DETERMINAR EL VALOR DE LA SATURACIÓN EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA EN FUNCIÓN DE LA SATURACIÓN PROMEDIO DENTRO DEL NÚCLEO.

SATURACION DE FLUIDOS

LAS ROCAS ALMACENADORAS, POR SUS CONDICIONES DE DEPÓSITO, SE CONSIDERAN QUE FUERON TOTALMENTE SATURADAS CON AGUA DE MAR. AL FORMARSE LOS HIDROCARBUROS Y MIGRAR, HACIA ZONAS DE MENOR PRESIÓN, DESPLAZARON DE LOS POROS EL AGUA DE MAR, HASTA UNA Cierta SATURACIÓN DE AGUA CONGÉNITA, ADHERIDA DE LA ROCA, QUEDANDO LOS FLUIDOS EN EQUILIBRIO HIDROSTÁTICO, ES DECIR, LOS HIDROCARBUROS MÁS LIGEROS SE FUERON A LA PARTE SUPERIOR DE LA ESTRUCTURA Y LOS MÁS PESADOS AL FONDO DE LA MISMA. POR ESTA RAZÓN ES QUE EN UN YACIMIENTO GENERALMENTE SE TIENEN PRESENTES LAS TRES FASES AGUA, ACEITE Y GAS, QUE EN FORMA ESQUEMÁTICA SE ILLUSTRAN EN LA FIGURA 2.1.

CON BASE A LO ANTERIOR, LA SATURACIÓN DE FLUIDOS ES UTILIZADA PARA INDICAR LA FRACCIÓN O PORCENTAJE DEL ESPACIO POROSO OCUPADO POR CADA UNO DE LOS FLUIDOS A LAS CONDICIONES DEL YACIMIENTO.

MATEMÁTICAMENTE SUELE EXPRESARSE COMO:

$$S_f = \frac{\text{VOLUMEN DE FLUIDO A C.Y.}}{\text{VOLUMEN DE POROS}} \quad (1)$$

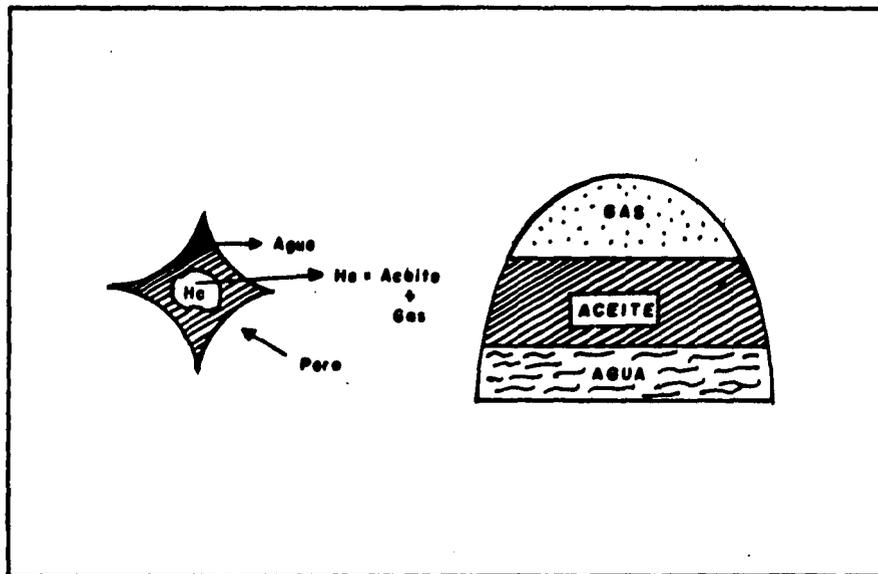


Figura No. 2. 1: DISTRIBUCION DE SATURACION DE FLUIDOS.

Así, PARA CADA UNO DE LOS FLUIDOS ENCONTRADOS EN EL YACIMIENTO,
SE TIENE QUE:

$$S_o = \frac{\text{VOLUMEN DE ACEITE A C. Y.}}{\text{VOLUMEN DE POROS}} \quad (2)$$

$$S_g = \frac{\text{VOLUMEN DE GAS A C. Y.}}{\text{VOLUMEN DE POROS}} \quad (3)$$

$$S_w = \frac{\text{VOLUMEN DE AGUA A C. Y.}}{\text{VOLUMEN DE POROS}} \quad (4)$$

DEBIÉNDOSE CUMPLIR QUE:

$$S_o + S_g + S_w = 1 \quad (5)$$

DE AQUÍ SE DEDUCE QUE:

$$S_{Hc} = 1 - S_w \quad (6)$$

DONDE:

$$S_{Hc} = S_o + S_g \quad (7)$$

SATURACION DE AGUA CONGENITA,

ESTA SATURACIÓN, TAMBIÉN CONOCIDA COMO SATURACIÓN INICIAL DE AGUA, ES LA QUE TIENE EL YACIMIENTO CUANDO SE DESCUBRE.

SATURACION CRITICA DE AGUA .

ES LA SATURACIÓN MÍNIMA REQUERIDA PARA QUE EL AGUA INICIE SU MOVIMIENTO. ESTA SATURACIÓN PUEDE SER MENOR O MAYOR QUE LA SATURACIÓN DE AGUA CONGÉNITA. CUANDO SE INICIA LA EXPLOTACIÓN DE LOS YACIMIENTOS, SI SE PRODUCE AGUA DESDE EL PRINCIPIO, SE DICE QUE $S_{WI} > S_{WC}$; EN CASO DE NO PRODUCIRSE AGUA SE DICE QUE $S_{WI} < S_{WC}$.

SATURACION RESIDUAL DE ACEITE.

SE CONOCE COMO LA SATURACIÓN DE ACEITE POR DEBAJO DE LA CUAL NO PUEDE PRODUCIRSE MÁS ACEITE, ES DECIR, LA SATURACIÓN DE ACEITE QUE YA NO ES SUSCEPTIBLE DE RECUPERARSE.

POROSIDAD.

LA POROSIDAD ES LA CAPACIDAD QUE TIENE UNA ROCA PARA ALMACENAR FLUIDOS Y SE DEFINE COMO LA RELACIÓN ENTRE EL VOLUMEN DE POROS

O ESPACIOS VACÍOS Y EL VOLUMEN TOTAL DE DICHA ROCA. MATEMÁTICAMENTE SE EXPRESA COMO:

$$\emptyset = \frac{\text{VOLUMEN DE POROS}}{\text{VOLUMEN TOTAL}} \quad (8)$$

EL VOLUMEN DE POROS DE UNA ROCA INCLUYE TANTO POROS COMUNICADOS COMO POROS AISLADOS: EN EL CASO DE TOMAR EN CUENTA AMBOS TIPOS DE POROS LA POROSIDAD SE DEFINE COMO POROSIDAD ABSOLUTA, EN CAMBIO, SI ÚNICAMENTE SE CONSIDERA POROS COMUNICADOS SE LLAMA POROSIDAD EFECTIVA.

POR OTRA PARTE, PUEDE CLASIFICARSE EN PRIMARIA O SECUNDARIA, SIENDO LA PRIMERA EL RESULTADO DE LOS PROCESOS NATURALES DE FORMACIÓN DEL MEDIO POROSO Y LA SEGUNDA ES CONSECUENCIA DE PROCESOS POSTERIORES QUE EXPERIMENTA EL MEDIO POROSO, TALES COMO DISOLUCIÓN DE MATERIAL CALCÁREO Y FRACTURAMIENTO.

ES COMÚN EXPRESAR LA POROSIDAD EN FRACCIÓN PARA PROPÓSITOS DE CÁLCULO, EN PORCIENTO.

PERMEABILIDAD

LA PERMEABILIDAD ES UNA MEDIDA DE LA CAPACIDAD QUE TIENE EL MEDIO POROSO PARA PERMITIR EL PASO DE FLUIDOS A TRAVÉS DE ÉL.

DEPENDIENDO DE LAS CONDICIONES DE SATURACION QUE SE TENGAN EN LA MUESTRA, EXISTEN VARIOS CONCEPTOS DE PERMEABILIDAD QUE A CONTINUACION SE MENCIONAN BREVEMENTE.

PERMEABILIDAD ABSOLUTA

LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA DE UN MEDIO POROSO ES LA CAPACIDAD DE PERMITIR EL PASO DE UN FLUIDO CUANDO ÉSTE SE ENCUENTRA SATURADO AL 100% DEL FLUIDO HOMOGÉNEO Y QUE NO REACCIONE CON LA MUESTRA.

LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA ES INDEPENDIENTE DEL FLUIDO QUE SE UTILICE PARA SU DETERMINACIÓN, SIEMPRE Y CUANDO ÉSTE NO REACCIONE O ALTERE EN ALGUNA FORMA LA ESTRUCTURA DEL MEDIO POROSO.

HENRY DARCY⁽²⁾⁽⁶⁾, FUE QUIEN DESARROLLÓ ESTE CONCEPTO EN FORMA EMPÍRICA.

LEY DE DARCY

EN 1856, EL HIDRÓLOGO FRANCÉS HENRY DARCY, OBSERVÓ EN FORMA EXPERIMENTAL, QUE EL FLUJO DE AGUA, A TRAVÉS DE ARENAS, SEGUÍA UNA CIERTA LEY AL COMBINAR CIERTOS PARÁMETROS.⁽⁶⁾

ESTA LEY ESTABLECE QUE EL RITMO DE FLUJO DE UN FLUIDO A TRAVÉS DE UN MEDIO POROSO, ES DIRECTAMENTE PROPORCIONAL AL ÁREA DE SU

SECCIÓN TRANSVERSAL, AL GRADIENTE DE PRESIONES QUE SE TIENE A LO LARGO DE LA MUESTRA E INVERSAMENTE PROPORCIONAL A LA VISCOSIDAD DEL FLUIDO, FUE EN SU HONOR QUE SE LE NOMBRÓ LEY DE DARCY.

EN FORMA MATEMÁTICA PUEDE EXPRESARSE COMO:

$$Q \propto \frac{A}{\mu} \frac{dp}{dL} \quad (9)$$

LA QUE PODEMOS EXPRESAR COMO:

$$Q = \frac{KA}{\mu} \frac{dp}{dL} \quad (10)$$

DONDE:

K: CONSTANTE DE PROPORCIONALIDAD QUE DEPENDE DEL MEDIO POROSO Y SE CONOCE COMO PERMEABILIDAD ABSOLUTA, CUYAS DIMENSIONES SON UNIDADES DE LONGITUD AL CUADRADO, ES DECIR, L^2 ,

PARA LA APLICACIÓN DE ESTA ECUACIÓN, ES FUNDAMENTAL QUE SE CUMPLA LO SIGUIENTE:

- A) QUE EL FLUJO SEA LINEAL, ES DECIR, EN UNA SOLA DIRECCIÓN,
- B) FLUJO LAMINAR, ES DECIR, QUE FLUYA A BAJAS VELOCIDADES,
- C) EL ÁREA EXPUESTA AL FLUJO ES CONSTANTE,

- D) EL FLUIDO QUE SE UTILICE SEA INERTE, HOMOGÉNEO E INCOMPRESIBLE;
- E) MEDIO POROSO HOMOGÉNEO,
- F) PROCESO ISOTÉRMICO, Y
- G) RITMO DE DESPLAZAMIENTO CONSTANTE.

CUANDO LOS EFECTOS GRAVITACIONALES SE TOMAN EN CUENTA, LA ECUACIÓN DE DARCY SE EXPRESA COMO: ⁽²⁾⁽¹⁰⁾

$$q = - \frac{KA}{U} \left(\frac{dp}{dL} - \rho g \sin \alpha \right) \quad (11)$$

EL SIGNO MENOS DE LA ECUACIÓN, INDICA QUE EL FLUJO OCURRE EN LA DIRECCIÓN QUE DISMINUYE LA PRESIÓN, POR CONSIGUIENTE, dp/dL ES NEGATIVO.

DE LA ECUACIÓN (10) SE TIENE:

$$K = \frac{qU}{A} \left(\frac{1}{dp/dL} \right) \quad (12)$$

OTRA FORMA DE EXPRESAR ESTA ECUACIÓN ES:

$$K = \frac{qLU}{A} \left(\frac{1}{P_E - P_S} \right) \quad (13)$$

LA ECUACIÓN (13) PERMITE CALCULAR LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA DE UN MEDIO POROSO CUANDO SE CONOCE EL RITMO DE DESPLAZAMIENTO, LA LONGITUD Y ÁREA TRANSVERSAL DE LA MUESTRA POROSA, LAS PRESIONES DE ENTRADA Y SALIDA CON LAS QUE SE EFECTÚA EL DESPLAZAMIENTO, ASÍ COMO LA VISCOSIDAD DEL FLUIDO.

LA UNIDAD DERIVADA PARA LA PERMEABILIDAD ES EL DARCY, EL CUAL SE OBTIENE CUANDO EN LA ECUACIÓN 13 SE TIENEN LAS SIGUIENTES CONDICIONES:

$$\begin{aligned}Q &= 1 \text{ CM}^3/\text{SEG.}, \\L &= 1 \text{ CM.}, \\U &= 1 \text{ CP.}, \\A &= 1 \text{ CM}^2, \\ \Delta P &= 1 \text{ ATMÓSFERA.}\end{aligned}$$

COMO LA UNIDAD DARCY ES MUY GRANDE, GENERALMENTE SE USA EL MILLIDARCY (MD), ES DECIR,

$$1 \text{ DARCY} = 1000 \text{ MD.}$$

PERMEABILIDAD EFECTIVA.

COMO SE MENCIONÓ ANTERIORMENTE, LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA SE REFIRIÓ A LAS CONDICIONES DE LA ROCA CUANDO ÉSTA SE ENCUENTRA

100% SATURADA CON UN FLUIDO HOMOGÉNEO Y LA LEY DE DARCY SE ESTABLECIÓ BAJO ESTAS CONDICIONES. SIN EMBARGO, EN UN YACIMIENTO DE HIDROCARBUROS, LA ROCA GENERALMENTE SE ENCUENTRA SATURADA CON DOS O MÁS FASES, TALES COMO AGUA, ACEITE Y/O GAS. CON BASE EN LO ANTERIOR, SE HIZO NECESARIO INTRODUCIR EL CONCEPTO DE PERMEABILIDAD EFECTIVA A UN FLUIDO, CON EL FIN DE DESCRIBIR EL FLUJO MULTIFÁSICO EN LOS YACIMIENTOS. ESTE CONCEPTO CONSIDERA QUE CADA FLUIDO ES INDEPENDIENTE DEL OTRO, ES DECIR, QUE NO SON MISCIBLES.

POR LO ANTERIOR, LA PERMEABILIDAD EFECTIVA SUELE DEFINIRSE COMO "LA CAPACIDAD DE UN MEDIO POROSO PARA DEJAR FLUIR UNA FASE CUANDO EL MEDIO POROSO SE ENCUENTRA SATURADO CON MÁS DE UN FLUIDO".

CON LO CUAL SE ESTABLECE QUE LA PERMEABILIDAD EFECTIVA ES FUNCIÓN DE LA SATURACIÓN DE FLUIDOS QUE SE TENGA, DE LA MOJABILIDAD DE LA ROCA Y DE LA GEOMETRÍA DEL MEDIO POROSO, POR LO QUE AL HABLAR DE PERMEABILIDADES EFECTIVAS, SERÁ NECESARIO ESPECIFICAR PARA QUÉ SATURACIÓN DE FLUIDOS CORRESPONDE.

LA PERMEABILIDAD EFECTIVA SIEMPRE SERÁ MENOR QUE LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA DEL MEDIO POROSO Y SE ACOSTUMBRA INDICAR CON UN SUBÍNDICE EL FLUIDO DE QUE SE TRATA, ASÍ K_w , K_o , Y K_g , REPRESENTAN

SENTAN LAS PERMEABILIDADES EFECTIVAS AL AGUA, AL ACEITE Y AL GAS, RESPECTIVAMENTE.

GENERALMENTE ESTOS VALORES DE PERMEABILIDAD SE OBTIENEN FÁCILMENTE EN EL LABORATORIO UTILIZANDO MUESTRAS PEQUEÑAS DE NÚCLEOS.

PERMEABILIDADES RELATIVAS.

LA PERMEABILIDAD RELATIVA ES DEFINIDA COMO EL COCIENTE QUE EXISTE ENTRE LA PERMEABILIDAD EFECTIVA A UN FLUIDO A UNA SATURACIÓN DADA Y LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA DE LA MUESTRA, ESTO ES,

$$K_{RW} = \frac{K_w}{K} \quad (14)$$

$$K_{RO} = \frac{K_o}{K} \quad (15)$$

$$K_{RG} = \frac{K_g}{K} \quad (16)$$

DONDE K_{RW} , K_{RO} Y K_{RG} , REPRESENTAN LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS AL AGUA, ACEITE Y GAS, RESPECTIVAMENTE.

DE AQUÍ SE PUEDE ESTABLECER QUE LA PERMEABILIDAD RELATIVA TENDRÁ UNA VARIACIÓN DE CERO A UNO.

POR MEDIO DE LAS CURVAS DE PERMEABILIDADES RELATIVAS, SE PUEDE DEDUCIR LA FORMA DE DISTRIBUCIÓN DE FLUIDOS DENTRO DEL MEDIO POROSO, ES DECIR, LA CURVA DE PERMEABILIDAD RELATIVA A LA FASE MOJANTE DECLINA RÁPIDAMENTE INDICANDO QUE LOS POROS MÁS GRANDES SON OCUPADOS PRIMERO POR EL FLUIDO NO-MOJANTE. SI LA SATURACIÓN DEL FLUIDO NO-MOJANTE SE INCREMENTA, INDICA QUE PRIMERO SE SATURAN LOS POROS MÁS GRANDES Y DESPUÉS LOS MÁS PEQUEÑOS, ES DECIR, LA CURVA DE PERMEABILIDADES RELATIVA A LA FASE NO-MOJANTE SE INCREMENTARÁ RÁPIDAMENTE.

TOMANDO EN CUENTA QUE LA PERMEABILIDAD RELATIVA ES FUNCIÓN DE LA SATURACIÓN DE FLUIDOS, ES PRÁCTICA COMÚN ELABORAR GRÁFICAS CON ESTOS DOS PARÁMETROS, COMO SE MUESTRA A CONTINUACIÓN EN LA FIGURA 2.2.

