

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

USO DE LA IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA PARA ESTUDIAR LA FUERZA DE GEL ESTÁTICA EN LECHADAS DE CEMENTO UTILIZADAS EN CONSTRUCCIÓN DE POZOS PETROLEROS

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Sulbarán P., José L.
Para optar al Título de
Ingeniero Químico

Caracas, 2006

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

USO DE LA IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA PARA ESTUDIAR LA FUERZA DE GEL ESTÁTICA EN LECHADAS DE CEMENTO UTILIZADAS EN CONSTRUCCIÓN DE POZOS PETROLEROS

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Armando Vizcaya

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Gonzalo Vázquez

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Sulbarán P., José L.
Para optar al Título de
Ingeniero Químico

Caracas, 2006

Caracas, Febrero de 2006

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller José Luis Sulbarán Parra, titulado:

“USO DE LA IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA PARA ESTUDIAR LA FUERZA DE GEL ESTÁTICA EN LECHADAS DE CEMENTO UTILIZADAS EN CONSTRUCCIÓN DE POZOS PETROLEROS”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. Wadou Bare
Jurado


Prof. Francisco Yáñez
Jurado


Prof. Armando Vizcaya
Tutor


Ing. Gonzalo Vázquez
Tutor



A DIOS

A mi Familia

A mi Novia

A mis Amigos

*Y a todos aquellos que han dado algo de
sí para ayudarme a lo largo de este tortuoso camino*

A Dios, ante todo le doy las gracias por permitirme el grandioso don de la vida, por no olvidarme nunca, aunque yo sólo me acordé de él en los momentos más difíciles. Por haberme mostrado todo lo que hasta la fecha he visto, vivido, sufrido y disfrutado. Por darme la oportunidad de conocer a todas las personas maravillosas con las que he compartido, y en fin, gracias por todo Señor.

A mis padres (Italo y Jusbis), por el infinito amor que me han profesado y por darme las oportunidades en la vida, a pesar de los errores cometidos. A mis hermanos (Doralicia, Cesar y José Gregorio) por su amor, paciencia y apoyo irrestricto. A mi Tía (Marbella) por su cariño, paciencia, dedicación, generosidad, comprensión y apoyo, en verdad no tengo palabras para decir lo agradecido que estoy por abrirme las puertas de tu hogar. A mi familia putativa (Carmen y Rosa Velásquez, Ramón y Gladys Zapata, Eva Zárate y Carmen Sánchez) por su ayuda para que este servidor alcanzara sus metas.

A mi amada Novia (Lisbeth), porque desde el día que iniciamos esta maravillosa aventura tu has estado ahí, a cada paso y en todo momento. Honestamente sin tu amor, apoyo, generosidad, cuidado y dedicación, no lo hubiese logrado. Gracias por ser como eres y por darme un espacio en tu vida, ya se que definitivamente cuento contigo y con tu apoyo.

A mis queridos amigos (Augusto, Jhann, Alejandro, Gladys, Alessandra, Norelys, Jesús, Eleazar, Yaremi, Adriana) por su cariño y ayuda incondicional, y por hacer de la vida universitaria una cadena interminable de aventuras y buenas vivencias. También a mis profesores (Armando, Humberto y Francisco) y a mis nuevos amigos (Félix, Gonzalo, Wuilmen, Virginia, Fedymar y Albert) por su ayuda para este trabajo y por enseñarme mucho de la vida dentro y fuera de mi querida UCV.

Finalmente quisiera agradecer a todos aquellos que brindaron su aporte para que esta investigación llegara a feliz término (Miguel Piñero, José Romero, Abraham Salazar, y a toda la pericia de cementación de pozos en INTEVEP), porque sin su ayuda en los momentos claves las cosas se hubiesen puesto mucho más difíciles.

Sulbarán P., José L.

**USO DE LA IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA PARA ESTUDIAR
LA FUERZA DE GEL ESTÁTICA EN LECHADAS DE CEMENTO
UTILIZADAS EN CONSTRUCCIÓN DE POZOS PETROLEROS**

**Tutor Académico: Prof. Armando Vizcaya. Tutor Industrial: Ing. Gonzalo
Vázquez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería
Química, Año 2006, 194 p.**

Palabras Clave: Impedancia electroquímica, Cementación, Migración de fluidos.

Resumen. La operación de cementación es una de las etapas más importantes de la construcción de un pozo petrolero, ya que la misma constituye el mecanismo mediante el cual se brinda estabilidad a los diferentes hoyos perforados y se logra un efectivo aislamiento zonal, lo que tiene como finalidad proveer mayor seguridad y tiempo de vida útil al pozo. Sin embargo, durante o después de estas operaciones se puede presentar un fenómeno conocido como migración de fluidos, el cual consiste en la invasión de los diferentes fluidos que se encuentran en la formación hacia el espacio anular cementado, en donde se puede desplazar hacia zonas de menor presión o hacia la superficie.

El principal factor que previene este fenómeno es la capacidad de la columna de cemento para transmitir la presión hidrostática la cual es función de una propiedad conocida como fuerza de gel estática. En la actualidad, aunque existen algunos prototipos, no hay equipos estandarizados ni metodología para cuantificar experimentalmente esta propiedad, por lo cual se plantea en la presente investigación estudiar la potencialidad del uso de medidas de impedancia electroquímica como una técnica para evaluar la fuerza de gel estática en lechadas de cemento.