SOBRE ESTA GRÁFICA SE PUEDE DECIR LO SIGUIENTE:

SE APRECIAN DOS LÍMITES, EL PRIMERO SE PRESENTA CUANDO LA SATURACIÓN DE ACEITE ES TAN ALTA QUE LA SATURACIÓN DE AGUA ES REDUCIDA A UN VALOR DE SATURACIÓN IRREDUCTIBLE, POR LO TANTO, PARA ESTE PUNTO, LA PROBABILIDAD DE ENCONTRAR POROS INTERCONECTADOS DISPONIBLES PARA EL PASO DE AGUA ES NULA, SI LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA ES BAJA Y LA PERMEABILIDAD RELATIVA ASOCIADA CON -

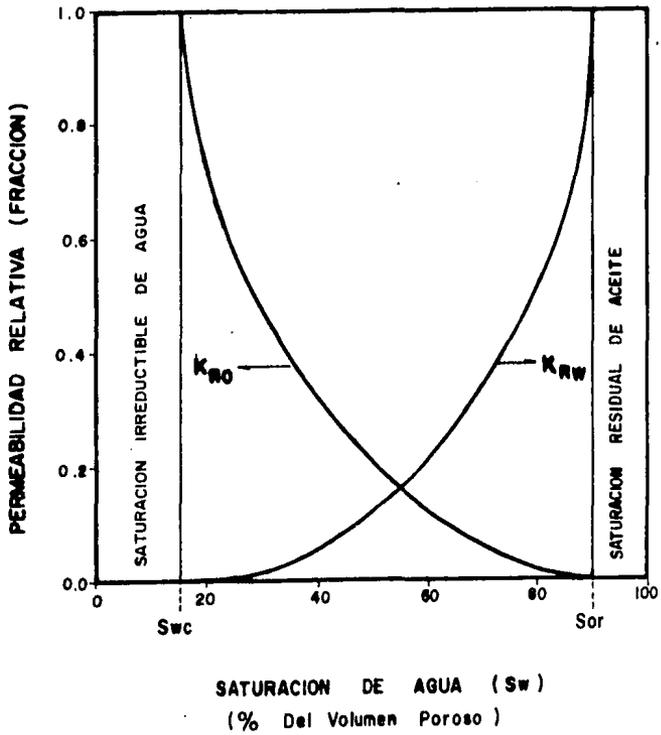


Figura No. 2.2: PERMEABILIDADES RELATIVAS AL AGUA Y AL ACEITE EN FUNCIÓN DE LA SATURACION DE AGUA.

ESTA FASE ES CERO, ES DECIR, CUANDO S_w ES IGUAL A S_{wc} SE TIENE QUE $K_{RW} = 0$ Y $K_{RO} = 1$. EL SEGUNDO LÍMITE ES ANÁLOGO AL PRIMERO Y OCURRE CUANDO LA SATURACIÓN DE ACEITE ES TAN PEQUEÑA QUE SOLAMENTE UNOS CUANTOS POROS CONTIENEN ACEITE. LA PROBABILIDAD DE QUE ESTA CANTIDAD DE POROS ESTÉN COMUNICADOS SERÁ NULA Y NO PUEDE OCURRIR FLUJO DE ACEITE, LA PERMEABILIDAD RELATIVA DE LA ROCA ASOCIADA A ESTA FASE ES CERO, ES DECIR, PARA S_0 IGUAL A S_{OR} TENEMOS QUE $K_{RO} = 0$ Y $K_{RW} = 1$. ESTE LÍMITE SE CONOCE TAMBIÉN COMO SATURACIÓN RESIDUAL DE ACEITE. EN OTRAS PALABRAS, A MEDIDA QUE LA SATURACIÓN DE AGUA AUMENTA, LA PERMEABILIDAD RELATIVA AL AGUA AUMENTA Y LA PERMEABILIDAD RELATIVA AL ACEITE DISMINUYE.

PARA EL CASO DE UN SISTEMA GAS-ACEITE, LAS CURVAS DE PERMEABILIDADES RELATIVAS (K_{RG} Y K_{RO}) ADQUIEREN UNA FORMA SIMILAR A LAS MOSTRADAS EN EL CASO ANTERIOR, DONDE SE OBSERVARÁ LA SATURACIÓN CRÍTICA DE GAS Y LA SATURACIÓN RESIDUAL DE ACEITE, RESPECTIVAMENTE.

MÉTODOS DE LABORATORIO.

LA DETERMINACIÓN DE ESTAS CARACTERÍSTICAS GENERALMENTE SE HACE EN EL LABORATORIO, UTILIZANDO PEQUEÑAS MUESTRAS DE NÚCLEOS OBTENIDOS DURANTE LA PERFORACIÓN. ENTRE LOS PRINCIPALES MÉTODOS CON QUE SE CUENTA, SE TIENEN LOS SIGUIENTES:

EL DE PENN-STATE ⁽⁵⁾, EL DINÁMICO DE UN SÓLO NÚCLEO ⁽⁵⁾, EL MÉTODO DE HASSLER ⁽⁵⁾ ⁽⁶⁾, EL MÉTODO DE LÍQUIDO EN REPOSO ⁽⁵⁾, TODOS ELLOS CON EL PRINCIPIO DE RÉGIMEN PERMANENTE Y LA TÉCNICA DE DESPLAZAMIENTO DE GAS ⁽⁵⁾ ⁽⁶⁾ QUE EMPLEA EL PRINCIPIO DE RÉGIMEN TRANSITORIO.

LOS RESULTADOS QUE SE OBTIENEN CON CADA UNO DE ESTOS MÉTODOS SON SIMILARES Y CONSISTEN ESENCIALMENTE EN MANTENER CIERTA SATURACIÓN DE FLUIDOS, YA SEA EN CONDICIONES ESTÁTICAS O DINÁMICAS Y SE CALCULAN LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS A PARTIR DE LA GEOMETRÍA DEL NÚCLEO, LA VISCOSIDAD DE LOS FLUIDOS Y LOS GASTOS Y PRESIONES SE MIDEN DIRECTAMENTE. COMO SE MENCIONÓ EN UN PRINCIPIO, LA DIFICULTAD PRINCIPAL CONSISTE EN MANTENER CONSTANTES Y UNIFORMES LAS SATURACIONES DESEADAS A TRAVÉS DE LA LONGITUD TOTAL DEL NÚCLEO DENTRO DE UN MEDIO POROSO.

PRESION CAPILAR.

EL CONCEPTO DE CAPILARIDAD SURGIÓ CUANDO AL INTRODUCIR UN TUBO CAPILAR DENTRO DE UN RECIPIENTE CONTENIENDO UN LÍQUIDO, SE OBSERVÓ QUE EL LÍQUIDO SE ELEVABA POR LAS PAREDES DEL CAPILAR, ES DECIR, SE ADHERÍA A ÉSTAS HASTA ALCANZAR CIERTA ALTURA DONDE LA FUERZA TOTAL QUE LO ELEVA SE EQUILIBRA CON EL PESO DE LA COLUMNA DE LÍQUIDO CONTENIDO EN EL CAPILAR, DE AQUÍ SE DEFINE LA PRESIÓN CAPILAR COMO LA DIFERENCIA DE PRESIÓN EXISTENTE A

TRAVÉS DE LA INTERFASE DE LOS DOS FLUIDOS INMISCIBLES.

CON FUNDAMENTO EN LO ANTERIOR, LA PRESIÓN CAPILAR, PARA UN CAPILAR RECTO, CUANDO SE TIENEN DOS FASES, AGUA-ACEITE, SE EXPRESA COMO:

$$P_C = P_O - P_W \quad (17)$$

FLUJO FRACCIONAL.

EL CONCEPTO DE FLUJO FRACCIONAL SE APLICA PARA CUANDO MÁS DE UN FLUIDO SE ESTÁ DESPLAZANDO, Y SUELE DEFINIRSE COMO LA RELACIÓN QUE EXISTE ENTRE LA FRACCIÓN DE UN FLUIDO QUE SE ESTÁ PRODUCIENDO Y LA PRODUCCIÓN TOTAL, ES DECIR, SI UN POZO PRODUCE SIMULTÁNEAMENTE AGUA Y ACEITE, EL FLUJO FRACCIONAL DE AGUA ESTÁ DADO POR:

$$f_W = \frac{Q_W}{Q_T} \quad (18)$$

PERO COMO:

$$Q_T = Q_O + Q_W \quad (19)$$

ENTONCES:

$$f_W = \frac{Q_W}{Q_O + Q_W} \quad (20)$$

SIMILARMENTE, EL FLUJO FRACCIONAL DE ACEITE ESTÁ DADO POR:

$$r_o = \frac{q_o}{q_o + q_w} \quad (21)$$

SUMANDO LAS ECUACIONES (20) Y (21) SE CUMPLE QUE:

$$r_w + r_o = 1 \quad (22)$$

COMO SE MENCIONÓ AL PRINCIPIO, LA ECUACIÓN DE DARCY SE ESTABLECIÓ PARA CALCULAR EL RITMO DE DESPLAZAMIENTO DENTRO DE UN MEDIO POROSO.

SI CONSIDERAMOS LOS EFECTOS GRAVITACIONALES EN UN DESPLAZAMIENTO, EL GASTO DE ACEITE PUEDE SER CALCULADO POR:

$$q_o = - \frac{K_o A}{u_o} \left(\frac{\delta p_o}{\delta L} - \rho_o^{GSEN} \alpha \right) \quad (23)$$

PARA CUALQUIER FLUIDO DESPLAZANTE, COMO POR EJEMPLO EL AGUA, SE TENDRÍA LO SIGUIENTE:

$$q_w = - \frac{K_w A}{u_w} \left(\frac{\delta p_w}{\delta L} - \rho_w^{GSEN} \alpha \right) \quad (24)$$

REORDENANDO LAS ECUACIONES (23) Y (24) SE TIENE LO SIGUIENTE:

$$\frac{q_0}{K_0} \frac{u_0}{A} = - \frac{\delta P_0}{\delta L} + \rho_0 \text{ GSE} \alpha \quad (25)$$

$$\frac{q_w}{K_w} \frac{u_w}{A} = - \frac{\delta P_w}{\delta L} + \rho_w \text{ GSE} \alpha \quad (26)$$

SUBSTRAYENDO LA ECUACIÓN (25) DE LA (26) OBTENEMOS:

$$q_w \frac{u_w}{K_w A} - q_0 \frac{u_0}{K_0 A} = \left(- \frac{\delta P_w}{\delta L} + \frac{\delta P_0}{\delta L} \right) - (\rho_w - \rho_0) \text{ GSE} \alpha \quad (27)$$

DE LA DEFINICIÓN DE PRESIÓN CAPILAR SE TIENE:

$$P_c = P_0 - P_w \quad (17)$$

DIFERENCIANDO LA ECUACIÓN (17) CON RESPECTO A LA LONGITUD, SE OBTIENE:

$$\frac{\delta P_c}{\delta L} = \frac{\delta P_0}{\delta L} - \frac{\delta P_w}{\delta L} \quad (28)$$

SUBSTITUYENDO ESTA ECUACIÓN EN LA (27) SE LLEGA A:

$$\frac{q_w}{K_w} \frac{u_w}{A} - \frac{q_0}{K_0} \frac{u_0}{A} = \frac{\delta P_c}{\delta L} - g(\rho_w - \rho_0) \text{ SEN} \alpha \quad (29)$$

DE LA DEFINICIÓN DE GASTO TOTAL, ECUACIÓN (19), SE TIENE:

$$q_0 = q_T - q_W \quad (30)$$

Y SUBSTITUYENDO EN LA ECUACIÓN (29), LA ECUACIÓN QUEDA:

$$q_W \frac{u_W}{K_W A} - (q_T - q_W) \frac{u_0}{K_0 A} = \frac{\delta P_C}{\delta L} - g(\rho_W - \rho_0) \text{SEN} \alpha \quad (31)$$

REORDENANDO TÉRMINOS:

$$q_W \left(\frac{u_W}{K_W A} + \frac{u_0}{K_0 A} \right) - q_T \frac{u_0}{K_0 A} = \left(\frac{\delta P_C}{\delta L} \right) - g(\rho_W - \rho_0) \text{SEN} \alpha \quad (32)$$

DIVIDIENDO POR q_T , SE TIENE QUE:

$$\frac{q_W}{q_T} \left(\frac{u_W}{K_W A} + \frac{u_0}{K_0 A} \right) - \frac{u_0}{K_0 A} = \frac{1}{q_T} \left(\frac{\delta P_C}{\delta L} - g(\rho_W - \rho_0) \text{SEN} \alpha \right) \quad (33)$$

REORDENANDO TÉRMINOS:

$$\frac{q_W}{q_T} \left(\frac{u_W}{K_W A} + \frac{u_0}{K_0 A} \right) = \frac{u_0}{K_0 A} + \frac{1}{q_T} \left(\frac{\delta P_C}{\delta L} - g(\rho_W - \rho_0) \text{SEN} \alpha \right) \quad (34)$$

MULTIPLICANDO LA ECUACIÓN (34) POR A Y DESPEJANDO LA RELACIÓN Q_W/Q_T SE TIENE:

$$\frac{Q_W}{Q_T} = \frac{\frac{u_0}{K_0} + \frac{1}{Q_T} \left(\frac{\delta P_C}{\delta L} - G(\rho_W - \rho_0) \text{SEN } \alpha \right)}{\left(\frac{u_W}{K_W} + \frac{u_0}{K_0} \right)} \quad (35)$$

RECORDANDO QUE:

$$f_W = \frac{Q_W}{Q_T} \quad (18)$$

Y DIVIDIENDO EL LADO DERECHO DE LA ECUACIÓN (35) POR LA RELACIÓN u_0 / u_W , LA ECUACIÓN QUEDA:

$$f_W = \frac{1 + \frac{K_0}{Q_T u_0} \left(\frac{\delta P_C}{\delta L} - G(\rho_W - \rho_0) \text{SEN } \alpha \right)}{1 + \frac{u_W}{u_0} \frac{K_0}{K_W}} \quad (36)$$

LA ECUACIÓN (36) ES LA FORMA GENERAL DE LA ECUACIÓN DE FLUJO FRACCIONAL EN FUNCIÓN DE LAS VISCOSIDADES Y PERMEABILIDADES EFECTIVAS UTILIZADAS EN EL ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE DESPLAZAMIENTO FRONTAL DE ACEITE POR UN FLUIDO NO MISCIBLE, Y TOMA EN CUENTA EFECTOS CAPILARES Y GRAVITACIONALES.

CUANDO AL DESPLAZAMIENTO OCURRE EN UN SISTEMA HORIZONTAL SE CONSIDERA QUE LOS EFECTOS CAPILARES Y GRAVITACIONALES SON DESPRECIABLES, ES DECIR, TANTO α COMO $\frac{\delta P_c}{\delta L}$ SON IGUALES A CERO; LA ECUACIÓN (35) SE REDUCE A: ⁽⁵⁾⁽⁹⁾

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{u_w}{u_o} \frac{K_o}{K_w}} \quad (37)$$

COMO:

$$\frac{K_o (S_w)}{K_w (S_w)} = \frac{K_{RO} (S_w)}{K_{RW} (S_w)} \quad (38)$$

SUBSTITUYENDO EN LA ECUACIÓN (37) DA POR RESULTADO:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{u_w}{u_o} \frac{K_{RO}}{K_{RW}}} \quad (39)$$

QUE ES LA FORMA SIMPLIFICADA DE LA ECUACIÓN DE FLUJO FRACCIONAL EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE PERMEABILIDADES RELATIVAS DEL FLUIDO DESPLAZADO Y DEL DESPLAZANTE.

HISTERESIS.

LA PERMEABILIDAD RELATIVA DE UN FLUIDO A UNA SATURACIÓN DADA DEPENDE DE SU HISTORIA DE SATURACIÓN, ES DECIR, DEL SENTIDO EN EL QUE VARÍE DICHA SATURACIÓN, YA SEA QUE SE OBTENGA A PARTIR DEL 100% Ó 0%, O SEA, DESATURANDO O SATURANDO LA MUESTRA CON EL FLUIDO MOJANTE.

GENERANDO ASÍ, DOS FAMILIAS DE CURVAS MUY SEMEJANTES ENTRE SÍ, PERO MOSTRANDO UNA AMPLIA DIVERGENCIA ENTRE ELLAS; ESTA DIFERENCIA SE CONOCE COMO EFECTO DE HISTERESIS, COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA 2.3.

PUESTO QUE LA HISTERESIS EXISTE, DEBE TENERSE CUIDADO QUE LAS SATURACIONES EN EL LABORATORIO SE OBTENGAN DE LA MANERA MÁS APROPIADA. ESTO DEPENDERÁ DEL MECANISMO POR EL CUAL LA MUESTRA ES BARRIDA.

SI LA MUESTRA ES BARRIDA DISMINUYENDO LA SATURACIÓN DE LA FASE MOJANTE E INCREMENTANDO LA SATURACIÓN DE LA FASE NO-MOJANTE, COMO POR EJEMPLO, EN EL CASO DE INYECCIÓN DE GAS O EMPUJE POR GAS DISUELTO, LAS CURVAS DE PERMEABILIDADES RELATIVAS SON OBTENIDAS EN CONDICIONES DE DRENE. SI POR OTRO LADO LA MUESTRA ES BARRIDA DISMINUYENDO LA SATURACIÓN DE LA FASE NO-MOJANTE E IN-

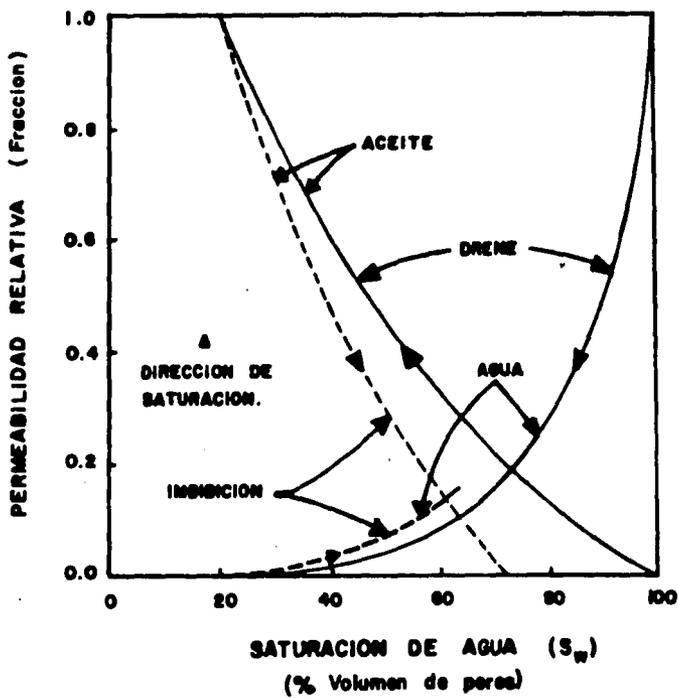


Figura No. 2.3.- PERMEABILIDADES RELATIVAS AL AGUA Y AL ACEITE EN FUNCION DE LA SATURACION DE AGUA, MOSTRANDO EL EFECTO DE HISTERESIS.