La investigación se dividió en tres etapas fundamentales, la primera corresponde al montaje y puesta a punto del sistema de medición, en la cual se verificó el buen funcionamiento y la confiabilidad de los resultados del sistema de medición; la segunda tiene que ver con la obtención de los datos experimentales, en la que se hicieron experiencias con dos blancos (cemento y agua) y cuatro sistemas cementantes antimigratorios a diferentes condiciones de presión y temperatura, dichas experiencias se enfocaron en la caracterización de las lechadas de acuerdo a la normativa API, medición de fuerza de gel estática empleando el MINIMACS (Mini Multiple Analyser Cement Slurry) y las pruebas de impedancia con un sistema de medición que permite la aplicación de presión y temperatura a la muestra durante la prueba. Finalmente, en la etapa de tratamiento de los datos experimentales se determinaron los parámetros del circuito equivalente que modela los sistemas estudiados, de igual manera se escogió el parámetro a correlacionar, se generaron y validaron las correlaciones pertinentes.

Se obtuvo que las propiedades físicas de las formulaciones estudiadas cumplen con lo establecido en la normativa API, por otro lado se observaron diferentes comportamientos de gelificación para dichos sistemas de acuerdo a las curvas de fuerza de gel estática obtenidas con el MINIMACS, los cuales dependen de la formulación del sistema cementante. De igual manera se observaron diferentes comportamientos de las curvas de resistencia eléctrica del sistema como función del tiempo, debido a los cambios tanto en las formulaciones como en la temperatura de la prueba.

Se determinaron dos tipos de funciones para los diferentes sistemas estudiados, que pueden relacionar la fuerza de gel estática con los valores de la resistencia eléctrica de la muestra, una de ellas es una expresión de dos parámetros y la otra es un modelo de seis parámetros, las cuales se ajustaron a los diferentes sistemas estudiados.

Finalmente se concluyó que las mediciones de impedancia electroquímica tienen potencial para ser correlacionadas con fuerza de gel estática en lechadas de cemento utilizadas en la construcción de pozos petroleros, lo cual abre una amplia gama de posibilidades de uso de estas técnicas dentro del área de estudio de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Pag
ÍNDICE DE FIGURAS.	V
ÍNDICE DE TABLAS.	X
LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS.	XII
1.- INTRODUCCIÓN.	1
2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	3
3.- OBJETIVOS.	5
3.1.- Objetivo General.	5
3.2.- Objetivos Específicos.	5
4.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	6
4.1.- Operaciones de perforación en pozos petroleros.	6
4.1.1.- Tipos de operaciones de perforación.. . . .	6
4.1.2.- Equipos empleados en la perforación rotatoria.	9
4.1.3.- Fluidos de perforación.	12
4.1.3.1.- Definición.	12
4.1.3.2.- Funciones de los fluidos de perforación.	12
4.1.3.3.- Propiedades de los fluidos de perforación.	13
4.2.- Operaciones de cementación en pozos petroleros.	14
4.2.1.- Clasificación de los procesos de cementación.	15
4.2.1.1.- Cementación primaria.	15
4.2.1.2.- Cementación secundaria o remedial.	19
4.2.2.- Métodos para la cementación.	20
4.2.2.1.- Remoción del fluido de perforación.	20
4.2.2.2.- Cementación en una etapa.	21
4.2.2.3.- Cementación en varias etapas.	22
4.2.3.- Composición y clasificación del cemento Portland.	23
4.2.4.- Propiedades físicas de las lechadas de cemento.	26

4.2.5.- Aditivos del cemento.	27
4.3.- Fenómeno de migración de fluidos en pozos petroleros.	29
4.3.1.- Mecanismo de migración del gas.	31
4.3.2.- Posibles rutas de migración del gas.	32
4.3.3.- Factores que controlan la entrada del gas presente en la formación al anular cementado.	33
4.3.3.1.- Reducción de volumen.	34
4.3.3.2.- Desarrollo de la fuerza de gel estática.	35
4.3.4.- Control del fenómeno de la migración del gas.	39
4.4.- Espectroscopía de impedancia electroquímica.. . . .	40
4.4.1.- Conceptos básicos.	41
4.4.1.1.- Definición de impedancia.	41
4.4.1.2.- Funciones relacionadas con la impedancia.	46
4.4.1.3.- Impedancia de diferentes elementos de circuito.	48
4.4.1.4.- Representación de los datos de impedancia.	50
4.4.2.- Experimentos de espectroscopía de impedancia.	53
4.4.2.1.- Fundamentos.	53
4.4.2.2.- Suposiciones de trabajo.	55
4.4.2.2.1.- Suposiciones correspondientes al análisis del sistema.	56
4.4.2.2.2.- Suposiciones correspondientes al comportamiento del sistema electroquímico.	57
4.4.3.- Modelaje de los datos de impedancia.	57
4.4.3.1.- Circuitos equivalentes.	59
4.4.3.2.- Modelos electroquímicos básicos.	60
4.4.3.3.- Componentes parásitos.	62
4.4.3.4.- Cálculo de los modelos de impedancia.	62
4.4.4.- Distorsión de los valores de impedancia electroquímica medidos a alta frecuencia.	64

4.4.5.- Ventajas y limitaciones del uso de la impedancia electroquímica.	65
4.5.- Antecedentes.	66
4.5.1.- Migración de fluidos en pozos petroleros.	66
4.5.2.- Espectroscopía de impedancia aplicada a sistemas cementantes.	69
5.- DESCRIPCIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS.	75
6.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.	80
6.1.- Montaje y puesta a punto del sistema de medición.	81
6.2.- Obtención de los datos experimentales.	81
6.2.1.- Preparación de las lechadas de cemento.	81
6.2.2.- Caracterización de los sistemas.	82
6.2.2.1.- Medición del tiempo de espesamiento.	82
6.2.2.2.- Determinación de la densidad de la lechada de cemento.	83
6.2.2.3.- Pruebas de resistencia a la compresión.	83
6.2.2.4.- Pruebas de pérdida de fluido estático.	83
6.2.2.5.- Determinación de las propiedades reológicas.	83
6.2.3.- Determinación de la fuerza de gel estática.	84
6.2.4.- Pruebas de impedancia electroquímica.	84
6.3.- Tratamiento de los datos experimentales.	85
7.- PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	87
7.1.- Montaje y puesta a punto del sistema de medición.	87
7.1.1.- Validación de resultados de la investigación anterior.	87
7.1.2.- Influencia de elementos parásitos en el sistema.	92
7.2.- Preparación de los sistemas.	107
7.3.- Caracterización de los sistemas.	110
7.3.1.- Densidad.	111
7.3.2.- Fluido libre.	112
7.3.3.- Volumen de filtrado.	112

7.3.4.- Tiempo de espesamiento.	112
7.3.5.- Resistencia a la compresión.	113
7.4.- Medición de fuerza de gel estática.	113
7.4.1.- Blanco A.	113
7.4.2.- Blanco B.	116
7.4.3.- Sistema A.	119
7.4.4.- Sistema B.	120
7.4.5.- Sistema C.	121
7.4.6.- Sistema D.	122
7.5.- Pruebas de impedancia electroquímica.	123
7.5.1.- Blanco A.	130
7.5.2.- Blanco B.	137
7.5.3.- Sistema A.	141
7.5.4.- Sistema B.	146
7.5.5.- Sistema C.	148
7.5.6.- Sistema D.	149
7.6.- Determinación de correlaciones.	151
7.6.1.- Blanco A.	151
7.6.2.- Blanco B.	154
7.6.3.- Sistema A.	156
7.6.4.- Sistema B.	157
7.6.5.- Sistema C.	158
7.6.6.- Sistema D.	160
8.- CONCLUSIONES.	163
9.- RECOMENDACIONES..	165
10.- BIBLIOGRAFÍA.	166
11.- APÉNDICES.	170
12.- GLOSARIO.	192

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	Pag
Figura N° 1: Esquema de un pozo petrolero..	9
Figura N° 2: Sistema de perforación rotatoria.	10
Figura N° 3: Objetivos de la cementación primaria.	16
Figura N° 4: Esquema de la cementación primaria.	18
Figura N° 5: Cementación en una etapa.	22
Figura N° 6: Rutas de migración del gas.	33
Figura N° 7: Proceso de gelificación del cemento.	36
Figura N° 8: Efecto del desarrollo de la fuerza de gel sobre la presión hidrostática de la columna de cemento.	37
Figura N° 9: MINIMACS, equipo para la evaluación de fuerza de gel estática.	39
Figura N° 10: Respuesta de un sistema lineal a una señal de excitación sinusoidal.	43
Figura N° 11: Diagrama de Nyquist.	51
Figura N° 12: Diagrama de Bode.	52
Figura N° 13: Diagrama de Nyquist y Bode para diferentes elementos de circuito.	53
Figura N° 14: Proceso de caracterización de sistemas electrodo-material empleando espectroscopía de impedancia.	54
Figura N° 15: Estructura de Maxwell.	61
Figura N° 16: Estructura de Voigt.	61
Figura N° 17: Estructura escalonada.	62
Figura N° 18: Circuito equivalente para el sistema electrodo-lechada de cemento.	63
Figura N° 19: Diagrama de Nyquist para el circuito equivalente que modela el sistema electrodo – lechada de cemento.	64
Figura N° 20: Esquema de la celda electroquímica #1.	78
Figura N° 21: Esquema de la celda electroquímica #2.	78
Figura N° 22: Esquema de la celda electroquímica #3.	79
Figura N° 23: Diagrama de flujo de la metodología experimental.	80
Figura N° 24: Esquema del sistema de medición y monitoreo de los datos.	85
Figura N° 25: Espectro de impedancia para el agua destilada usando la celda #1.	88

Figura N° 26: Pruebas de repetibilidad del espectro de impedancia para el agua destilada usando la celda #1..	90
Figura N° 27: Pruebas de repetibilidad del espectro de impedancia para el agua destilada usando la celda #1 con electrodos lijados.	91
Figura N° 28: Espectros de impedancia para el agua destilada usando la celda #2 .	95
Figura N° 29: Espectros de impedancia para el agua destilada usando la celda #3 .	97
Figura N° 30: Espectros de impedancia para el agua destilada usando la celda #3, luego de usar procedimientos correctivos.	98
Figura N° 31: Espectros de impedancia para el agua destilada, 5 minutos después de agregada la muestra, usando la celda #3.	99
Figura N° 32: Espectros de impedancia para soluciones de Cloruro de Sodio a bajas concentraciones usando la celda #3.	103
Figura N° 33: Espectros de impedancia para soluciones de Cloruro de Sodio a altas concentraciones usando la celda #3.	103
Figura N° 34: Espectros de impedancia para el agua destilada usando la celda #3 con el sistema de calentamiento y presurización montado.	105
Figura N° 35: Circuito equivalente para modelar elementos parásitos presentes en el sistema de medición.	106
Figura N° 36: Comparación entre los espectros de impedancia para el agua destilada obtenidos mediante el sistema de medición y el circuito equivalente de la Figura N° 34	107
Figura N° 37: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco A (77 °F y 14.7 psi).	114
Figura N° 38: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco A (100 °F y 1000 psi).	114
Figura N° 39: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco A (150 °F y 1000 psi).	115
Figura N° 40: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco A (200 °F y 1000 psi).	116
Figura N° 41: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco B (77 °F y 14.7	