CREMENTANDO LA SATURACIÓN DE LA FASE MOJANTE, COMO EN EL MECANISMO DE EMPUJE POR AGUA, ENTONCES SE OBTIENEN LAS CURVAS DE PERMEABILIDAD RELATIVA EN CONDICIONES DE IMBIBICIÓN.

VISCOSIDAD EFECTIVA

EN UN PEQUEÑO NÚCLEO LINEAL, DE LONGITUD L , Y ÁREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL A , EN EL QUE SE INYECTA UN CIERTO VOLUMEN DE FLUIDO, YA SEA AGUA O GAS, COMO PARTE DE UN PROYECTO DE DESPLAZAMIENTO, PUEDE ASOCIARSE, PARA CUALQUIER PUNTO DENTRO DE DICHO NÚCLEO, UN VALOR DE VISCOSIDAD, EL CUAL SE DENOMINA VISCOSIDAD EFECTIVA, QUE SE OBTIENE APLICANDO LA ECUACIÓN QUE REPRESENTA LA LEY DE DARCY AL FLUJO MULTIFÁSICO, COMO SI SE TRATARA DE FLUJO MONOFÁSICO.

MATEMÁTICAMENTE PUEDE EXPRESARSE COMO:

$$u_E = \frac{K A}{q} \left(-\frac{dP}{dL} \right) \quad (40)$$

PERO, EL PRODUCTO KA PUEDE EVALUARSE, POR EJEMPLO, DURANTE LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA CON:

$$KA = \frac{u_B q_B L}{(\Delta P)_B} \quad (41)$$

DONDE:

$(\Delta P)_B$ ES LA CAÍDA DE PRESIÓN A LO LARGO DE TODO EL NÚCLEO ORIGINADA POR EL FLUJO DE UN SÓLO FLUIDO DE VISCOSIDAD u_B A UN GASTO q_B .

RELACIONANDO AMBAS ECUACIONES SE TIENE QUE:

$$u_E = \frac{u_B q_B L}{(\Delta P)_B q} \left(\frac{dP}{dx} \right) \quad (42)$$

SI CONSIDERAMOS AHORA, LA LONGITUD TOTAL L , DEL NÚCLEO LA VISCOSIDAD EFECTIVA PUEDE EXPRESARSE COMO UNA VISCOSIDAD MEDIA, QUEDANDO:

$$\overline{u}_E = \frac{u_B q_B}{(\Delta P)_B} \left(\frac{(\Delta P)}{q} \right) \quad (43)$$

ESTA ECUACIÓN FACILITA LA DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN VISCOSIDAD EFECTIVA MEDIA PARA UN TIPO DE ROCA DE UN YACIMIENTO DADO, A PARTIR DE MEDICIONES DE GASTO A PRESIÓN CONSTANTE O CAÍDAS DE PRESIÓN A GASTO CONSTANTE, TOMADAS EN ETAPAS SUCESIVAS DE UNA PRUEBA.

CAPITULO 3

DESARROLLO TEORICO

A CONTINUACIÓN SE DESCRIBE EL DESARROLLO ANALÍTICO DEL MÉTODO PRESENTADO PARA CALCULAR LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS EN UN SISTEMA DE FLUJO EN DOS FASES, A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS DURANTE UNA PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO DE ACEITE POR AGUA (O GAS), EFECTUADA EN UN NÚCLEO DE LA ROCA DEL YACIMIENTO.

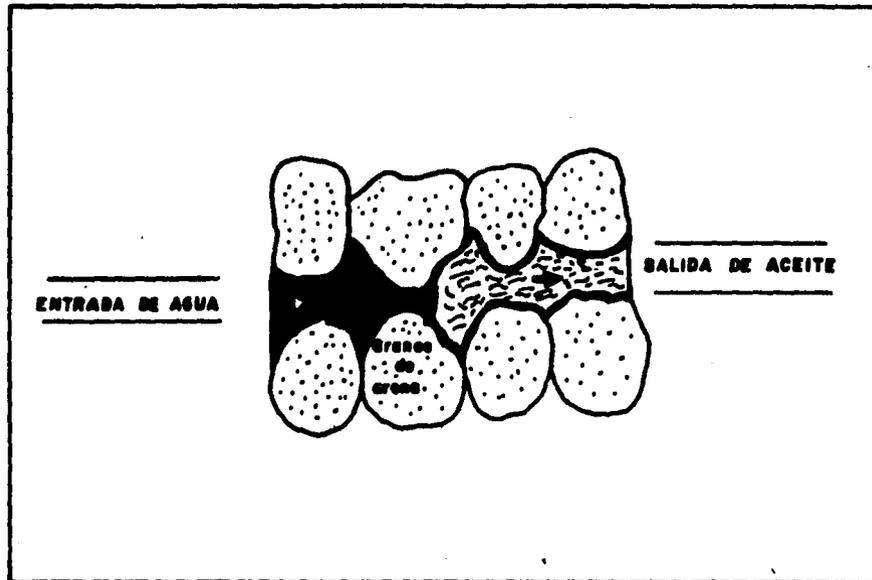
EL MÉTODO HACE USO DE LAS RELACIONES MATEMÁTICAS DESARROLLADAS EN LA TEORÍA DE AVANCE FRONTAL DE BUCKLEY-LEVERETT⁽²⁾ QUE A SU VEZ FUE AMPLIADA Y MODIFICADA POR E.F. JOHNSON⁽³⁾ Y H.J. WELGE.⁽⁴⁾

LA PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO SE CONSIDERA COMO UN PROCESO INMISCIBLE EN RÉGIMEN TRANSITORIO, A PRESIÓN CONSTANTE Y GASTO VARIABLE EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA.

ESTA TEORÍA CONSIDERA LAS SIGUIENTES SUPOSICIONES:

- 1.- MANTENER UNA CAÍDA DE PRESIÓN ADECUADA DURANTE LA PRUEBA CON EL FIN DE QUE LOS EFECTOS CAPILARES Y GRAVITACIONALES SEAN DESPRECIABLES Y LOGRAR ASÍ UN DESPLAZAMIENTO ESTABILIZADO.
- 2.- LAS FASES INVOLUCRADAS DEBEN COMPORTARSE COMO FLUIDOS INMISCIBLES, PARA QUE EL DESPLAZAMIENTO DEL FLUIDO A TRAVÉS DE TODO EL SISTEMA PUEDA CONSIDERARSE CONSTANTE.
- 3.- DADO EL TAMAÑO DE LOS NÚCLEOS, SE CONSIDERA QUE EL SISTEMA DE FLUJO ES LINEAL Y QUE LA ROCA ES HOMOGÉNEA.
- 4.- EL GASTO DE INYECCIÓN ES IGUAL AL GASTO DE PRODUCCIÓN EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA.
- 5.- LA VELOCIDAD DE ESCURRIMIENTO ES TAL, QUE EL RÉGIMEN DE FLUJO RESULTA LAMINAR.
- 6.- EL PROCESO EN RÉGIMEN TRANSITORIO PUEDE REPRESENTARSE POR MEDIO DE UNA SERIE DE ETAPAS, SUFICIENTEMENTE CORTAS, EN RÉGIMEN PERMANENTE.

SI ANALIZAMOS AHORA UNA FRACCIÓN DE ROCA DEL YACIMIENTO, A LA CUAL SE LE SOMETE A UNA PRESIÓN DIFERENCIAL MEDIANTE LA ENTRADA NATURAL O ARTIFICIAL DE UN FLUIDO, COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA 3.1.



**Figura No. 3.1: DESPLAZAMIENTO NATURAL DE ACEITE POR AGUA
EN UN MEDIO POROSO.**

LA PRESIÓN DIFERENCIAL, PARA UN INSTANTE DADO DURANTE LA PRUEBA EN UN SISTEMA DE LONGITUD L , PUEDE EXPRESARSE POR LA SIGUIENTE EXPRESIÓN:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = - \int_0^L \frac{\partial P}{\partial x} dx \quad (44)$$

DE LA ECUACIÓN DE DARCY, APLICADA PARA FLUJO LINEAL DE ACEITE Y CONSIDERANDO LA PRESIÓN DIFERENCIAL COMO UN GRADIENTE A TRAVÉS DE LA DISTANCIA x , SE TIENE:

$$q_0 = - \frac{K_0 A}{u_0} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (45)$$

RECORDANDO QUE:

$$q_0 = q_T f_0$$

$$v = q_T / A$$

$$K_0 = K K_{RO}$$

Y SUBSTITUYENDO EN LA ECUACIÓN (45) QUEDA:

$$\frac{q_T f_0}{A} = - \frac{K K_{RO}}{u_0} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (46)$$

REAGRUPANDO TÉRMINOS, SE TIENE QUE:

$$v f_0 = - \frac{K K_{RO}}{u_0} \frac{\delta P}{\delta x} \quad (47)$$

DESPEJANDO EL GRADIENTE DE PRESIÓN $\delta P / \delta x$, LA ECUACIÓN ANTERIOR QUEDA:

$$\frac{\delta P}{\delta x} = - \frac{u_0 v f_0}{K K_{RO}} \quad (48)$$

SUBSTITUYENDO EN LA ECUACIÓN (44), SE ESTABLECE LA SIGUIENTE ECUACIÓN:

$$\Delta P = \frac{v u_0}{K} \int_0^L \frac{f_0}{K_{RO}} dx \quad (49)$$

DE LA ECUACIÓN DE AVANCE FRONTAL, PARA UN INSTANTE DADO, LA DISTANCIA QUE HA RECORRIDO UN PLANO DE SATURACIÓN (S_w), PUEDE SER CALCULADA POR:

$$x = \frac{W_I}{\emptyset A} \left(\frac{df_w}{dS_w} \right) S_{wx} \quad (50)$$

DE DONDE:

$$\frac{x}{\left(\frac{df_w}{dS_w} \right) S_{wx}} = \frac{W_I}{\emptyset A} = \text{CONSTANTE} \quad (51)$$

PARA EL INSTANTE EN EL CUAL EL FRENTE DE INVASIÓN HA RECORRIDO LA DISTANCIA L , LA ECUACIÓN ANTERIOR QUEDA:

$$\frac{L}{\left(\frac{df_W}{dS_W}\right)_{S_{W2}}} = \frac{W_I}{\theta A} = \text{CONSTANTE} \quad (52)$$

LA POSICIÓN RELATIVA DEL FRENTE DE INVASIÓN SE OBTIENE DIVIDIENDO LAS ECUACIONES (51) Y (52), ESTO ES:

$$\frac{x}{L} = \frac{\left(\frac{df_W}{dS_W}\right)_{S_{Wx}}}{\left(\frac{df_W}{dS_W}\right)_{S_{W2}}} \quad (53)$$

PARA SIMPLIFICAR EL MANEJO ALGEBRAICO DE LAS VARIABLES SE ESTABLECE QUE:

$$\begin{aligned} f'_W &= \left(\frac{df_W}{dS_W}\right)_{S_{Wx}} \\ f'_{W2} &= \left(\frac{df_W}{dS_W}\right)_{S_{W2}} \end{aligned} \quad (54)$$

SUBSTITUYENDO LAS RELACIONES ANTERIORES EN LA ECUACIÓN (53) Y DADO QUE L Y f'_{W2} SE MANTIENEN CONSTANTES, PARA UN INSTANTE CONSIDERADO, SE OBTIENE QUE:

$$x = \frac{L}{f'_{W2}} f'_W \quad (55)$$

DIFERENCIANDO LA ECUACIÓN (55), SE TIENE:

$$dx = \frac{L}{f'_{W2}} df'_W \quad (56)$$

SUBSTITUYENDO LA ECUACIÓN (56) EN LA ECUACIÓN (49) E INTEGRANDO ENTRE LOS LÍMITES DE CERO A f'_{W2} , YA QUE PARA:

$$x = 0 \quad ; \quad f'_W = 0$$

Y PARA:

$$x = L \quad ; \quad f'_W = f'_{W2} \quad \text{Y} \quad f_0 = f_{02}$$

LO CUAL CONDUCE A:

$$\Delta P = \frac{v}{K} \frac{u_0}{A} \int_0^{f'_{W2}} \frac{f_{02}}{K_{RO}} \frac{L}{f'_{W2}} df'_W \quad (57)$$

REAGRUPANDO TÉRMINOS Y RECORDANDO QUE:

$$v = Q / A$$

SE TIENE QUE:

$$\int_0^{f'_{w2}} \frac{f_{o2}}{K_{RO}} df'_w = \frac{(\Delta P / q) K A}{u_o L} f'_{w2} \quad (58)$$

DE LA LEY DE DARCY, SE DEDUCE QUE:

$$KA = \frac{u_B L}{(\Delta P / q)_B} \quad (59)$$

SUBSTITUYENDO LA ECUACIÓN (59) EN LA ECUACIÓN (58) RESULTA QUE:

$$\int_0^{f'_{w2}} \frac{f_{o2}}{K_{RO}} df'_w = \frac{(\Delta P / q) u_B L}{(\Delta P / q)_B u_o L} f'_{w2} \quad (60)$$

POR DEFINICIÓN:

$$\bar{u}_E = \frac{(\Delta P / q) u_B}{(\Delta P / q)_B} \quad (43)$$

RELACIONANDO LA ECUACIÓN ANTERIOR CON LA ECUACIÓN (60), SE OBTIENE:

$$\int_0^{f'_{w2}} \frac{f_{o2}}{K_{RO}} df'_w = \frac{\bar{u}_E f'_{w2}}{u_o} \quad (61)$$

DERIVANDO LA ECUACIÓN (61) CON RESPECTO A r'_{W2} , SE TIENE LA SIGUIENTE ECUACIÓN:

$$\frac{r_{O2}}{K_{RO}} = \frac{1}{u_0} \frac{d(\bar{u}_E \epsilon'_{W2})}{d(r'_{W2})} \quad (62)$$

SI:

$$r'_{W2} = 1 / Q_I \quad (B.11)$$

SE LLEGA A LA SIGUIENTE ECUACIÓN:

$$\frac{r_{O2}}{K_{RO}} = \frac{1}{u_0} \frac{d(\bar{u}_E / Q_I)}{d(1 / Q_I)} \quad (63)$$

PARA RESOLVER LA DERIVADA DEL LADO DERECHO DE LA ECUACIÓN (63), SE APLICA LA REGLA DE LA CADENA, POR TANTO, SE TIENE LO SIGUIENTE:

$$\frac{d(\bar{u}_E / Q_I)}{d(1/Q_I)} = \frac{d(\bar{u}_E / Q_I)}{d(Q_I)} \frac{d(Q_I)}{d(1/Q_I)} \quad (64)$$

SI:

$$d(1/Q_I) = -Q_I^{-2} d(Q_I) \quad (65)$$

SE TIENE QUE:

$$\frac{d(\bar{U}_E/Q_1)}{d(1/Q_1)} = \frac{d(\bar{U}_E/Q_1)}{d(Q_1)} (-Q_1^2) \quad (66)$$

DIFERENCIANDO POR PARTES EL LADO DERECHO DE LA ECUACIÓN ANTERIOR, QUEDA

$$\frac{d(\bar{U}_E/Q_1)}{d(1/Q_1)} = \bar{U}_E - Q_1 \frac{d(\bar{U}_E)}{d(Q_1)} \quad (67)$$

EN LA ECUACIÓN (67) EL TÉRMINO DEL LADO DERECHO ES IDÉNTICO AL DE LA ECUACIÓN DESARROLLADA PARA U_{E2} EN EL APÉNDICE D, ENTONCES:

$$\frac{d(\bar{U}_E/Q_1)}{d(1/Q_1)} = U_{E2} \quad (68)$$

SUBSTITUYENDO LA ECUACIÓN (68) EN LA ECUACIÓN (63) DA POR RESULTADO:

$$\frac{f_{02}}{K_{RO}} = \frac{U_{E2}}{U_0} \quad (69)$$

REORDENANDO TÉRMINOS, QUEDA:

$$K_{RO} = \frac{f_{O2} u_o}{u_{E2}} \quad (70)$$

LA RELACIÓN OBTENIDA PROPORCIONA UN MEDIO PARA CALCULAR LA PERMEABILIDAD RELATIVA AL ACEITE, ESPECÍFICAMENTE PARA UN INSTANTE DADO DURANTE EL DESPLAZAMIENTO. TANTO EL FLUJO FRACCIONAL DE ACEITE, f_{O2} , COMO LA VISCOSIDAD EFECTIVA u_{E2} , SE EVALÚAN EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA PARA UN VALOR DADO DE Q_1 .

EFFECTUANDO UN PROCESO SIMILAR CONSIDERANDO FLUJO DE AGUA, SE LLEGA A UNA EXPRESIÓN SEMEJANTE A LA ECUACIÓN (70), PARA CALCULAR LA PERMEABILIDAD RELATIVA AL AGUA, PARA CUALQUIER INSTANTE DURANTE EL DESPLAZAMIENTO, LA CUAL PODEMOS EXPRESAR DE LA SIGUIENTE FORMA:

$$K_{RW} = \frac{f_{W2} u_w}{u_{E2}} \quad (71)$$

CAPITULO 4

EJEMPLO DE APLICACION

CON EL FIN DE PROBAR SI LA TÉCNICA GRÁFICA PARA EVALUAR LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS PROPUESTO POR JONES & ROSZELLE, ES EQUIVALENTE A LAS ECUACIONES DESARROLLADAS POR E.F. JOHNSON Y DE FÁCIL APLICACIÓN, SE EFECTUÓ EN EL LABORATORIO UNA PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO SOBRE UN PEQUEÑO NÚCLEO OBTENIDO DURANTE LA PERFORACIÓN DEL POZO MUSPAC No. 1, LOCALIZADO EN LA ZONA SURESTE.

LA SECUENCIA QUE SE UTILIZÓ EN LA PREPARACIÓN DE LA MUESTRA Y LA SECUENCIA DE CÁLCULO FUE LA SIGUIENTE:

PREPARACION DE LA MUESTRA.

SE LIMPIÓ Y ORIENTÓ EL NÚCLEO No. 1, A CONTINUACIÓN SE LE CORTÓ UNA MUESTRA CILÍNDRICA DE DIMENSIONES APROXIMADAS A 3.76 CM.

DE DIÁMETRO Y 3.75 CM. DE LONGITUD, QUE CORRESPONDE A LA PROFUNDIDAD DE 2910 M.