psi).	117
Figura N° 42: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco B (150 °F y 1000 psi).	118
Figura N° 43: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco B (250 °F y 1000 psi).	118
Figura N° 44: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el sistema A.	119
Figura N° 45: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el sistema B.	121
Figura N° 46: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el sistema C.	121
Figura N° 47: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el sistema D.	122
Figura N° 48: Espectros de impedancia para el blanco A, usando la celda #3 sin sistemas de calentamiento y presurización, cuantificados a 77 °F y 14.7 psi.	124
Figura N° 49: Repetición de espectros de impedancia para el blanco A, usando la celda #3 sin sistemas de calentamiento y presurización, cuantificados a 77 °F y 14.7 psi.	124
Figura N° 50: Resistencia del blanco A en función del tiempo, usando la celda #3 sin sistemas de calentamiento y presurización, cuantificada a 77 °F y 14.7 psi.	125
Figura N° 51: Espectros de impedancia para el blanco A, usando la celda #3 con sistemas de calentamiento y presurización, cuantificados a 77 °F y 14.7 psi.	128
Figura N° 52: Evolución de la frecuencia del intercepto en el tiempo para el blanco A.	129
Figura N° 53: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco A (77 °F y 14.7 psi).	131
Figura N° 54: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco A (77 °F y 14.7 psi).	132
Figura N° 55: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco A (100 °F y 1000 psi).	133
Figura N° 56: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de	

fuerza de gel estática para el blanco A (100 °F y 1000 psi).	134
Figura N° 57: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco A (150 °F y 1000 psi).	135
Figura N° 58: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco A (150 °F y 1000 psi).	135
Figura N° 59: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco A (200 °F y 1000 psi).	136
Figura N° 60: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco A (200 °F y 1000 psi).	137
Figura N° 61: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco B (77 °F y 14.7 psi).	138
Figura N° 62: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco B (77 °F y 14.7 psi).	138
Figura N° 63: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco B (150 °F y 1000 psi).	139
Figura N° 64: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco B (150 °F y 1000 psi).	140
Figura N° 65: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco B (250 °F y 1000 psi).	140
Figura N° 66: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco B (250 °F y 1000 psi).	141
Figura N° 67: Variación de la resistencia de la muestra para el sistema A (100 °F y 1000 psi).	142
Figura N° 68: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema A (100 °F y 1000 psi).	143
Figura N° 69: Variación de la resistencia de la muestra para el sistema A (140 °F y 1000 psi).	144
Figura N° 70: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema A (140 °F y 1000 psi).	144
Figura N° 71: Variación de la resistencia de la muestra para el sistema A (200 °F y	

1000 psi).	145
Figura N° 72: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema A (200 °F y 1000 psi).	146
Figura N° 73: Variación de la resistencia de la muestra para el sistema B (115 °F y 1000 psi).	147
Figura N° 74: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema B (115 °F y 1000 psi).	147
Figura N° 75: Variación de la resistencia de la muestra para el sistema C (270 °F y 1000 psi).	148
Figura N° 76: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema C (270 °F y 1000 psi).	149
Figura N° 77: Variación de la resistencia de la muestra para el sistema D (150 °F y 1000 psi).	150
Figura N° 78: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema D (150 °F y 1000 psi).	150
Figura N° 79: Curvas normalizadas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el blanco A.	152
Figura N° 80: Efecto de la temperatura sobre el valor de los parámetros del modelo estudiado para el blanco A.	154
Figura N° 81: Curvas normalizadas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el blanco B.	155
Figura N° 82: Curvas normalizadas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el sistema A.	156
Figura N° 83: Curva normalizada de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el sistema B (115 °F y 1000 psi).	158
Figura N° 84: Curva normalizada de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el sistema C (270 °F y 1000 psi).	159
Figura N° 85: Curva normalizada de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el sistema D (150 °F y 1000 psi).	160

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	Pag
Tabla N° 1: Composición del cemento Portland.	24
Tabla N° 2: Relaciones Voltaje-Intensidad de corriente para diferentes elementos de circuito.	50
Tabla N° 3: Condiciones experimentales para las pruebas de validación.	88
Tabla N° 4: Dimensiones de las celdas empleadas en esta investigación	93
Tabla N° 5: Valores de los parámetros de validación para la celda #1.	94
Tabla N° 6: Valores de los parámetros de validación para la celda #2.	96
Tabla N° 7: Valores de los parámetros de validación para la celda #3.	100
Tabla N° 8: Valores de los diámetros de celda requeridos para obtener una constante dieléctrica acorde a lo reportado en la bibliografía.	101
Tabla N° 9: Valores requeridos para el cálculo del factor de corrección geométrico a partir de las resistividades de soluciones de Cloruro de Sodio a diferentes concentraciones.	104
Tabla N° 10: Composición de los blancos utilizados en la presente investigación..	108
Tabla N° 11: Composición del sistema A, utilizado en la presente investigación.	108
Tabla N° 12: Composición de los sistemas B, C y D utilizados en la presente investigación.	109
Tabla N° 13: Propiedades físicas de los blancos utilizados en la presente investigación..	110
Tabla N° 14: Propiedades físicas de los sistemas utilizados en la presente investigación..	111
Tabla N° 15: Parámetros obtenidos a partir del desarrollo de fuerza de gel estática para el sistema A, medido a diferentes temperaturas.	120
Tabla N° 16: Ajustes realizados a las curvas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el blanco A.	153
Tabla N° 17: Ajustes realizados a las curvas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el blanco B.	155

Tabla N° 18: Ajustes realizados a las curvas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el sistema A.	157
Tabla N° 19: Ajuste realizado a la curva de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el sistema D.	161

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

A.C.: Corriente alterna.