LA MUESTRA FUE LAVADA CON SOLVENTE Y UNA VEZ LIMPIA, SE LE MIDió SU POROSIDAD Y PERMEABILIDAD ABSOLUTA A UN LÍQUIDO NO REACTIVO, EN SEGUIDA SE SATURó AL 100% CON AGUA SALADA DE 100,000 P.P.M. DE CLORURO DE SODIO, EQUIVALENTE A LA SALINIDAD ENCONTRADA PARA EL AGUA DE LA FORMACIÓN. POSTERIORMENTE SE LE CIRCULó LA MISMA, REGISTRANDO LA INFORMACIÓN NECESARIA PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA AL AGUA SATURANTE K; SUBSECUENTEMENTE SE LE CIRCULó ACEITE SOLTROL 170, HASTA ALCANZAR LA SATURACIÓN IRREDUCTIBLE DE AGUA S_{WI} .

LA POROSIDAD Y PERMEABILIDAD ABSOLUTA DE LA MUESTRA OBTENIDAS PREVIAMENTE, SON: 18.9% Y 29.32 MD., RESPECTIVAMENTE.

DESPUÉS DE LO ANTERIOR, SE CONSIDERó A LA MUESTRA ACONDICIONADA PARA EFECTUAR LA PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO.

EL DESPLAZAMIENTO SE EFECTUó A PRESIÓN CONSTANTE CON AGUA DULCE, REGISTRANDO SIMULTÁNEAMENTE EL TIEMPO Y LAS PRODUCCIONES ACUMULADAS DE AGUA Y ACEITE, RESPECTIVAMENTE, PARA EL CÁLCULO DE LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS A CADA UNA DE LAS FASES CONTENIDAS EN LA ROCA.

CALCULO DE LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS

EN ESTA PARTE SE INDICA LA SECUENCIA DE CÁLCULO PARA OBTENER LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS A CADA FASE, EN FUNCIÓN DE LA SATURACIÓN DE FLUIDOS, MEDIANTE EL EMPLEO DEL MÉTODO DESCRITO, APLICADO A LOS DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS DURANTE UNA PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO EFECTUADA EN RÉGIMEN TRANSITORIO PARA UN SISTEMA AGUA-ACEITE.

DE ACUERDO A LA PRESIÓN UTILIZADA EN LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA SE ELIGIÓ UNA PRESIÓN DIFERENCIAL DE 0.9678 ATMÓSFERAS.

INICIANDO EL DESPLAZAMIENTO DE ACEITE POR AGUA, A PRESIÓN CONSTANTE, CON LA MUESTRA SATURADA CON 20.2% DE AGUA SALADA Y 79.8% DE ACEITE SOLTROL 170 DE 2.25 CP. DE VISCOSIDAD A UNA TEMPERATURA DE 28.8°C.

EL PROCESO DE CÁLCULO DE LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS A CADA FASE, SE ILUSTRA EN LAS TABLAS 4.1 Y 4.2, EN ÉL SE UTILIZAN LAS ECUACIONES DESARROLLADAS EN EL CAPÍTULO 3, PARA CADA FASE, Y ES EL SIGUIENTE:

EN LA COLUMNA 1, DE LA TABLA 4.1, SE PRESENTA EL TIEMPO TOTAL (T), REGISTRADO DESDE EL INICIO DE LA PRUEBA Y SUS CORRESPON-

DIENTES PRODUCCIONES ACUMULADAS DE ACEITE (N_p) Y DE AGUA (W_p), EN LAS COLUMNAS 2 Y 3, RESPECTIVAMENTE.

EL VOLUMEN ACUMULADO DE AGUA INYECTABLE (W_I), REFERIDO A LA PRESIÓN MEDIA DE LA MUESTRA, COLUMNA 4, ES IGUAL AL VOLUMEN ACUMULADO DE AGUA PRODUCIDA MÁS EL VOLUMEN DE AGUA REMANENTE EN LA MUESTRA, QUE ES EQUIVALENTE AL VOLUMEN DE ACEITE DESPLAZADO RECUPERADO, LO CUAL PUEDE EXPRESARSE COMO:

$$W_I = W_p + N_p \quad (72)$$

DE LO MENCIONADO ANTERIORMENTE SE INFIERE QUE, LA SATURACIÓN MEDIA DE AGUA ($\overline{S_w}$), DENTRO DE LA MUESTRA SERÁ IGUAL A LA SATURACIÓN DE AGUA IRREDUCTIBLE (S_{WI}), MÁS EL INCREMENTO CAUSADO POR LA INYECCIÓN DE AGUA, ES DECIR, MÁS LA PRODUCCIÓN ACUMULADA DE ACEITE EN VOLÚMENES DE POROS. LA REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA ES:

$$\overline{S_w} = S_{WI} + \frac{N_p}{V_p} \quad (73)$$

QUE SE MUESTRA EN LA COLUMNA 5.

EL VOLUMEN ACUMULADO DE AGUA DE INYECCIÓN EXPRESADO EN VOLÚMENES DE POROS, ES REPRESENTADO POR Q_I , Y ES IGUAL A LA RELACIÓN ENTRE LA INYECCIÓN ACUMULADA (W_I), Y EL VOLUMEN DE POROS (V_p), ES DECIR:

$$Q_1 = \frac{W_I}{V_P} \quad (74)$$

LOS VALORES OBTENIDOS PARA ESTA VARIABLE SE PRESENTAN EN LA COLUMNA 6, Y SU RECÍPROCO CORRESPONDIENTE, EN LA COLUMNA 7.

LA SATURACIÓN DE AGUA EN EL EXTREMO PRODUCTOR DE LA MUESTRA (S_{w2}), ES DETERMINADO A PARTIR DE SU HISTORIA DE SATURACIÓN, ES DECIR, DE LAS GRÁFICAS DE \bar{S}_w VS Q_1 Y/O, \bar{S}_w VS $1/Q_1$, FIGURAS 4.1 Y 4.2, RESPECTIVAMENTE, EN LA FORMA SIGUIENTE:

SOBRE LA CURVA DE LA GRÁFICA \bar{S}_w VS Q_1 , SE TRAZAN LÍNEAS TANGENTES EN CADA PUNTO, COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA 4.1, PROLONGANDO DICHAS RECTAS HASTA CORTAR EL EJE DE LAS SATURACIONES (ORDENADAS), SE OBTIENE. PARA CADA PUNTO DE CORTE UN VALOR DE SATURACIÓN, EL CUAL, CORRESPONDE, PRECISAMENTE, A LA SATURACIÓN DE AGUA EN EL EXTREMO PRODUCTOR DE LA MUESTRA, $S_{w2}(Q_1)$, PARA CADA ÉTAPA DURANTE EL DESPLAZAMIENTO. GENERANDO DE ESTA MANERA UN PERFIL PARCIAL DE S_{w2} .

LOS VALORES RESTANTES DE S_{w2} , SON OBTENIDOS DE LA GRÁFICA DE \bar{S}_w VS $1/Q_1$, FIGURA 4.2, SIGUIENDO UN PROCESO SIMILAR AL MENCIONADO, ES DECIR, SE TRAZAN LÍNEAS TANGENTES A LA CURVA Y SE CONTINÚAN HASTA CORTAR EL EJE DE LAS ORDENADAS, DETERMINANDO

PARA EL PUNTO DE INTERCEPCIÓN, UN VALOR DE SATURACIÓN QUE ES DESIGNADO POR S_{w2}^+ , Y LA SATURACIÓN EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA, ES CALCULADO CON LA SIGUIENTE ECUACIÓN:

$$S_{w2}(1/Q_1) = 2\overline{S_w} - S_{w2}^+ \quad (75)$$

LOS VALORES OBTENIDOS EN AMBOS CASOS PARA ESTA VARIABLE SE PRESENTAN EN LA COLUMNA 8.

EL FLUJO FRACCIONAL DE ACEITE, COLUMNA 9, (TABLA 4.2), ES CALCULADO CON LA ECUACIÓN:

$$f_{o2} = \frac{\overline{S_w} - S_{w2}}{Q_1} \quad (76)$$

O SEA, (COLUMNA 5) MENOS (COLUMNA 8) ENTRE (COLUMNA 6)

POR LO TANTO, EL FLUJO FRACCIONAL DE AGUA (f_{w2}), INCLUIDO EN LA COLUMNA 10, ES IGUAL A:

$$f_{w2} = 1 - f_{o2} \quad (77)$$

1 TIEMPO (τ) (seg)	2 N_p (cm^3)	3 W_p (cm^3)	4 W_1 = (2) + (3)	5 $\frac{W}{S_w}$ = $S_{w1} \cdot (2) / W_p$	6 Q_1 = (4) / V_p	7 $1/Q_1$ = $W_p / (4)$	8 S_{w2} Valor Interceptado.
0	0.000	0.00	1.000	0.2020	0.000	—	0.2020
50	1.040	0.01	1.041	0.3343	0.124	7.49	0.3020
70	1.420	0.03	1.450	0.3620	0.104	8.42	0.2610
100	1.770	0.03	2.300	0.4270	0.292	3.42	0.3325
160	2.100	1.80	3.900	0.4690	0.498	2.02	0.3860
272	2.500	4.80	7.00	0.5120	0.850	1.12	0.4260
487	2.700	10.70	13.40	0.5452	1.704	0.587	0.4661
800	2.920	22.90	25.90	0.5732	3.29	0.304	0.5294
1441	3.120	47.77	50.90	0.5999	3.47	0.153	0.5580
2584	3.350	97.57	100.90	0.6233	12.82	0.0780	0.5966
4772	3.450	187.45	200.90	0.6406	25.54	0.0392	0.6202
8906	3.520	297.35	400.90	0.6533	50.97	0.0196	0.6456
				0.6640	OC	0.0000	0.6640

$\Delta p = 0.9678 \text{ atm.}$

$V_p = 7.866 \text{ cm}^3.$

$S_{w1} = 20.20 \%$ $v_w = 0.860 \text{ ep.}$ $K_0 = 26.92 \text{ mD.}$ $e = S_{w1} = 20.2 \%$

$v_p = 0.990 \text{ ep.}$ $v_0 = 2.250 \text{ ep.}$ $K = 29.31 \text{ mD.}$

TABLA No. 4.1.- Datos para calcular permeabilidades relativas obtenidos de una prueba de desplazamiento en régimen transitorio. Pozo Muspac No. 1.

9 f_{02} $\frac{(5) - (6)}{(6)}$	10 U_{E2} $= 1.0 - (8)$	11 Log ρ Pendiente de U_1 vs ρ	12 ρ $\frac{(4)}{(1) \times (11)}$	13 U_E $\frac{0.0491}{(18)}$	14 U_{E2} Valor intercalado.	15 K_{RO} $\frac{2.25 \times (9)}{(14)}$	16 K_{RW} $\frac{0.88 \times (10)}{(14)}$	17 $\frac{K_{RO}}{K_{RW}}$ $= (15) / (16)$
0.9873	0.0127	1.039	0.020	4.204	5.040	0.4368	0.0097	45.2
0.9803	0.0197	0.984	0.022	3.820	4.790	0.3102	0.0610	5.09
0.3236	0.6764	0.869	0.024	3.502	4.328	0.1893	0.1348	1.28
0.1832	0.8168	0.847	0.027	3.113	3.850	0.0895	0.1891	0.473
0.0717	0.9283	0.812	0.032	2.627	3.470	0.0468	0.2301	0.202
0.0275	0.9725	0.794	0.036	2.335	2.670	0.0232	0.3132	0.074
0.0136	0.9864	0.824	0.039	2.185	2.418	0.0127	0.3813	0.036
0.0118	0.9882	0.869	0.041	2.080	2.318	0.0118	0.3671	0.031
0.0023	0.9977	0.872	0.045	1.868	2.031	0.0028	0.4228	0.0059
0.0008	0.9992	0.908	0.047	1.788	1.912	0.0009	0.4494	0.0020
0.0002	0.9998	0.924	0.049	1.715	1.790	0.0003	0.4804	0.0006
0.0000	1.0000	—	—	1.640	1.640	0.0000	0.5244	0.0000

$$(\Delta\rho/\rho) = 0.9873 / 0.0127 = 11.3993 \text{ (cm/cm/seg)} \times S_w \times 100 \%$$

$$U_E = (0.99 \times (0.9873 / \rho)) / 11.3993 = 0.0841 / \rho ; \rho = \text{variable.}$$

TABLA No.4.2.- Cálculo de permeabilidades relativas a partir de datos obtenidos de una prueba de desplazamiento en régimen transitorio. Pozo Muspac No. 1.

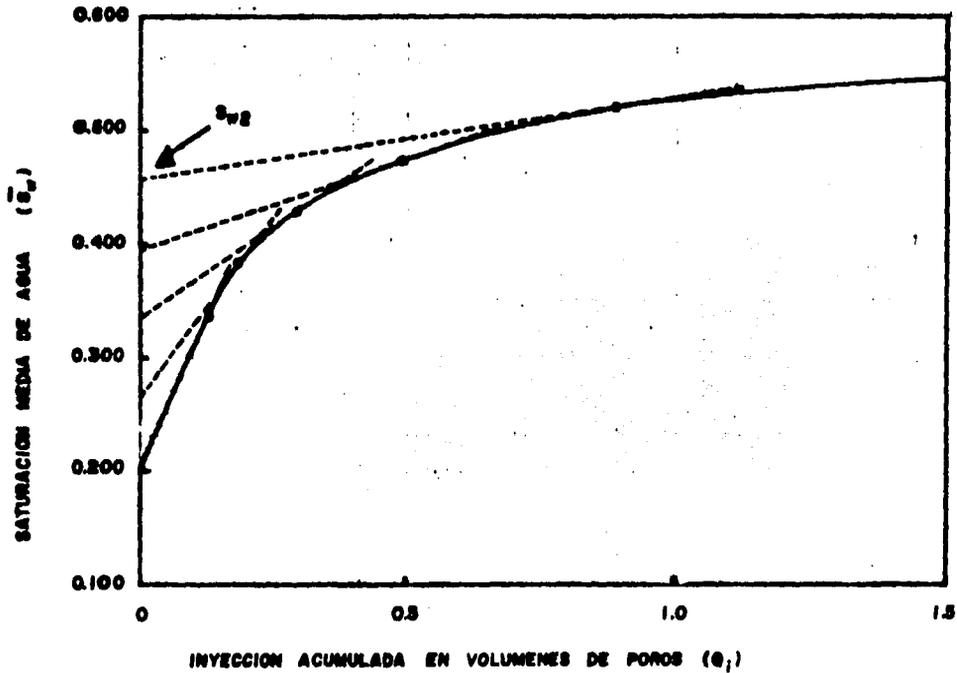


Figure No. 4.1:- GRAFICA PARA DETERMINAR s_{w2} EN FUNCION DE LA SATURACION MEDIA, POZO MURMAC No. 1.

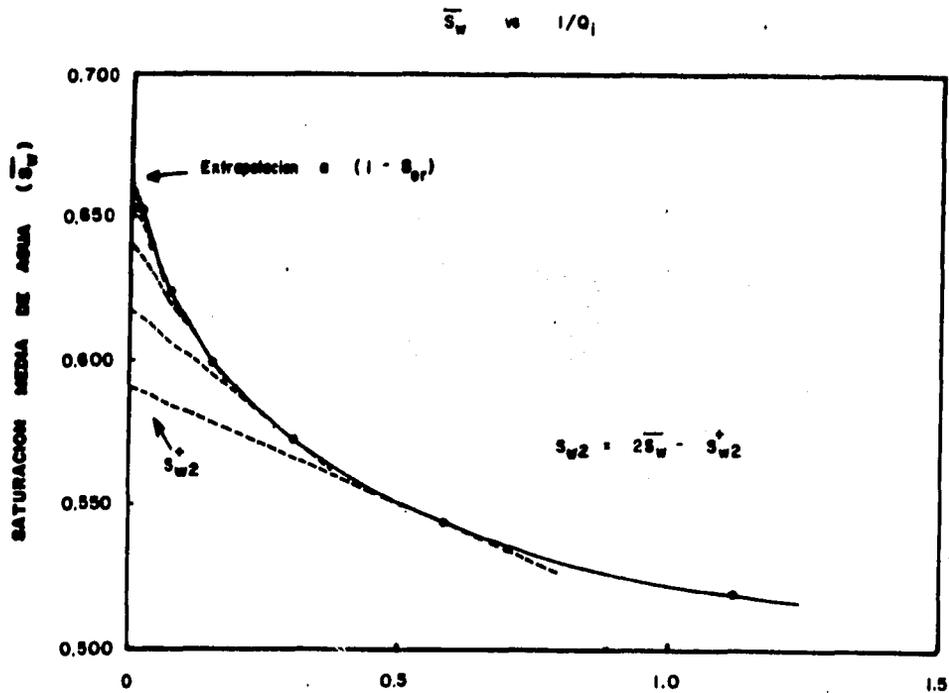


Figura No. 4.2.- GRAFICA PARA DETERMINAR s_{w2} A VALORES ALTOS DE INYECCION, MOSTRANDO LA EXTRAPOLACION A $(1 - s_{gr})$. POZO MUSPAC No. 1.

ENTONCES, EL GASTO INSTANTÁNEO DE INYECCIÓN DE AGUA (Q), ES DETERMINADO PARA ASÍ CALCULAR LA VISCOSIDAD EFECTIVA MEDIA, - ESTA SE OBTIENE DE LA PENDIENTE DE LA CURVA DE LA INYECCIÓN ACUMULADA (W_I), EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (T), EN ESCALAS LOGARÍTMICAS, FIGURA 4.3, CON EL FIN DE TENER UNA MAYOR APROXIMACIÓN. ASÍ SE LEEN VALORES DE TIEMPO POR CADA CICLO EN EL EJE DE LAS ORDENADAS (W_I), OBTENIENDO DE ESTA FORMA LA PENDIENTE POR CICLO (M), ES DECIR

$$M = \frac{\text{LOG} (\Delta W_I)}{\text{LOG} (\Delta T)} = \frac{\text{LOG} (10)}{\text{LOG} (\Delta T)} \quad (78)$$

QUE PODEMOS EXPRESAR COMO:

$$M = \frac{1}{\text{LOG} (\Delta T)}$$

QUE SE ENLISTAN EN LA COLUMNA 11, Y LA PENDIENTE DE LA CURVA PARA CADA PUNTO ESTARÁ DADA POR:

$$Q = \frac{W_I}{T (\text{LOG} \Delta T)} \quad (79)$$

LOS VALORES DETERMINADOS PARA Q, SE PRESENTAN EN LA COLUMNA 12.