A_c : Área de electrodos.

API: Instituto Americano de Petróleo.

ASTM: Sociedad Americana de Pruebas y Materiales.

$B(\omega)$: Susceptancia.

Bc: Unidades Bearden de consistencia.

C : Capacitancia.

C_c : Capacitancia de celda vacía.

C_2S : Silicato Dicálcico.

C_3S : Silicato Tricálcico.

C_3A : Aluminato Tricálcico.

C_4AF : Ferroaluminato Tricálcico.

EIE: Espectroscopía de Impedancia Electroquímica.

F : Constante de Faraday.

f : Frecuencia.

$G(\omega)$: Conductancia.

HPHT: Alta presión y alta temperatura.

HSR: Grado de alta resistencia a los sulfatos.

I_m : Amplitud de la señal de respuesta.

$i(t)$: Intensidad de corriente.

ISO: Organización Internacional de Estandarización.

j : Operador unitario imaginario.

KHz: Kiloherztz.

L : Inductancia.

l : Espacio entre los electrodos.

lb/100ft²: Unidades de esfuerzo cortante.

lb/gal: Libras por galón.

LPG: Libras por galón.

$M(\omega)$: Función módulo.

MINIMACS: Analizador de fuerza de gel estática en lechadas de cemento (Mini Multiple Analyser Cement Slurry).

MHz: Megahertz.

MSR: Grado de mediana resistencia a los sulfatos.

O: Grado Ordinario.

R : Componente resistivo de la impedancia, Resistencia.

$R(t)$: Resistencia.

rad: Radianes.

rpm: Revoluciones por minuto.

SGS: Fuerza de gel estática (Static Gel Strength).

SGSA: Analizador de Fuerza de Gel Estática.

t : Tiempo.

V: Voltios.

$v(t)$: Voltaje o tensión.

V_m : Amplitud.

V_T : Voltaje termal.

X : Componente reactivo de la impedancia.

$Y(\omega)$: Admitancia.

$Z(t)$, Z_0 : Impedancia.

Z_C : Impedancia de capacitores.

$Z_E(\omega)$: Impedancia experimental.

$Z_{EC}(\omega)$: Impedancia de circuito equivalente.

Z_L : Impedancia de inductores.

Z_R : Impedancia de Resistores.

$Z_T(\omega)$: Impedancia teórica.

$Z'(\omega)$: Componente real de la impedancia.

$Z''(\omega)$: Componente imaginario de la impedancia.

$|Z_o|$: Módulo de la Impedancia.

ε : Constante dieléctrica.

$\varepsilon(\omega)$: Permitividad dieléctrica.

ε_0 : Permitividad dieléctrica del vacío.

θ : Ángulo de fase.

ν_{top} : Frecuencia que hace máximo al componente imaginario de la impedancia.

ω : Frecuencia radial.

$^\circ/\text{min}$: Grados por minutos.

1.- INTRODUCCIÓN

La construcción de un pozo petrolero consta de diferentes etapas que van desde la perforación, pasando por la cementación y culminando con la completación y puesta en marcha del mismo. De todas estas etapas, una de las más importantes es la cementación de los diferentes hoyos que se van perforando, debido a que esta operación tiene como finalidad proveer estabilidad al pozo mediante la protección del revestidor y un efectivo aislamiento zonal.

La operación de cementación consiste en el bombeo de un volumen suficiente de lechada de cemento a través del revestidor con el fin de colocarla en el espacio anular del hoyo, el cual es la zona que se encuentra entre el revestidor y las paredes de la formación. Todo esto se hace con la finalidad de proveer un sello impermeable en dicho espacio anular para evitar que los fluidos que se encuentran confinados en las zonas permeables de la formación ingresen al pozo y afecten la producción del mismo.

Se conoce como migración de fluidos al fenómeno que ocurre cuando los gases y/o líquidos que se encuentran en la formación invaden el espacio anular cementado del pozo y posteriormente se mueven a zonas de menor presión o hacia la superficie, lo cual puede representar un grave peligro para la seguridad operacional y la vida útil de dicho pozo. La ocurrencia de este fenómeno se conoce desde que fue identificado en 1960 y es originada por un desequilibrio entre la presión de poro de la formación y la presión ejercida por la columna de cemento, la cual puede suscitarse en un momento dado en la interfase cemento-formación.

El factor fundamental que permite que una columna de lechada de cemento prevenga la invasión de fluidos a su seno es la capacidad que tiene dicha columna para transmitir la presión hidrostática, que depende a su vez de una propiedad de la lechada que recibe el nombre de fuerza de gel estática (Static Gel Strength), la cual es la fuerza de resistencia aplicada por la misma al perímetro mojado de las paredes de la formación y del revestidor.

El proceso de gelificación es el responsable de la adherencia de la columna de cemento a las superficies del espacio anular, pero trae como consecuencia que la misma pierda paulatinamente su capacidad de transmitir la presión hidrostática hasta el punto en que se solidifica completamente. Mientras más baja es la fuerza de gel, mayor es la capacidad que tiene la columna para transmitir la presión hidrostática y viceversa.

En la actualidad no existe ningún método estandarizado y/o reconocido industrialmente para la determinación de la fuerza de gel, sin embargo se están evaluando diferentes equipos que permiten cuantificar esta propiedad, entre ellos se encuentra el MINIMACS (Mini Multiple Analyser Cement Slurry), el cual es un equipo prototipo usado en PDVSA-INTEVEP que presenta diversos problemas operacionales.