LA VISCOSIDAD EFECTIVA MEDIA SE ENCUENTRA RELACIONANDO LA ($\Delta P/Q$)

MEDIDA DURANTE EL DESPLAZAMIENTO Y LA ($\Delta P/Q$)_B

DETERMINADA DURANTE LA OBTENCIÓN DE LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA DE LA MUESTRA, O SEA

$$\bar{u}_E = \frac{u_B (\Delta P/q)}{(\Delta P/q)_B} \quad (80)$$

DONDE; u_B ES LA VISCOSIDAD DEL FLUIDO UTILIZADO EN LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA.

LOS VALORES DE VISCOSIDAD EFECTIVA MEDIA CALCULADOS SE ENLISTAN EN LA COLUMNA 13.

LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA, FIGURA 4.4, PARA DETERMINAR VALORES DE VISCOSIDAD EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA ES SIMILAR A LA QUE SE ELABORÓ PARA DETERMINAR LA SATURACIÓN EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA (S_{w2}), FIGURA 4; SIGUIENDO EL MISMO PROCEDIMIENTO, SE TRAZAN LÍNEAS TANGENTES A LA CURVA Y SE PROLONGAN HASTA INTERCEPTAR EL EJE DE LAS ORDENADAS, ENCONTRÁNDOSE PARA EL PUNTO DE CRUCE EL VALOR DE VISCOSIDAD EFECTIVA EXISTENTE EN ESE MOMENTO EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA, (u_{E2}).

EL COMPLEMENTO DE LA VISCOSIDAD EFECTIVA EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA, COMO EN EL CASO DE LAS SATURACIONES, PARA ALTOS VOLUMENES DE INYECCIÓN, ES DETERMINADA ELABORANDO UNA GRÁFICA DE \bar{u}_E VS $1/Q_1$, FIGURA 4.5, Y TANTO EL PROCEDIMIENTO PARA -

CALCULAR u_{E2} , COMO LA EXTRAPOLACIÓN PARA UNA INYECCIÓN INFINITA ($1/Q_1 = 0$), ES TOTALMENTE ANÁLOGO AL UTILIZADO EN LA DETERMINACIÓN DE $S_{w2}(1/Q_1)$, FIGURA 4.2, ES DECIR, SE TRAZAN TANGENTES A LA CURVA Y LOS VALORES DE VISCOSIDAD INTERCEPTADOS SE DENOMINAN COMO u_{E2}^+ , ES

$$u_{E2} = 2\bar{u}_E - u_{E2}^+ \quad (81)$$

LOS VALORES OBTENIDOS PARA u_{E2} , EN AMBOS CASOS SE PRESENTAN EN LA COLUMNA 14.

LA PERMEABILIDAD RELATIVA AL ACEITE (K_{RO}), COLUMNA 15, ES CALCULADA EMPLEANDO LA ECUACIÓN (70), ES DECIR, MULTIPLICANDO LA VISCOSIDAD DEL ACEITE POR EL FLUJO FRACCIONAL DE ACEITE, COLUMNA 9, Y DIVIDIÉNDOLO ENTRE LA VISCOSIDAD EFECTIVA EXISTENTE EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA, COLUMNA 14.

LA PERMEABILIDAD RELATIVA AL AGUA (K_{RW}), SE CALCULA APLICANDO LA ECUACIÓN (71), LOS VALORES ENCONTRADOS PARA ESTA VARIABLE SE PRESENTAN EN LA COLUMNA 16.

LA RELACIÓN DE PERMEABILIDADES RELATIVAS SE CALCULA DIVIDIENDO LA PERMEABILIDAD RELATIVA AL ACEITE ENTRE LA PERMEABILIDAD RELATIVA AL AGUA, ES DECIR, COLUMNA 15, ENTRE COLUMNA 16, Y ES INCLUIDA EN LA COLUMNA 17.

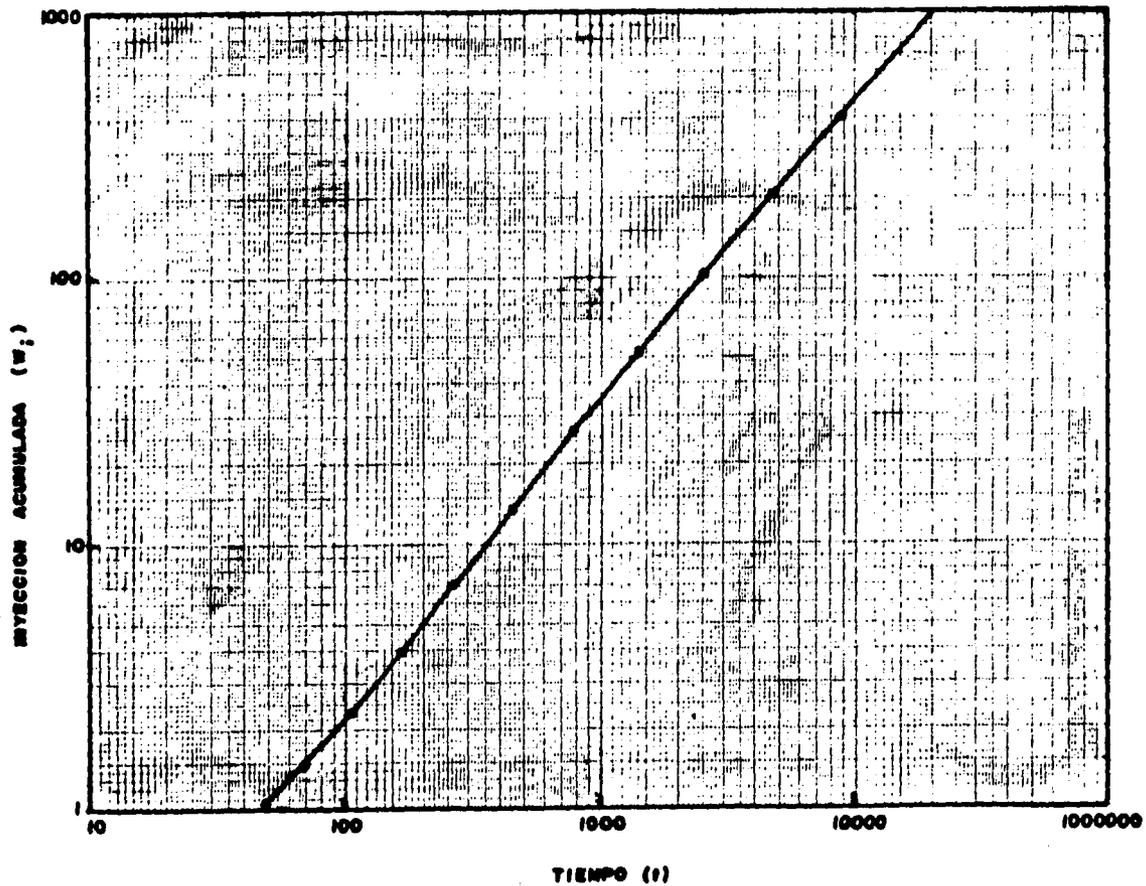


Figura No. 4.3.- GRAFICA DE INYECCION ACUMULADA EN FUNCION DEL TIEMPO.

\bar{u}_R vs ϕ_1

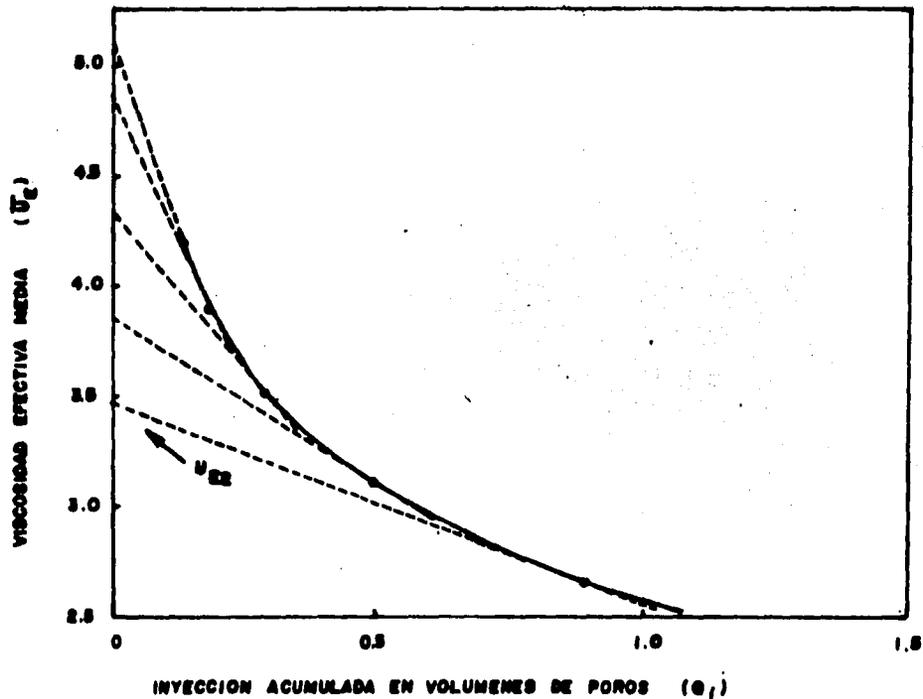


Figura No. 4.4.- GRAFICA PARA OBTENER \bar{u}_R EN FUNCION DE LA VISCOSIDAD EFECTIVA MEDIA. POZO MUSPAC No. 1.

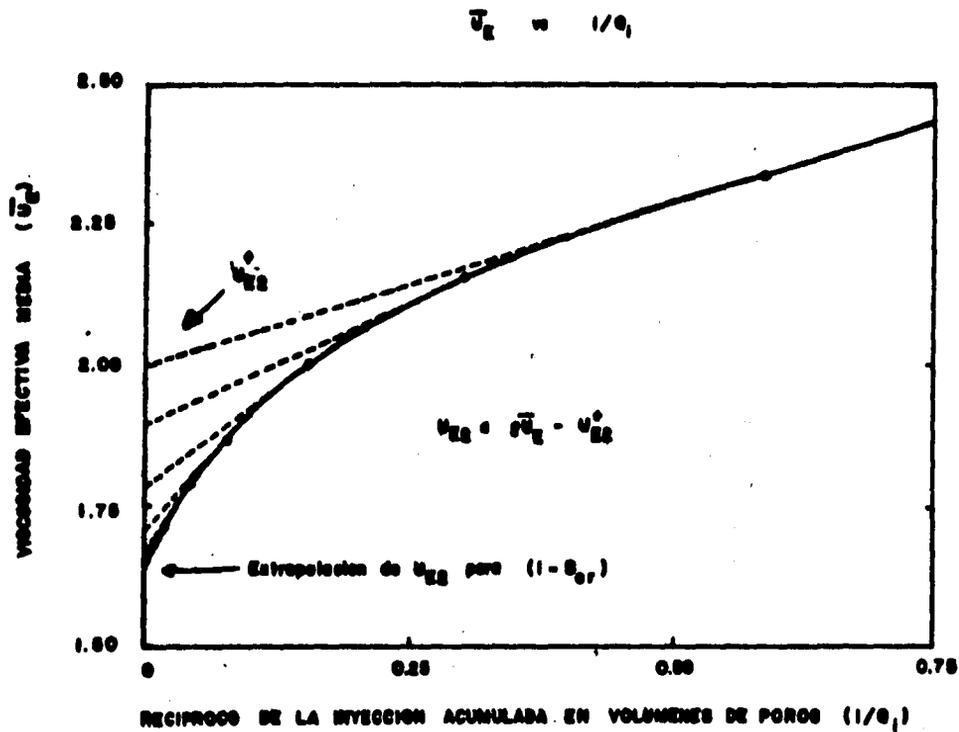


Figura No. 4.5.- GRÁFICA PARA DETERMINAR u_{E0} . A VALORES ALTOS DE -
 INYECCIÓN. POZO MUSPAC No.1.

LA FIGURA 4.6. MUESTRA LAS CURVAS DE LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS A CADA UNA DE LAS FASES EN FUNCIÓN DE LA SATURACIÓN DE AGUA, DETERMINADAS POR EL MÉTODO DESARROLLADO Y LAS CALCULADAS CON UN PROGRAMA MECANIZADO QUE SE BASA EN LAS ECUACIONES DE JOHNSON, EN LA CUAL OBSERVAMOS QUE DICHAS CURVAS SON DIRECCIONALES, PRINCIPIANDO CON LA SATURACIÓN MÁS BAJA DE AGUA, O SEA, LA SATURACIÓN IRREDUCTIBLE DE AGUA (S_{WI}), SIGUIENDO HACIA LA IZQUIERDA HASTA ALCANZAR UNA SATURACIÓN DE AGUA IGUAL A $(1-S_{OR})$, PARA UNA INYECCIÓN INFINITA. ADEMÁS SE OBSERVA QUE LOS VALORES OBTENIDOS POR AMBOS MÉTODOS SON MUY SEMEJANTES.

LA RELACIÓN DE PERMEABILIDADES RELATIVAS K_{RO}/K_{RW} , OBTENIDA, SE MUESTRA GRÁFICAMENTE EN LA FIGURA 4.7, Y LA CURVA DE FLUJO FRACCIONAL DE AGUA EN LA FIGURA 4.8.

●● Cálculo con el método Jones.
 ▲▲ Cálculo con el método Johnson.

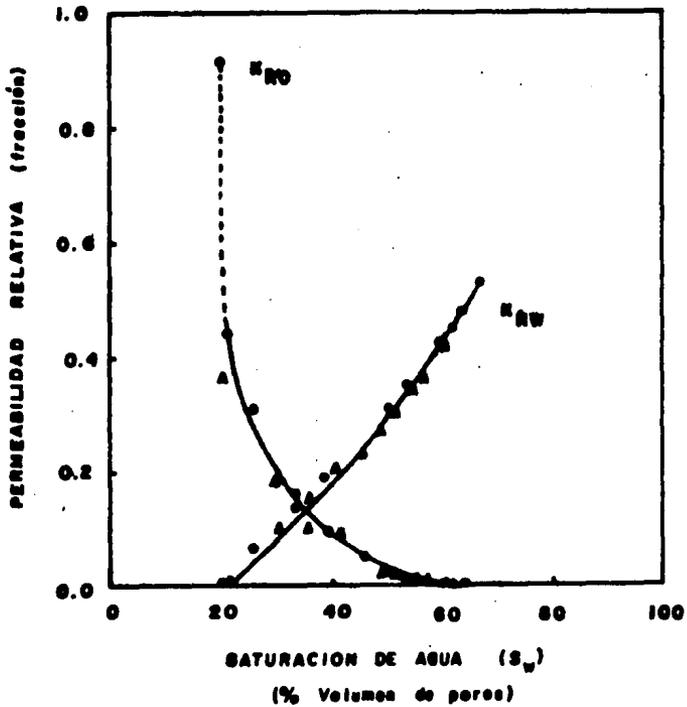


Figura No. 4.6- PERMEABILIDADES RELATIVAS AL AGUA Y AL ACEITE EN FUNCION DE LA SATURACION DE AGUA. DESPLAZAMIENTO CON AGUA DULCE. POZO MUSPAC No. 1.

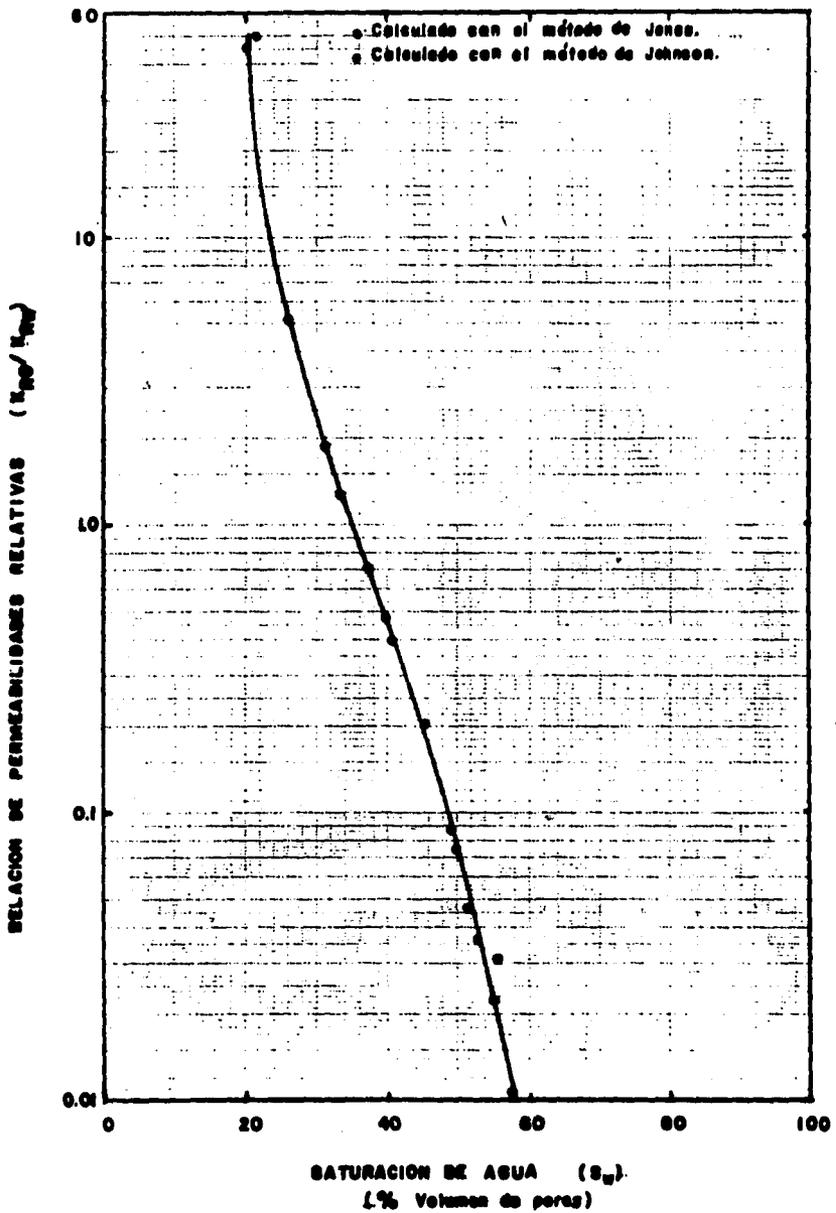


Figura No. 4.7: RELACION DE PERMEABILIDADES RELATIVAS ACEITE -
 AGUA EN FUNCION DE LA SATURACION DE AGUA. -
 POZO MUSPAC No. 1.

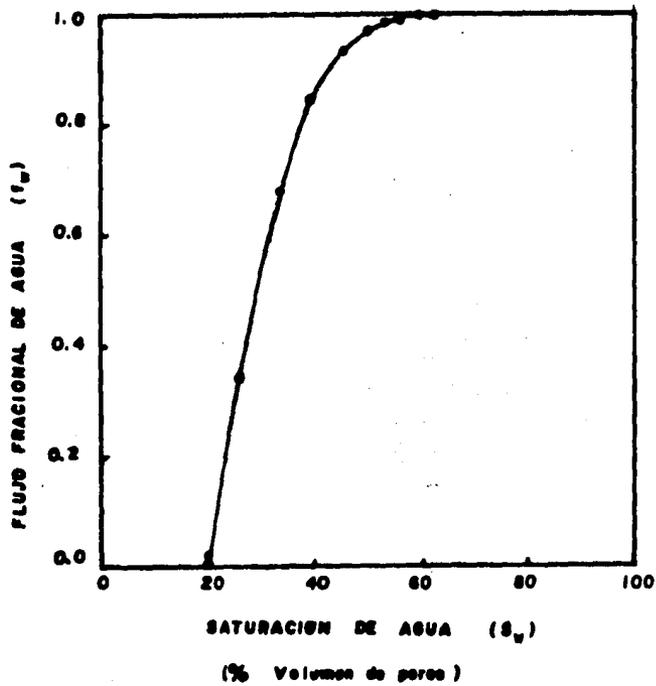


Figura No. 4.8.- FLUJO FRACCIONAL EN FUNCION DE LA SATURACION DE AGUA. POZO MUSPAC - No. 1.

CONCLUSIONES

- 1.- EL MÉTODO PRESENTADO EN ESTE TRABAJO PUEDE APLICARSE PARA CALCULAR PERMEABILIDADES RELATIVAS A CADA FASE, EN UN SISTEMA AGUA-ACEITE, A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS EN UNA PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO EN RÉGIMEN TRANSITORIO.
- 2.- EL DESARROLLO DEL MÉTODO CONSISTE EN ELABORAR UN CONJUNTO DE GRÁFICAS CON BASE EN LA HISTORIA DE INYECCIÓN A UNA MUESTRA DEL YACIMIENTO.
- 3.- LA SECUENCIA DE CÁLCULO PERMITE DETERMINAR VALORES CONFIABLES DE LA SATURACIÓN EN EL PLANO DE SALIDA DE LA MUESTRA EN FUNCIÓN DE SU SATURACIÓN MEDIA.
- 4.- SE LOGRA CORRELACIONAR LA SATURACIÓN EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA CON UN VALOR COMPATIBLE DE LA RELACIÓN DE PERMEABILIDADES RELATIVAS.

5.- LA CONSTRUCCIÓN DE LAS GRÁFICAS Y EL CÁLCULO DE PERMEABILIDADES RELATIVAS A CADA FASE NO REQUIERE DEMASIADO TIEMPO.

6.- LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS A CADA FASE SE OBTIENEN CON MAYOR FACILIDAD Y APROXIMACIÓN USANDO EL MÉTODO GRÁFICO MOSTRADO, YA QUE DICHAS GRÁFICAS SON EQUIVALENTES A LAS ECUACIONES DESARROLLADAS POR JOHNSON Y WELGE.

7.- DADO QUE LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS DEPENDEN DE LA HISTORIA DE SATURACIÓN, EL PROCESO DE INYECCIÓN DE AGUA SE PUEDE PREDECIR CON MAYOR PRECISIÓN POR EL MÉTODO DE RÉGIMEN TRANSITORIO.

8.- DE LA GRÁFICA DE PERMEABILIDADES RELATIVAS, SE OBSERVA QUE LA MAYORÍA DE LOS PUNTOS OBTENIDOS PARA CADA CURVA, EN CADA ETAPA, SIGUEN UNA TENDENCIA MUY UNIFORME, LO CUAL PUEDE AYUDAR PARA COMPROBAR LO MENCIONADO ANTERIORMENTE.

9.- LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS OBTENIDAS POR ESTE MÉTODO, SON REFERIDAS A LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA DE LA MUESTRA.

10.- LAS CURVAS DE FLUJO FRACCIONAL OBTENIDAS DEL EXPERIMENTO, SON CÓNCAVAS HACIA ABAJO CUANDO LA FASE DESPLAZANTE ES GRAFICADA.

11.- EN TÉRMINOS GENERALES, LOS PRINCIPIOS Y BASES DESARROLLA
DOS EN ESTE MÉTODO PARA DESPLAZAMIENTOS DE ACEITE POR AGUA,
PUEDEN SER IGUALMENTE APLICABLES AL CASO DE DESPLAZAMIENTO DE
ACEITE POR GAS, HACIENDO CIERTAS MODIFICACIONES A LOS VOLÚME-
NES DE GAS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO.

A P E N D I C E S

APENDICE A.

TEORIA DE BUCKLEY-LEVERETT.

UNA DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL FLUJO DE FLUIDOS EN UN MEDIO POROSO, PUEDE SER OBTENIDO EMPLEANDO EL PRINCIPIO DE LA LEY DE CONSERVACIÓN DE MASA, EN BASE A LA IDEA DEL LLAMADO PISTÓN CON FUGAS; LO QUE SIGNIFICA QUE MIENTRAS EL DESPLAZAMIENTO PUEDE CONSIDERARSE DE TIPO PISTÓN, EXISTE UNA CIERTA CANTIDAD DE ACEITE QUE QUEDA ATRÁS DE LA CARA DEL PISTÓN IMAGINARIO.

EL MODELO MATEMÁTICO BAJO EL CUAL SE DESARROLLA ESTA TEORÍA ESTÁ CONSTITUIDO POR UN ELEMENTO LINEAL, DE LA MUESTRA EN EL QUE POR MEDIO DE UN BALANCE DE MATERIA DE FLUIDO QUE ENTRA Y SALE, SE DESARROLLA UNA ECUACIÓN PARA FLUJO EN DOS FASES. EL MECA-

NISMO IMPLICA LA FORMACIÓN DE UN FRENTE DE DESPLAZAMIENTO TRAS EL CUAL SE ESTABLECE UN GRADIENTE DE SATURACIÓN DE ACEITE, QUE DECRECE HASTA EL VALOR DE LA SATURACIÓN RESIDUAL DE ACEITE EN LA CARA POR DONDE ENTRA EL FLUIDO DESPLAZANTE.

LAS PRINCIPALES LIMITACIONES DE ESTA TEORÍA SON LAS SIGUIENTES:

- A).- SE SUPONE FLUJO LINEAL,
- B).- QUE LA ROCA ES HOMOGÉNEA,
- C).- LOS FLUIDOS SON INMISCIBLES,
- D).- FLUJO CONTINUO, Y
- E).- PRESIÓN Y TEMPERATURA CONSTANTES.

EL MEDIO POROSO SE CONSIDERA IDEALIZADO, DE GEOMETRÍA REGULAR E ISOTRÓPICA EN SUS PROPIEDADES FÍSICAS.

ECUACION DE BUCKLEY-LEVERETT.

CONSIDERANDO UN CUERPO POROSO HOMOGÉNEO DE SECCIÓN TRANSVERSAL UNIFORME A , DE LONGITUD L , Y DE POROSIDAD \emptyset , COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA A.1.

HACIENDO UN BALANCE DE MATERIA EN UN VOLUMEN POROSO DIFERENCIAL, Y CONSIDERANDO QUE CONTIENE DOS FLUIDOS, EL FLUIDO DESPLAZANTE, AGUA Y EL FLUIDO DESPLAZADO, ACEITE, EN EL CASO DE

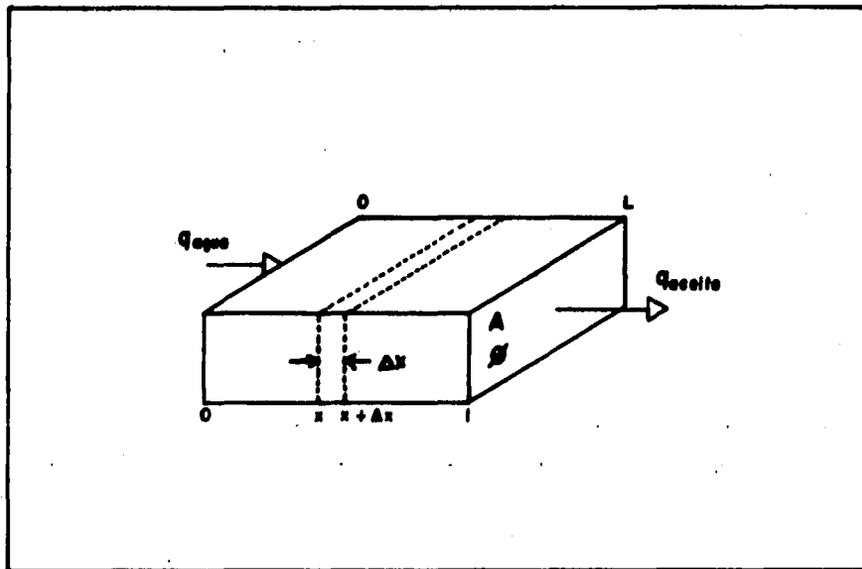


Figure No. A.1:- VOLUMEN POROSO UNITARIO.

FLUJO EN RÉGIMEN PERMANENTE A PRESIÓN Y TEMPERATURA CONSTANTE CON EL TIEMPO, Y SUPONIENDO QUE EL GASTO QUE ESTÁ PASANDO POR LA CARA DE ENTRADA ES IGUAL AL GASTO QUE ESTÁ PASANDO POR LA CARA DE SALIDA, SE TIENE LA SIGUIENTE ECUACIÓN:

$$\left(\begin{array}{c} \text{VOLUMEN DE FLUIDO} \\ \text{QUE ENTRA} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{VOLUMEN DE FLUIDO} \\ \text{QUE SALE} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{ACUMULACIÓN} \\ \text{DE FLUIDO} \end{array} \right)$$

ENTONCES, EL VOLUMEN DE FLUIDO QUE ENTRA AL ELEMENTO DIFERENCIAL EN UN TIEMPO, dt , ESTÁ DADO POR:

$$\left(\int_{D1} q_T dt \right) \quad (A.1)$$

EL VOLUMEN DE FLUIDO QUE SALE DEL ELEMENTO DIFERENCIAL EN UN TIEMPO, dt , ESTÁ DADO POR:

$$\left(\int_{D2} q_T dt \right) \quad (A.2)$$

LA ACUMULACIÓN DE FLUIDO DENTRO DEL ELEMENTO DIFERENCIAL, DURANTE EL INTERVALO DE TIEMPO, dt , ESTÁ REPRESENTADO POR LA ECUACIÓN:

$$\Delta A dx \left(S_{D2} - S_{D1} \right) \quad (A.3)$$

POR LO TANTO, DE LA ECUACIÓN DE BALANCE DE MATERIA SE TIENE:

$$(f_{D1} Q_T dT) - (f_{D2} Q_T dT) = \emptyset A dx (S_{D2} - S_{D1}) \quad (A.4)$$

FACTORIZANDO EL PRIMER TÉRMINO, TENEMOS QUE:

$$Q_T dT (f_{D1} - f_{D2}) = \emptyset A dx (S_{D2} - S_{D1}) \quad (A.5)$$

DE DONDE:

$$\frac{dx}{dT} = \frac{Q_T}{\emptyset A} \left(\frac{f_{D1} - f_{D2}}{S_{D2} - S_{D1}} \right) \quad (A.6)$$

EXPRESANDO LA ECUACIÓN ANTERIOR EN FORMA DIFERENCIAL, LA ECUACIÓN QUEDA:

$$\frac{dx}{dT} = \frac{Q_T}{\emptyset A} \left(\frac{df_D}{dS_D} \right) \quad (A.7)$$

ESTA ECUACIÓN PROPORCIONA EL RITMO DE AVANCE DEL FLUIDO DESPLAZANTE INYECTADO DENTRO DEL CUERPO POROSO, DESPEJANDO dx , DE LA ECUACIÓN (A.7), SE TIENE:

$$dx = \frac{Q_T}{\emptyset A} \left(\frac{df_D}{dS_D} \right) dT \quad (A.8)$$

DEBIDO A QUE LA POROSIDAD, EL GASTO Y EL ÁREA SE MANTIENEN -
 CONSTANTES PARA CUALQUIER VALOR DE SATURACIÓN DE FLUIDO DESPLA-
 ZANTE, S_D , LA DERIVADA (df_D / dS_D) ES CONSTANTE PARA UN
 INTERVALO DE TIEMPO, dT , DADO, INTEGRANDO SE LLEGA A LA SI-
 GUIENTE ECUACIÓN:

$$\int_0^x dx = \frac{Q_T}{\emptyset A} \left(\frac{df_D}{dS_D} \right) \int_0^T dT \quad (A.9)$$

ES DECIR:

$$x = \frac{Q_T}{\emptyset} \frac{T}{A} \left(\frac{df_D}{dS_D} \right) \quad (A.10)$$

LA ECUACIÓN (A.10), ES CONOCIDA COMO ECUACIÓN DE BUCKLEY Y LE-
 VERETT, LA CUAL PERMITE CALCULAR LA DISTANCIA QUE HA RECORRIDO
 EL FRENTE DE AVANCE, DENTRO DEL NÚCLEO, DESPUÉS DE UN TIEMPO T.

APENDICE B.

RELACION ENTRE EL VOLUMEN ACUMULATIVO DE INYECCION Y LA SATURACION EN LA CARA DE PRODUCCION DE LA MUESTRA.

PARA EL CASO DE DESPLAZAMIENTO POR UN FLUIDO INMISCIBLE Y TOMANDO EN CUENTA EL VOLUMEN DE INYECCION EN VEZ DEL GASTO VOLUMÉTRICO SE TIENE LA SIGUIENTE ECUACION:

$$W_I = Q_T \times T \quad (B.1)$$

DESPUÉS DE UN TIEMPO T, LA POSICIÓN DEL FRENTE DE DESPLAZAMIENTO ESTARÁ DADO POR:

$$x = \frac{W_I}{\emptyset A} \left(\frac{df_D}{dS_D} \right)_{S_D (SD_f)} \quad (B.2)$$

REFIRIENDO LA ECUACION ANTERIOR A LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA, SE ENCUENTRA QUE:

$$L = \frac{W_I}{\emptyset A} \left(\frac{df_D}{dS_D} \right)_{S_D (SD_2)} \quad (B.3)$$

DE LA CUAL SE OBTIENE LA SIGUIENTE EXPRESIÓN:

$$\emptyset AL = W_I \left(\frac{df_D}{dS_D} \right) S_D (S_{D2}) \quad (B.4)$$

PERO

$$\emptyset AL = V_P$$

ENTONCES, LA ECUACIÓN (B.4), QUEDA:

$$V_P = W_I \left(\frac{df_D}{dS_D} \right) S_D (S_{D2}) \quad (B.5)$$

SI EXPRESAMOS EL VOLUMEN ACUMULATIVO DE INYECCIÓN EN VOLÚMENES DE POROS, TENEMOS QUE:

$$1 = \frac{W_I}{V_P} \left(\frac{df_D}{dS_D} \right) S_D (S_{D2}) \quad (B.6)$$

SI DESIGNAMOS A:

$$Q_I = \frac{W_I}{V_P} \quad (B.7)$$

SUBSTITUYENDO LA ECUACIÓN (B.7) EN LA ECUACIÓN (B.6), SE TIENE QUE:

$$1 = Q_1 \left(\frac{df_D}{dS_D} \right) S_D(S_{D2}) \quad (B.8)$$

DE DONDE SE OBTIENE:

$$Q_1 = \frac{1}{\left(\frac{df_D}{dS_D} \right) S_D(S_{D2})} \quad (B.9)$$

CONSIDERANDO QUE:

$$f'_{D2} = \left(\frac{df_D}{dS_D} \right) S_D(S_{D2}) \quad (B.10)$$

POR LO TANTO, RESULTA QUE:

$$Q_1 = \frac{1}{f'_{D2}} \quad (B.11)$$

ESTA ECUACIÓN HACE POSIBLE RELACIONAR INDEPENDIENTEMENTE AL AGUA ACUMULATIVA INYECTADA CON LA SATURACIÓN DE AGUA EN EL EXTREMO PRODUCTOR DE LA MUESTRA.

APENDICE C.

DETERMINACION DE LA SATURACION DE FLUIDO DESPLAZANTE EN LA CARA DE PRODUCCION DE LA MUESTRA.

EN UN PROCESO DE DESPLAZAMIENTO, EL FLUIDO DESPLAZANTE INVADE LOS ESPACIOS POROSOS Y DESPLAZA EL ACEITE CONTENIDO EN ELLOS, FORMANDO UN FRENTE DE INVASIÓN Y CAUSANDO, POR LO TANTO, UN INCREMENTO EN LA SATURACIÓN DE DICHO FLUIDO, LO CUAL ORIGINA QUE HAYA UNA VARIACIÓN EN LA SATURACIÓN DE LOS FLUIDOS DENTRO DE LA MUESTRA EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN POROSO INVADIDO. POR CONSIGUIENTE, ES NECESARIO CONOCER LA HISTORIA DE SATURACIÓN EN ALGÚN PUNTO DENTRO DE LA MUESTRA, PARA PODER CALCULAR LAS PERMEABILIDADES RELATIVAS.

EL PUNTO EN EL CUAL SE REQUIERE CONOCER LOS VALORES DE SATURACIÓN, SERÁ AQUEL PUNTO DONDE EL FLUJO FRACCIONAL SEA IGUAL AL CORTE PRODUCIDO, YA SEA DEL FLUIDO DESPLAZANTE O DE ACEITE, POR LO TANTO, LA LOCALIZACIÓN MÁS APROPIADA SERÁ UN PUNTO INMEDIATO ANTERIOR A LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA, DONDE DEBE CUMPLIRSE LA SUPOSICIÓN ANTERIOR.

PARA DETERMINAR DICHAS SATURACIONES SE APLICA EL MÉTODO PRO-
PUESTO POR H. J. WELGE (1952), CON ÉL SE PUEDE OBTENER VALORES
DE SATURACIÓN EN LA CARA DE PRODUCCIÓN DE LA MUESTRA, CUANDO
SE CONOCE EL PERFIL COMPLETO DE SATURACIONES MEDIAS, A LO LAR-
GO DE TODA LA MUESTRA EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN POROSO INVADIDO
POR EL FLUIDO DESPLAZANTE INYECTADO.