Es por esto, que se plantea en la presente investigación el uso de las medidas de impedancia electroquímica como una alternativa para la determinación de la fuerza de gel estática, ya que el empleo de esta técnica permite cuantificar cualquier propiedad que afecte la conductividad eléctrica de un material.

El empleo de las medidas de impedancia se basa en aplicar una corriente alterna (A.C.) con un voltaje determinado (10 mV) a través de una lechada de cemento en una celda electroquímica, posteriormente se cuantifica la impedancia del sistema como una función de la frecuencia a través del tiempo. Con los valores obtenidos se busca generar una correlación que permita determinar los valores de fuerza de gel estática a partir de estas mediciones eléctricas, tomando como base los datos obtenidos con el MINIMACS y de esta manera sentar las bases para el desarrollo de una nueva metodología para cuantificar la propiedad antes mencionada.

2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Entre las diferentes etapas de construcción de un pozo de petróleo, la más crítica es la cementación del espacio anular (espacio entre las paredes del hoyo y el revestidor) debido a que el objetivo fundamental de la misma es permitir un efectivo aislamiento zonal a fin de proveer un mayor tiempo de vida del pozo.

Sin embargo, ésta es una operación bastante compleja ya que existe gran cantidad de variables que deben ser consideradas a fin de que el proceso se lleve a cabo con éxito. Uno de los principales problemas que se presentan en la cementación corresponde a la migración del gas presente en la formación, la cual consiste en la invasión del mismo dentro del espacio anular cementado, en donde puede moverse hacia zonas de baja presión o hacia la superficie, causando daños al pozo o la pérdida total del mismo.

La migración del gas representa aproximadamente el 25% de las fallas en el proceso de cementación primaria, lo cual hace necesario orientar los estudios hacia la evaluación de las propiedades de la lechada de cemento y el diseño de nuevas metodologías para evaluar su control antimigratorio.

El principal factor que previene la invasión de gas al espacio anular durante la operación de cementación es la presión hidrostática de la columna de cemento y el lodo que se encuentra encima de la misma. La capacidad de transmisión de presión hidrostática de la lechada es función de una propiedad que se conoce como Fuerza de Gel Estática. Actualmente, a pesar de que existen diferentes equipos que se emplean para cuantificar esta propiedad, no existe una metodología estandarizada para la evaluación de la misma.

Existen diferentes prototipos en la industria que permiten cuantificar la fuerza de gel estática, pero todos presentan diversas desventajas operacionales, por lo cual no se han estandarizado. Es por ello que se plantea el uso de medidas de impedancia electroquímica como una nueva técnica para evaluar el desarrollo de la fuerza de gel en lechadas de cemento, ya que las mismas permiten caracterizar cualquier propiedad de una muestra que afecte o tenga influencia sobre la conductividad de la misma.

3.- OBJETIVOS

3.1.- Objetivo general.

Estudiar e investigar la potencialidad del uso de medidas de impedancia electroquímica para correlacionarla con la fuerza de gel estática de lechadas de cemento antimigratorias para pozos petroleros.

3.2.- Objetivos específicos.

- ✓ Evaluar las propiedades físicas de lechadas de cemento comercialmente conocidas.
- ✓ Determinar la fuerza de gel estática (Static Gel Strength, SGS) de las lechadas de cemento con y sin propiedades antimigratorias.
- ✓ Aplicar la metodología de impedancia electroquímica para caracterizar lechadas de cemento petrolero con propiedades antimigratorias en condiciones de alta temperatura.
- ✓ Correlacionar los datos de impedancia electroquímica con la fuerza de gel estática en lechadas de cemento con propiedades antimigratorias.

4.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1.- Operaciones de perforación en pozos petroleros.

Una vez que se ha determinado la existencia probable de un yacimiento petrolífero, la única manera de comprobarlo es perforando. La perforación en busca de recursos naturales no es un concepto nuevo, ya que en el año 1100 DC ya se perforaban pozos de salmuera en China con profundidades de hasta 3.500 pies usando métodos similares a la perforación por percusión. ^[1]

La operación de perforación de un pozo petrolero, puede ser definida como el conjunto de acciones o actividades que permiten crear un conducto desde la superficie terrestre hasta los yacimientos en donde se encuentra atrapado el petróleo crudo con la finalidad de extraerlo de dichas capas subterráneas. Estas actividades constituyen la etapa final del proceso de búsqueda del petróleo, que empieza con la actividad geológica, caracterización del yacimiento, cuantificación en términos de volumen y estrategia de explotación del mismo. ^[2]

4.1.1.- Tipos de operaciones de perforación.

En los inicios de la industria petrolera, se empleó lo que se conoce como perforación por percusión o “a cable”, la cual consistía en el uso de una barra de configuración, diámetro y peso adecuado para desmenuzar las formaciones que se requerían atravesar. A esta barra se le acoplaban diferentes partes y mecanismos para darle más peso, rigidez y estabilidad, uno de estos mecanismos corresponde a un percutor eslabonado cuya finalidad era hacer efectivo el momento de impacto de la barra contra la roca.

Las herramientas del sistema eran levantadas hasta una cierta altura para luego dejarlas caer libremente sobre el fondo del pozo, y de este modo hacer efectiva la ruptura de la formación. Sin embargo, este es un proceso que presentaba serias desventajas, tales como la

lentitud que se evidenciaba cuando se trataba de perforar formaciones compuestas por rocas muy duras o la disminución de la efectividad de la barra cuando se trabajaba sobre rocas muy blandas.