EL MÉTODO DE WELGE, PARA DETERMINAR LA SATURACIÓN EN EL PUNTO
INMEDIATO ANTERIOR A LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA, CONSISTE
EN TRAZAR UNA LÍNEA TANGENTE A LA CURVA DE LA GRÁFICA DE LA SA-
TURACIÓN MEDIA \bar{S}_D , EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN POROSO INVADIDO Q_1 ,
HASTA CORTAR EL EJE DE SATURACIÓN MEDIA. WELGE DEMOSTRÓ QUE
EL VALOR DE LA SATURACIÓN EN EL PUNTO DE CORTE CORRESPONDE PRE-
CISAMENTE A LA SATURACIÓN DE FLUIDO DESPLAZANTE EN LA CARA DE
SALIDA DE LA MUESTRA, COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA C.1.

METODO MATEMATICO PARA LA OBTENCION DE LA SATURACION EN LA CARA
DE SALIDA DE LA MUESTRA.

CONSIDERANDO UN MEDIO POROSO DADO Y SU SISTEMA DE FLUIDOS, DE
SECCIÓN TRANSVERSAL UNIFORME A , LONGITUD L , Y POROSIDAD θ , CO-
MO EL MOSTRADO EN LA FIGURA C.2.

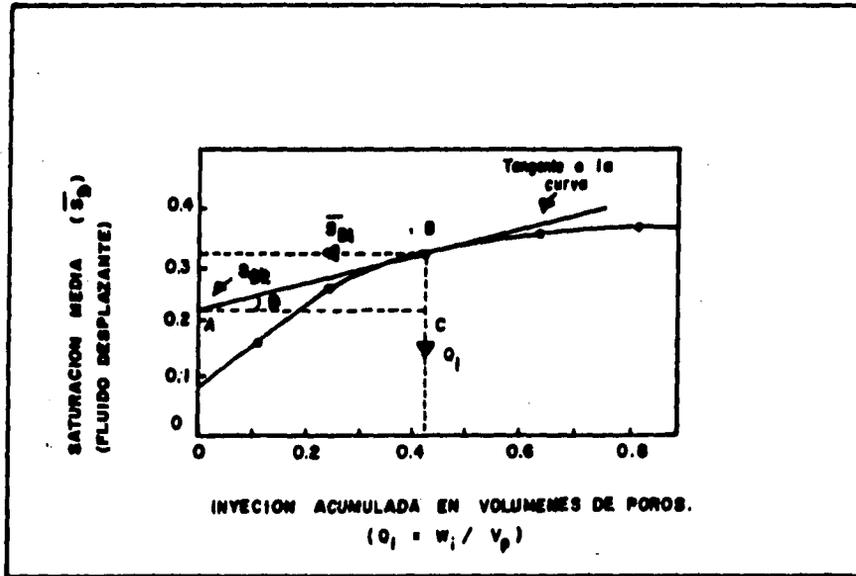


Figure No. C.1: REPRESENTACION GRAFICA PARA DETERMINAR LA SATURACION EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA A PARTIR DE LA SATURACION MEDIA.

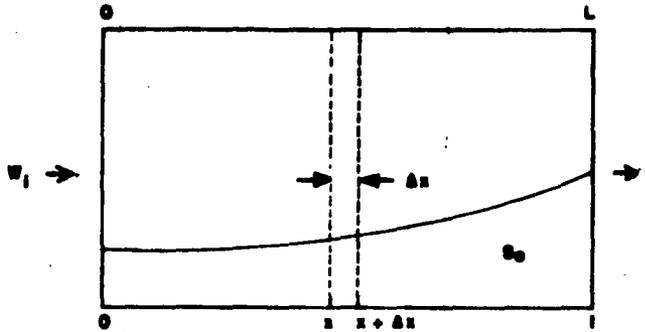
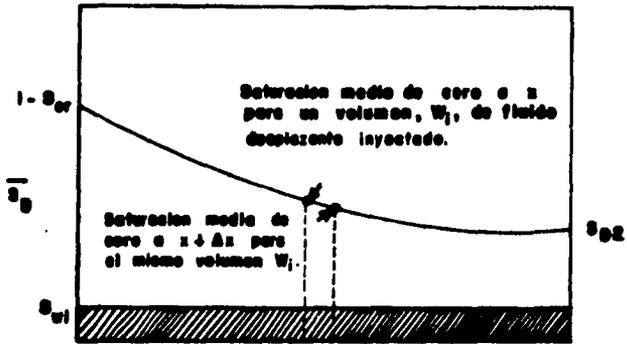


Figura No. C.2- RELACION ENTRE EL PERFIL DE SATURACION -
 Y LA HISTORIA DE INYECCION EN UN - -
 INSTANTE DADO DURANTE EL DESPLAZAMIENTO.

PARA UN MOMENTO DADO, EN EL CUAL SE HA INYECTADO UN CIERTO VOLUMEN DE FLUIDO DESPLAZANTE, LA SATURACIÓN SE PUEDE OBTENER A PARTIR DE SU DEFINICIÓN, ES DECIR:

$$S_D = \frac{V_{DI}}{V_P} \quad (C.1)$$

TOMANDO EN CUENTA UN ELEMENTO DIFERENCIAL DE ESPESOR Δx , EN EL CUERPO POROSO. EL ÁREA ENCERRADA EN EL INCREMENTO Δx , ES LA DIFERENCIA ENTRE LAS ÁREAS ENCERRADAS DE CERO A x , Y DE CERO A $x + \Delta x$. ESTAS ÁREAS SE PUEDEN EXPRESAR TAMBIÉN COMO UNA SATURACIÓN PROMEDIO A UN TIEMPO PARA UNA DISTANCIA APROPIADA. POR LO TANTO, PARA UN TIEMPO DADO EN EL CUAL EL FRENTE DE INVASIÓN HA RECORRIDO UNA DISTANCIA Δx , LA SATURACIÓN PROMEDIO EN EL VOLUMEN POROSO INVADIDO ES $(\phi A(x + \Delta x) - \phi Ax)$ Y SE PUEDE CALCULAR CON LA SIGUIENTE ECUACIÓN:

$$\bar{S}_D = \frac{\phi A \int_x^{x+\Delta x} S_D \, dx}{\phi A \int_x^{x+\Delta x} dx} \quad (C.2)$$

SI EL INCREMENTO DIFERENCIAL SE HACE TAN PEQUEÑO COMO SE QUIERA, ES DECIR, TENDIENTE A CERO, LA SATURACIÓN MEDIA TENDRÁ A LA SATURACIÓN EXISTENTE EN LA CARA DE SALIDA DEL INCREMENTO,

REPRESENTADA POR S_{D2} , Y POR ENDE, ES POSIBLE HACER LA SIGUIENTE TRANSFORMACIÓN:

$$S_{D2} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\int_x^{x+\Delta x} \overline{S_D} dx}{\Delta x} \quad (C.3)$$

YA QUE LA SATURACIÓN MEDIA DEPENDE ÚNICAMENTE DEL VOLUMEN DE POROS DE FLUIDO INYECTADO, Q_I / x , EN LA MUESTRA CONSIDERADA, ES DECIR, DE LA POSICIÓN RELATIVA DEL FRENTE DE INVASIÓN, SE TIENE QUE:

$$S_{D2}(Q_I, x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\int_x^{x+\Delta x} \overline{S_D}(Q_I, x) dx}{\Delta x} \quad (C.4)$$

REORDENANDO TÉRMINOS:

$$S_{D2}(Q_I, x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\int_0^{x+\Delta x} \overline{S_D}(Q_I, x) dx - \int_0^x \overline{S_D}(Q_I, x) dx}{\Delta x} \quad (C.5)$$

$$= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{(x + \Delta x) \overline{S_D}(Q_I, x + \Delta x) - (x) \overline{S_D}(Q_I, x)}{\Delta x} \right) \quad (C.6)$$

$$= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{(\Delta x) \overline{S_D(Q_1, x + \Delta x)}}{\Delta x} + \frac{(x) \overline{S_D(Q_1, x + \Delta x)}}{\Delta x} - \frac{(x) \overline{S_D(Q_1, x)}}{\Delta x} \right) \quad (C.7)$$

POR LO TANTO:

$$S_{D2}(Q_1, x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\overline{S_D(Q_1, x + \Delta x)} + \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{(x) \overline{S_D(Q_1, x + \Delta x)}}{\Delta x} - \frac{(x) \overline{S_D(Q_1, x)}}{\Delta x} \right) \right) \quad (C.8)$$

DE LA DEFINICIÓN DERIVADA Y TOMANDO LÍMITES, SE LLEGA A LA SIGUIENTE ECUACIÓN:

$$S_{D2}(Q_1, x) = \overline{S_D(Q_1, x)} + (x) \frac{\delta \overline{S_D(Q_1, x)}}{\delta x} \quad (C.9)$$

DADO QUE LA SATURACIÓN ES FUNCIÓN DEL VOLUMEN POROSO INVADIDO, SE DEFINE LA VARIABLE $z = Q_1 / x$, Y APLICANDO LA REGLA DE LA CADENA EN EL LADO DERECHO DE LA ECUACIÓN ANTERIOR SE TIENE QUE:

$$\frac{\delta \overline{S_D(Q_1, x)}}{\delta x} = \frac{\delta \overline{S_D(Q_1, x)}}{\delta z} \frac{\delta z}{\delta x} \quad (C.10)$$

COMO EL FLUJO OCURRE ÚNICAMENTE EN EL SENTIDO HORIZONTAL Y PUESTO QUE EL GASTO DE INYECCIÓN CORRESPONDE SOLAMENTE A LA FASE DESPLAZANTE, LA DERIVADA PARCIAL SE PUEDE TOMAR COMO UNA DERIVADA SIMPLE, ENTONCES:

$$\frac{\partial \overline{S_D}(Q_I, x)}{\partial z} = \frac{d(\overline{S_D}(Q_I, x))}{d(Q_I / x)} \quad (C.11)$$

Y

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{(Q_I / x)}{x} = - \frac{Q_I}{x^2} \quad (C.12)$$

SUBSTITUYENDO LAS ECUACIONES ANTERIORES EN LA ECUACIÓN (C.9), QUEDA:

$$S_{D2}(Q_I, x) = \overline{S_D}(Q_I, x) - \left(\frac{Q_I}{x} \frac{d(\overline{S_D}(Q_I, x))}{d(Q_I / x)} \right) \quad (C.13)$$

LA ECUACIÓN (C.13) PERMITE CALCULAR LA SATURACIÓN DE FLUIDO DESPLAZANTE PARA UN PUNTO CUALQUIERA DENTRO DE LA MUESTRA. CONSIDERANDO AHORA, A LA MUESTRA COMO UN VOLUMEN UNITARIO, ES DECIR, CUANDO SE TENGA $x = 1$, DA POR RESULTADO LA SIGUIENTE ECUACIÓN:

$$S_{D2}(Q_1) = \overline{S_D}(Q_1) - \left(Q_1 \frac{d(\overline{S_D}(Q_1))}{d(Q_1)} \right) \quad (C.14)$$

CON ESTA ECUACIÓN SE PUEDE CALCULAR LA SATURACIÓN DE LA FASE DESPLAZANTE EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA EN FUNCIÓN DE LA INYECCIÓN ACUMULADA EN VOLÚMENES DE POROS.

DEBIDO A QUE LA RECUPERACIÓN ES FUNCIÓN DE LA INYECCIÓN ACUMULATIVA DEL FLUIDO DESPLAZANTE, UN INCREMENTO DE LA SATURACIÓN MEDIA EN UN PLANO DE LA MUESTRA CORRESPONDERÁ A UN INCREMENTO EN DICHO VOLUMEN Y SERÁ IGUAL A LA FRACCIÓN FLUYENTE DE ACEITE EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA, LO QUE MATEMÁTICAMENTE SE PUEDE EXPRESAR COMO:

$$f_{o2} = \frac{d(\overline{S_D}(Q_1))}{d(Q_1)} \quad (C.15)$$

ESTA ECUACIÓN ES EQUIVALENTE A LA PENDIENTE DE LA CURVA DE LA GRÁFICA DE $\overline{S_D}$ VS Q_1 , FIGURA C.1.

SUBSTITUYENDO LA ECUACIÓN (C.15) EN LA ECUACIÓN (C.14) RESULTA QUE:

$$S_{D2} = \overline{S_D}(Q_1) - Q_1 f_{o2} \quad (C.16)$$

LA EVALUACIÓN DE ESTA ECUACIÓN PARA CUALQUIER ETAPA, DURANTE LA PRUEBA, FACILITA LA DETERMINACIÓN DE LA SATURACIÓN EN LA CARA DE PRODUCCIÓN DE LA MUESTRA, DONDE EL PRODUCTO $Q_1 \cdot f_{O2}$, REPRESENTA UN INCREMENTO DE SATURACIÓN ENTRE LA SATURACIÓN MEDIA Y LA SATURACIÓN FINAL CERCA DE LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA.

ESTA ECUACIÓN ES EQUIVALENTE A LA TANGENTE TRAZADA EN LA CURVA DE LA FIGURA C.1, Y SE CONOCE COMO ECUACIÓN DE WELGE.

OBTENCION DE LA SATURACION EN LA CARA DE SALIDA
DE LA MUESTRA A PARTIR DE LA TANGENTE.

CON REFERENCIA A LA CURVA DE LA GRAFICA DE \overline{S}_D VS Q_I , FIGURA C.1, Y CONSIDERANDO EL MISMO MEDIO POROSO DEL CASO ANTERIOR, SE TIENE QUE:

DE LA GEOMETRÍA DE LA FIGURA, SE NOTA QUE LA PENDIENTE DE LA RECTA QUE PASA POR EL PUNTO $A(S_D, 0)$, TANGENTE A LA CURVA DE SATURACIÓN MEDIA EN EL PUNTO $B(\overline{S}_{D1}, Q_I)$, ES

$$\text{TAN } \theta = \frac{\overline{BC}}{\overline{AC}} \quad (\text{C.17})$$

DE LA MISMA FIGURA SE TIENE QUE:

$$\overline{S}_{D1} = S_D + AC \text{ TAN } \theta \quad (\text{C.18})$$

PERO:

$$\overline{BC} = \overline{AC} \text{ TAN } \theta \quad (\text{C.19})$$

QUE SUBSTITUYENDO EN LA ECUACIÓN ANTERIOR, QUEDA:

$$\overline{S_{D1}} = S_D + \overline{AC} \text{ TAN } \theta \quad (\text{C.20})$$

DADO QUE EL PUNTO B, PERTENECE TANTO A LA RECTA COMO A LA CURVA, LA PRIMERA DERIVADA DE LA ECUACIÓN DE LA CURVA EN EL PUNTO MENCIONADO ES IGUAL A LA PENDIENTE DE DICHA RECTA, LO QUE PUEDE EXPRESARSE COMO:

$$\frac{d(\overline{S_D})}{d(Q_I)} = \frac{\overline{S_{D1}} - S_D}{Q_I} \quad (\text{C.21})$$

DE DONDE:

$$\text{TAN } \theta = \frac{d(\overline{S_D})}{d(Q_I)} \quad (\text{C.22})$$

Y DADO QUE:

$$\overline{AC} = Q_I \quad (\text{C.23})$$

SUBSTITUYENDO EN LA ECUACIÓN (C.20), LAS ECUACIONES (C.22) Y (C.23), SE LLEGA A:

$$\overline{S_{D1}} = S_D + Q_1 \frac{d(\overline{S_D})}{d(Q_1)} \quad (C.24)$$

REORDENANDO TÉRMINOS LA ECUACIÓN QUEDA:

$$S_D = \overline{S_{D1}} - \frac{d(\overline{S_D})}{d(Q_1)} \quad (C.25)$$

EN EL DESARROLLO ANTERIOR, SE DEMOSTRÓ QUE LA SATURACIÓN EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA, ES:

$$S_{D2} = \overline{S_D} - Q_1 \frac{d(\overline{S_D})}{d(Q_1)} \quad (C.14)$$

POR LO TANTO, COMO EL SEGUNDO MIEMBRO DE LA ECUACIÓN (C.25), ES SIMILAR AL SEGUNDO MIEMBRO DE LA ECUACIÓN (C.14), Y SUPONIENDO QUE:

$$\overline{S_D} = \overline{S_{D1}} \quad (C.26)$$

SE CONCLUYE QUE:

$$S_{D2} = S_D \quad (C.27)$$

ES DECIR, QUE LA RECTA TANGENTE A LA CURVA DE SATURACIÓN MEDIA, TRAZADA PARA EL PUNTO DE TANGENCIA $B(\overline{S_{D1}}, Q_1)$, Y SÓLO PARA ESE

PUNTO, PROPORCIONA LA SATURACIÓN EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA EN EL PUNTO DE CRUCE CON EL EJE DE LA SATURACIÓN MEDIA.

POR LO TANTO, QUEDA DEMOSTRADO QUE LA TANGENTE TRAZADA SOBRE LA CURVA DE SATURACIÓN MEDIA ES EQUIVALENTE A LA ECUACIÓN DESARROLLADA POR WELGE.

LA FIGURA C.1, SE PUEDE AMPLIAR PARA INCLUIR TODOS LOS VALORES DE SATURACIÓN MEDIA, Y SUS CORRESPONDIENTES VALORES DE SATURACIÓN EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA (S_{D2}), SE CALCULAN COMO YA SE MENCIONÓ. SIN EMBARGO, UNA GRÁFICA DE \bar{S}_D VS $1/Q_1$ COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA C.3, PRESENTA DOS VENTAJAS: PRIMERA, LAS EXTENSIONES DE LAS TANGENTES SON MÁS CORTAS, ELIMINANDO ASÍ ERRORES EN LA LECTURA, Y SEGUNDA, SE DETERMINA UN VALOR MUY APROXIMADO PARA LA SATURACIÓN $S_D = 1 - S_{OR}$, PARA UNA INYECCIÓN INFINITA, MEDIANTE UNA EXTRAPOLACIÓN DE LA CURVA HASTA CORTAR AL EJE DE LAS SATURACIONES.