Del mismo modo, como la operación era efectuada en seco, se presentaban dos limitaciones importantes: la primera tiene que ver con los ripios que se desprendían de la formación, ya que si no se retiraban oportunamente, el proceso se volvía extremadamente ineficiente; la segunda, era debido a que el método no proveía un mecanismo efectivo para controlar las presiones internas de la formación, por lo tanto era incapaz de controlar las paredes del hoyo y la emanación de los fluidos entrampados en las diferentes capas de dicha formación. ^[3]

Por otro lado, a inicios del siglo XX se introdujo en las actividades petroleras, el método de perforación rotatoria, el cual es usado casi universalmente en la actualidad. Esta metodología difiere radicalmente de la perforación por percusión y las innovaciones más marcadas fueron: el sistema de izaje, el sistema de circulación del fluido de perforación y los componentes de la sarta de perforación. ^[3]

Los equipos de perforación rotatoria se usan para distintos propósitos, entre ellos se encuentran la perforación de pozos de petróleo, agua, gas, geotérmicos y de almacenamiento de crudo; extracción de núcleos para el análisis de minerales y en proyectos tanto de construcción como de minería. Sin embargo, su aplicación más importante es la perforación de pozos de petróleo y gas.

En estas operaciones la barrena o mecha, queda suspendida de la extremidad de una columna de perforación tubular (tubería de perforación) sostenida por un sistema de cables/bloques que, a su vez, está sostenido por una torre de perforación (Cabria). El proceso ocurre cuando se hace girar la columna de perforación y la barrena mediante el uso de una mesa rotatoria, mientras que los lastrarrenas y la barrena imponen el peso sobre la roca.

Para enfriar y lubricar continuamente la barrena y retirar los recortes del agujero, se bombea un fluido de perforación (lodo) dentro de la columna de perforación. Al alcanzar la barrena, este lodo pasa a través de las toberas de la misma choca contra el fondo del agujero y luego sube por el espacio anular (el cual es la zona que se encuentra entre la tubería de perforación y la pared del pozo) arrastrando hacia la superficie los ripios o recortes que se encuentran en dicho espacio. En la superficie, se filtra el lodo con zarandas y otros dispositivos que eliminan los recortes y luego se bombea de nuevo dentro del pozo.

La circulación del lodo de perforación, le proporciona a la perforación rotatoria la eficacia que no se podría conseguir con la perforación por percusión, esto es gracias a la capacidad que tiene esta metodología de retirar los recortes del pozo sin sacar la tubería a la superficie.^[3]

El tiempo de perforación de un pozo dependerá de la profundidad programada y de las condiciones geológicas del subsuelo. La perforación se realiza por etapas, de tal manera que el tamaño del pozo en la parte superior es ancho y a medida que aumenta la profundidad es más angosto, esto le da estabilidad y evita derrumbes para lo cual se van utilizando barrenas y tuberías de menor tamaño en cada sección (ver Figura N° 1). Al finalizar la perforación el pozo queda completamente revestido desde la superficie hasta el fondo, lo cual garantiza su consistencia y facilitará posteriormente la extracción del petróleo en la etapa de producción.

Durante las operaciones de perforación, también son tomados registros eléctricos que ayudan a conocer los tipos de formación y las características físicas de las rocas, tales como densidad, porosidad, contenido de agua, de petróleo y gas natural. Igualmente se extraen pequeños bloques de rocas pertenecientes a cada formación perforada para analizarlos a fin de obtener un mayor conocimiento de la estructura de dichas formaciones.^[4]

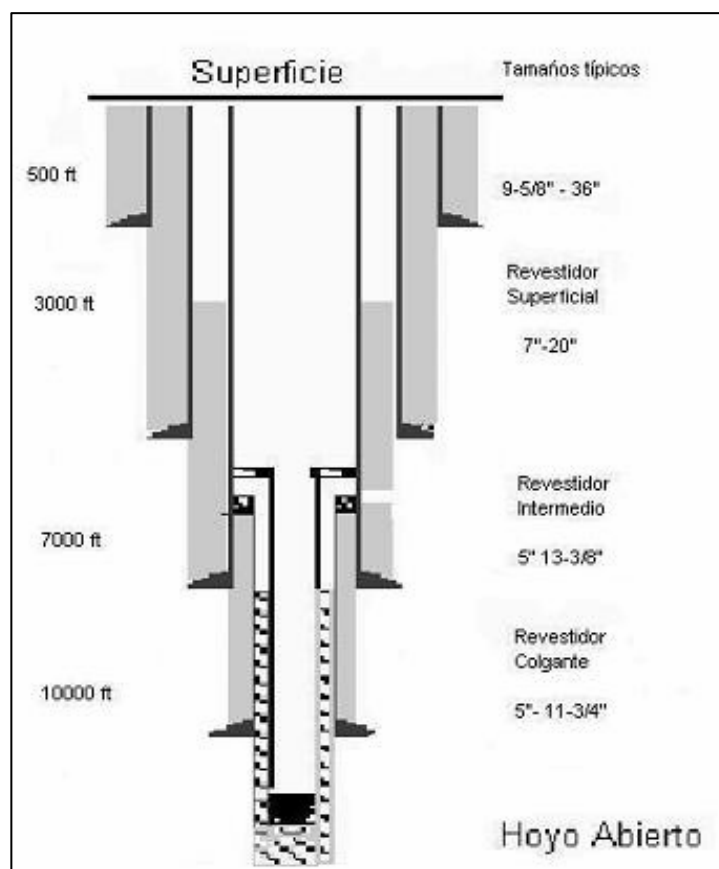


Figura N° 1: Esquema de un pozo petrolero

4.1.2.- Equipos empleados en la perforación rotatoria.