PARTIENDO DE LA ECUACIÓN (C.9), ENCONTRAMOS QUE PARA ESTE CASO, SE CUMPLE LA SIGUIENTE EXPRESIÓN, ENTONCES

$$S_{D2}(1/Q_1, x) = \bar{S}_D(1/Q_1, x) + (x) \frac{\delta \bar{S}_D(1/Q_1, x)}{\delta x} \quad (C.28)$$

SI SE DEFINE LA VARIABLE $z = x/Q_1$, Y APLICANDO LA REGLA DE LA CADENA EN EL LADO DERECHO DE LA ECUACIÓN ANTERIOR, SE TIENE QUE:

$$\frac{\partial \overline{S_D}(1/Q_1, x)}{\partial x} = \frac{\partial \overline{S_D}(1/Q_1, x)}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} \quad (C.29)$$

PERO COMO LA VARIACIÓN DE LA SATURACIÓN ES CAUSADA POR LA INYECCIÓN DE UN SÓLO FLUIDO, LA DERIVADA PARCIAL SE TRANSFORMA EN UNA DERIVADA SIMPLE, POR LO TANTO, SE TIENE

$$\frac{\partial \overline{S_D}(1/Q_1, x)}{\partial z} = \frac{d \overline{S_D}(1/Q_1, x)}{d(x/Q_1)} \quad (C.30)$$

Y

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{1}{Q_1} \quad (C.31)$$

SUBSTITUYENDO ESTAS DOS ECUACIONES EN LA ECUACIÓN (C.28), RESULTA QUE:

$$S_{D2}(1/Q_1, x) = \overline{S_D}(1/Q_1, x) + \frac{x}{Q_1} \frac{d \overline{S_D}(1/Q_1, x)}{d(x/Q_1)} \quad (C.32)$$

CONSIDERANDO UN VOLUMEN UNITARIO DE LA MUESTRA, PARA LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA, SE TIENE QUE:

$$S_{D2}(1/Q_1, x) = \overline{S_D}(1/Q_1) + \frac{1}{Q_1} \frac{d \overline{S_D}(1/Q_1)}{d(1/Q_1)} \quad (C.33)$$

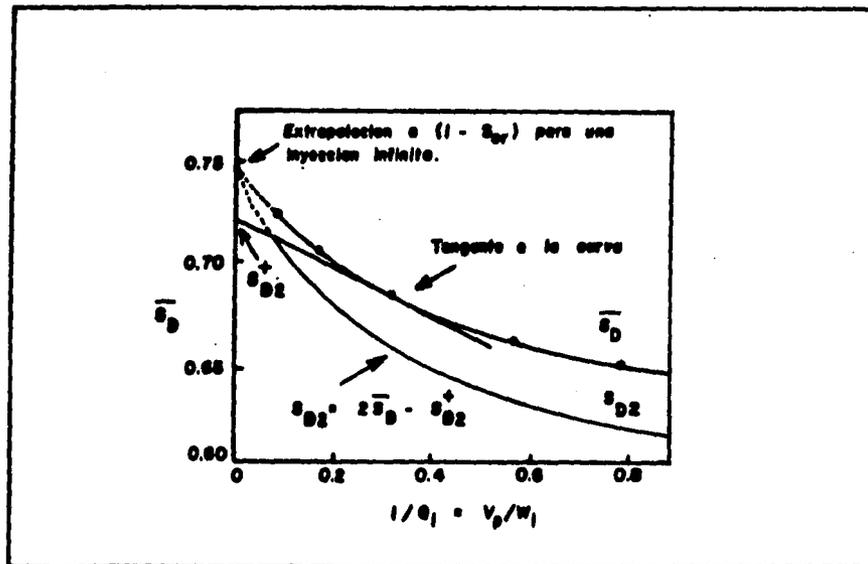


Figura No. C.3.- REPRESENTACION GRAFICA PARA DETERMINAR LA SATURACION EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA PARA ALTOS VOLUMENES DE INYECCION, MOSTRANDO LA EXTRAPOLACION A SATURACION RESIDUAL DE ACEITE.

LA ECUACIÓN QUE REPRESENTA LA TANGENTE TRAZADA A LA CURVA DE LA SATURACIÓN MEDIA EN LA FIGURA C.3, ES:

$$S_{D2}^+(1/Q_1) = \overline{S}_D(1/Q_1) - \frac{1}{Q_1} \frac{d\overline{S}_D(1/Q_1)}{d(1/Q_1)} \quad (C.34)$$

REACOMODANDO LA ECUACIÓN ANTERIOR, SE TIENE:

$$\frac{1}{Q_1} \frac{d\overline{S}_D(1/Q_1)}{d(1/Q_1)} = \overline{S}_D(1/Q_1) - S_{D2}^+(1/Q_1) \quad (C.35)$$

SUBSTITUYENDO LA ECUACIÓN (C.35) EN LA ECUACIÓN (C.33), SE OBTIENE QUE:

$$S_{D2}(1/Q_1) = \overline{S}_D(1/Q_1) + \overline{S}_D(1/Q_1) - S_{D2}^+(1/Q_1) \quad (C.36)$$

SIMPLIFICANDO TÉRMINOS, RESULTA:

$$S_{D2}(1/Q_1) = 2\overline{S}_D(1/Q_1) - S_{D2}^+(1/Q_1) \quad (C.37)$$

LA ECUACIÓN (C.37), FACILITA EL CÁLCULO DE LA SATURACIÓN EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA EN FUNCIÓN DE $1/Q_1$, A PARTIR DE LA TANGENTE TRAZADA A LA CURVA DE LA GRÁFICA DE \overline{S}_D VS $1/Q_1$.

APENDICE D.

DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD EFECTIVA EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA.

LA VISCOSIDAD EFECTIVA, ES DETERMINADA SIGUIENDO UN PROCESO SIMILAR AL UTILIZADO EN LA DETERMINACIÓN DE LA SATURACIÓN EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA, ES DECIR:

CONSIDERANDO UN MEDIO POROSO HOMOGÉNEO, DE LONGITUD L , EN EL CUAL SE GENERA UNA PRESIÓN DIFERENCIAL POR LA INYECCIÓN DE UN FLUIDO, COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA D.1, SE PUEDE CALCULAR LA VISCOSIDAD EFECTIVA, PARA CUALQUIER PUNTO DENTRO DE LA MUESTRA, CON LA ECUACIÓN:

$$\bar{u}_E = \left(\frac{q_B u_B}{\Delta P_B} \right) \frac{\Delta P_X}{q_X} \quad (D.1)$$

TOMANDO UN INCREMENTO DIFERENCIAL, EL CUAL SE PUEDE HACER TAN PEQUEÑO COMO SE QUIERA, ES DECIR,

$$u_{E2} = \frac{L \int_x^{x+\Delta X} \bar{u}_E dx}{\Delta X} \quad (D.2)$$

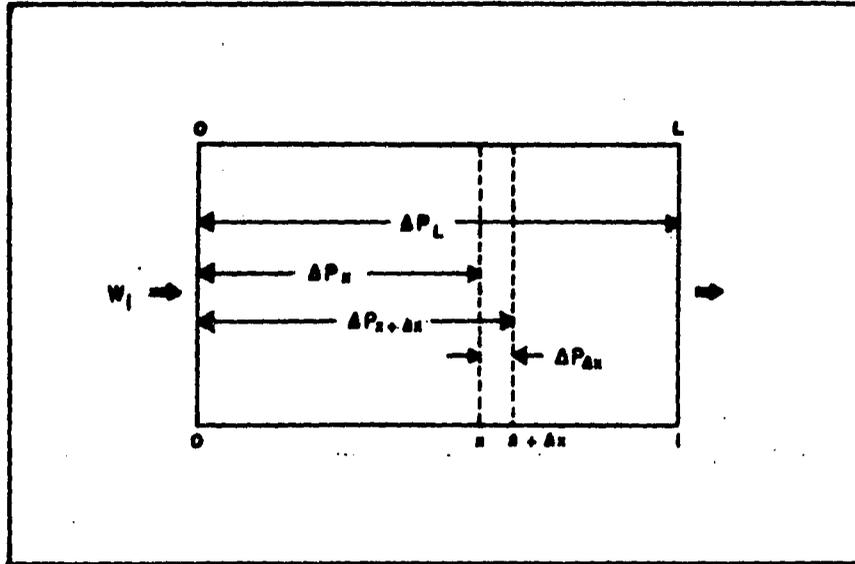


Figura No. 5.1: REPRESENTACION GRAFICA PARA DETERMINAR EL GRADIENTE DE PRESION A TRAVES DE UN NUCLEO LINEAL.

Y DADO QUE LA VISCOSIDAD EFECTIVA DEPENDE ÚNICAMENTE DEL VOLU-
MEN DE POROS DE FLUIDO INYECTADO, Q_1/x , EN LA MUESTRA CON-
SIDERADA, ES DECIR, DE LA POSICIÓN RELATIVA DEL FRENTE DE INVA-
SIÓN, SE TIENE QUE:

$$u_{E2}(Q_1, x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\int_x^{x+\Delta x} \overline{u_E}(Q_1, x) dx}{\Delta x} \quad (D.3)$$

DE DONDE:

$$u_{E2}(Q_1, x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\int_0^{x+\Delta x} \overline{u_E}(Q_1, x) dx - \int_0^x \overline{u_E}(Q_1, x) dx}{\Delta x} \quad (D.4)$$

$$u_{E2}(Q_1, x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{(x + \Delta x)\overline{u_E}(Q_1, x + \Delta x) - (x)\overline{u_E}(Q_1, x)}{\Delta x} \quad (D.5)$$

POR LO TANTO:

$$u_{E2}(Q_1, x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\overline{u_E}(Q_1, x + \Delta x) + \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(x \left(\frac{\overline{u_E}(Q_1, x + \Delta x)}{\Delta x} - \frac{\overline{u_E}(Q_1, x)}{\Delta x} \right) \right) \right) \quad (D.6)$$

DE LA DEFINICIÓN DERIVADA Y TOMANDO LÍMITES, SE ENCUENTRA LA SIGUIENTE ECUACIÓN:

$$u_{E2} = \overline{u_E}(Q_1, x) + (x) \frac{\delta \overline{u_E}(Q_1, x)}{\delta x} \quad (D.7)$$

DADO QUE LA VISCOSIDAD EFECTIVA TAMBIÉN ES FUNCIÓN DE Q_1, x , Y DEFINIENDO LA VARIABLE $Z = Q_1/x$, SE PUEDE APLICAR LA REGLA DE LA CADENA PARA EVALUAR LA DERIVADA DEL LADO DERECHO, DE LA ECUACIÓN ANTERIOR, Y CONSIDERANDO QUE ÚNICAMENTE ESTÁ FLUYENDO UN FLUIDO, SE TIENE QUE:

$$\frac{\delta \overline{u_E}(Q_1, x)}{\delta x} = \frac{d \overline{u_E}(Q_1, x)}{dz} \frac{\delta z}{\delta x} \quad (D.8)$$

$$\frac{\delta \overline{u_E}(Q_1, x)}{\delta x} = \frac{d \overline{u_E}(Q_1, x)}{dz} \frac{(-Q_1)}{x^2} \quad (D.9)$$

SUBSTITUYENDO LA ECUACIÓN (D.9) EN LA ECUACIÓN (D.7.), QUE PARA CUALQUIER PUNTO DE LA MUESTRA SE TIENE:

$$u_{E2}(Q_1, x) = \overline{u_E}(Q_1, x) - \frac{Q_1}{x} \frac{d \overline{u_E}(Q_1, x)}{d(Q_1, x)} \quad (D.10)$$

PARA LA LONGITUD TOTAL L , DE LA MUESTRA, LA VISCOSIDAD EFECTIVA SE CALCULA CON:

$$u_{E2}(Q_1) = \bar{u}_E(Q_1) - Q_1 \frac{d\bar{u}_E(Q_1)}{d(Q_1)} \quad (D.11)$$

ESTA ECUACIÓN CORRESPONDE A LA ECUACIÓN TRAZADA EN LA GRÁFICA DE \bar{u}_E VS Q_1 , FIGURA D.2, Y FACILITA LA DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD EFECTIVA PARA LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA, EN CUALQUIER ETAPA DE LA PRUEBA.

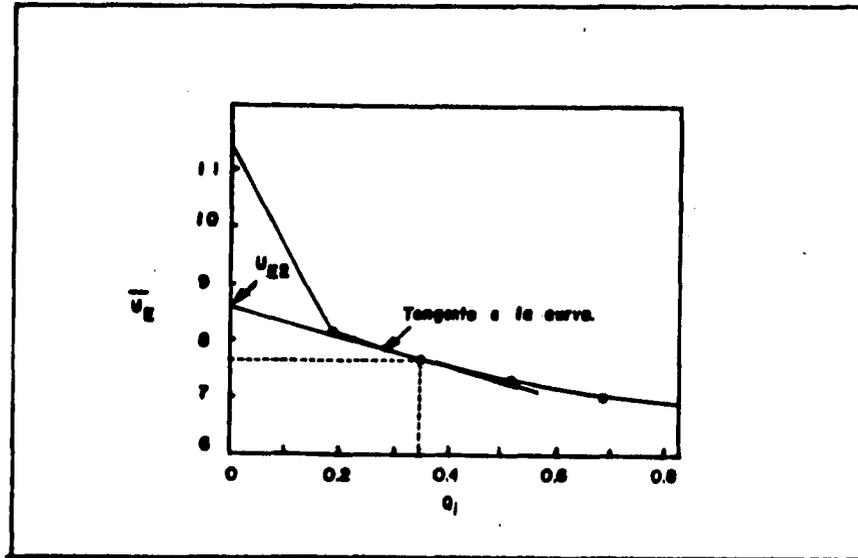


Figura No. 9.2.- REPRESENTACION GRAFICA PARA DETERMINAR VALORES DE VISCOSIDAD EFECTIVA EN LA CARA DE SALIDA DE LA MUESTRA A PARTIR DE LA VISCOSIDAD EFECTIVA MEDIA.

NOMENCLATURA

A	ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA MUESTRA
K	PERMEABILIDAD ABSOLUTA
K_O	PERMEABILIDAD EFECTIVA AL ACEITE
K_W	PERMEABILIDAD EFECTIVA AL AGUA
K_G	PERMEABILIDAD EFECTIVA AL GAS
K_{RO}	PERMEABILIDAD RELATIVA AL ACEITE
K_{RW}	PERMEABILIDAD RELATIVA AL GAS
L	LONGITUD TOTAL DE LA MUESTRA
N_p	PRODUCCIÓN ACUMULATIVA DE ACEITE
P	PRESIÓN
P_1	PRESIÓN DE ENTRADA A LA MUESTRA
P_2	PRESIÓN DE SALIDA DE LA MUESTRA
P_C	PRESIÓN CAPILAR
S_f	SATURACIÓN DE FLUIDOS
S_o	SATURACIÓN DE ACEITE

S_{OR}	SATURACIÓN RESIDUAL DE ACEITE
S_W	SATURACIÓN DE AGUA
S_{WC}	SATURACIÓN CRÍTICA DE AGUA
S_{WI}	SATURACIÓN IRREDUCTIBLE DE AGUA
S_D	SATURACIÓN DE LA FASE DESPLAZANTE
\bar{S}	SATURACIÓN MEDIA
Q_I	VOLUMEN ACUMULATIVO EN VOLÚMENES DE POROS
V_P	VOLUMEN DE POROS
W_I	INYECCIÓN ACUMULADA DE AGUA A C.S.
W_P	PRODUCCIÓN ACUMULADA DE AGUA A C.S.
T	TEMPERATURA
f_O	FLUJO FRACCIONAL DE ACEITE
f_W	FLUJO FRACCIONAL DE AGUA
f'	DERIVADA DE FLUJO FRACCIONAL CON LA DISTANCIA
G	FUERZA DE GRAVEDAD
q	RITMO DE INYECCIÓN
q_O	GASTO DE ACEITE
q_W	GASTO DE AGUA
q_T	GASTO TOTAL
t	TIEMPO
v	VELOCIDAD
x	POSICIÓN DEL FRENTE DE INVASIÓN
u	VISCOSIDAD
u_O	VISCOSIDAD DEL ACEITE

u_w	VISCOSIDAD DEL AGUA
u_e	VISCOSIDAD EFECTIVA
α	ANGULO ENTRE LA DIRECCIÓN DE FLUJO Y LA HORIZONTAL
ρ	DENSIDAD
ρ_o	DENSIDAD DEL ACEITE
ρ_w	DENSIDAD DEL AGUA
\emptyset	POROSIDAD

REFERENCIAS

- 1.- ROSZELLE, W.O., JONES, S.C.: "GRAPHICAL TECHNIQUE FOR DETERMINING RELATIVE PERMEABILITY FROM DISPLACEMENT EXPERIMENTS", J.PET. TECH. (MAY, 1978). PÁG. 807.
- 2.- CRAFT, B.C., HAWKINS, M.F.: "APPLIED PETROLEUM RESERVOIR ENGINEERING", PRENTICE-HALL, INC. ENGLEWOOD CLIFFS, N.J., (1959), PÁG. 361.
- 3.- JOHNSON, E.F., BOSSLER, D.P., NAUMAN, N.O.: "CALCULATION OF RELATIVE PERMEABILITY FROM DISPLACEMENT EXPERIMENTS". TRANS. AIME (1959), VOL. 216. PÁG. 370.
- 4.- WEIGE, H.J.: "SIMPLIFIED METHOD FOR COMPUTING OIL RECOVERY BY GAS OR WATER DRIVE". TRANS. AIME (1952), VOL. 195. PÁG. 91.

- 5.- CRAIG, F.F., JR. : "ASPECTOS DE LA INGENIERÍA DE LA INYECCIÓN DE AGUA". MONOGRAFÍA VOLUMEN NO.3, PRIMERA EDICIÓN, 1982. SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERINGS OF AIME, DALLAS, PÁG. 10.
- 6.- AMYX, J.W., BASS, D.M., WHITING, R.L. : "PETROLEUM RESERVOIR ENGINEERINGS". MC GRAW HILL BOOK CO, INC., NEW YORK, 1960. PÁG. 174.
- 7.- DAKE, L.P. : "DEVELOPMENTS IN PETROLEUM SCIENCE & FUNDAMENTALS OF RESERVOIR ENGINEERING". ÉLSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING CO, NEW YORK, 1978. PÁG. 121
- 8.- MORGAN, J.T., GORDON, D.T. : "INFLUENCE OF PORE GEOMETRY ON WATER-OIL RELATIVE PERMEABILITY". J.P.T. OCTOBER 1970. PÁG. 1199.
- 9.- LORETO, M.E.G. : "APUNTES DE LA CÁTEDRA DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA". FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM.
- 10.- RODRÍGUEZ, N.R. : "APUNTES DE LA CÁTEDRA DE PRINCIPIOS DE INGENIERÍA DE YACIMIENTOS". FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM.
- 11.- FRICK, T.C. : "HANDBOOK OF PRODUCTION PETROLEUM". CHAPTER NO. 25. RELATIVE PERMEABILITY BY WYLLIE, M.R.J. SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERING OF AIME. DALLAS.