El sistema de perforación rotatoria propiamente dicho esta conformado por una gran cantidad de equipos y componentes (ver Figura N° 2), los cuales se pueden agrupar de la siguiente manera: ^[1]

Sistema de Energía: el cual esta conformado por los equipos que suministran la potencia requerida por los demás sistemas que intervienen en la operación. La potencia de esta planta debe ser suficiente como para satisfacer las necesidades de los sistemas de izaje, rotatorio y de circulación del fluido. Dicha planta puede ser mecánica, eléctrica o electromecánica y la misma consiste generalmente de dos o más motores Diesel cuya configuración es tal que permiten obtener gran flexibilidad en la distribución de la energía producida.

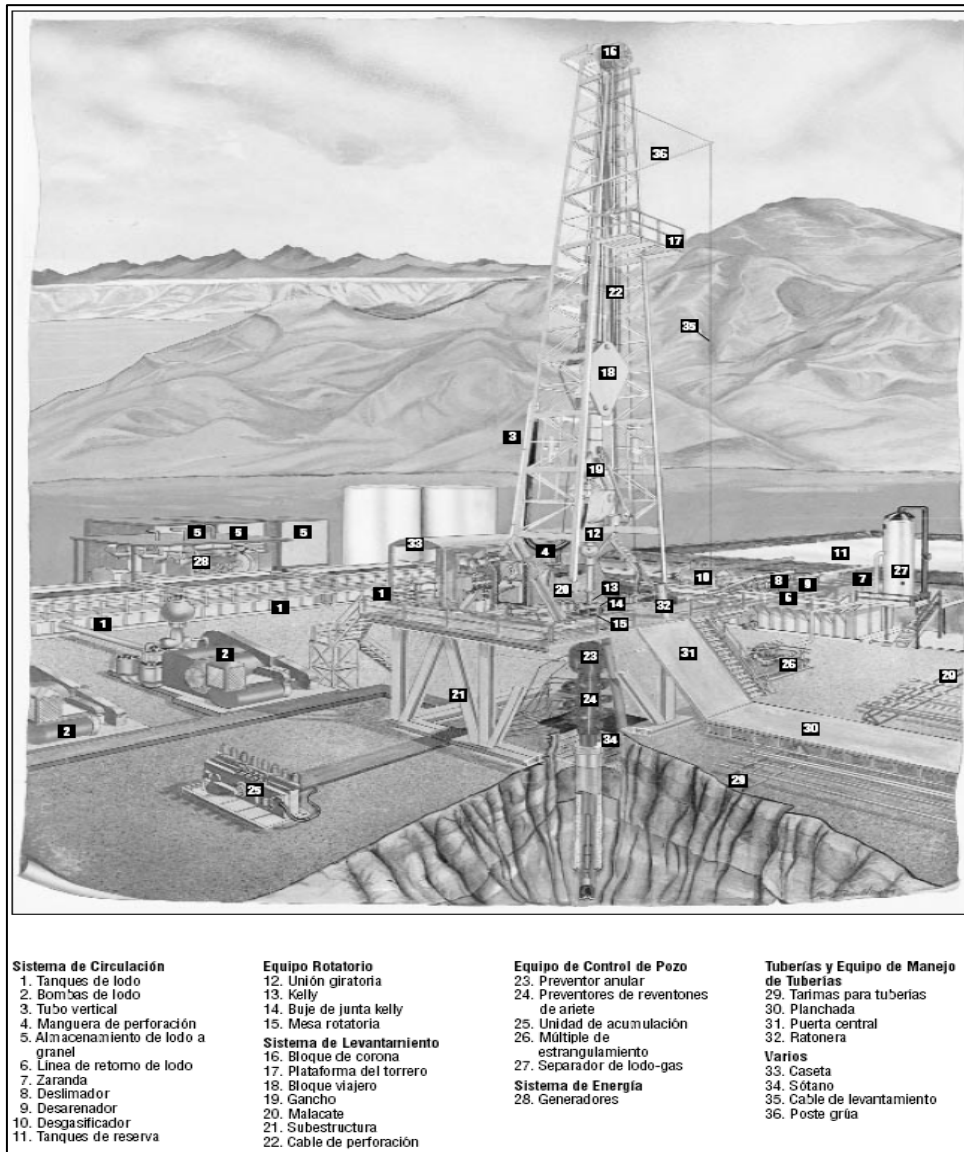


Figura N° 2: Sistema de perforación rotatoria.

Sistema de Izaje: este sistema cumple con una importante función dentro de las operaciones, ya que es al que corresponde la tarea de meter y/o sostener en el hoyo o extraer del mismo todo el sistema de tuberías que conforman la sarta de perforación y los revestidores. Los componentes principales de este sistema son: el malacate, el cable de perforación, la cabria (torre) de perforación y el aparejo o polipasto. Todas las actividades que son necesarias llevar a cabo para realizar la perforación de un pozo petrolero, requieren de un sistema de izaje que sea robusto, con suficiente potencia y mandos seguros que garanticen la realización y seguridad de las operaciones.

Sistema Rotatorio: el cual es parte esencial del equipo de perforación ya que por medio de sus componentes es posible hacer el hoyo hasta la profundidad deseada. Este sistema esta compuesto por: la mesa rotatoria o colisa, la junta o unión giratoria, la junta Kelly, la tubería o sarta de perforación y la barrena. ^[3]

La mesa rotatoria va instalada en el centro del piso de la cabria y la misma debe cumplir con dos funciones principales: la primera es impartir el movimiento rotatorio a la sarta de perforación y la segunda es sostener todo el peso de esta sarta mientras se le enrosca otro tubo para seguir ahondando en el hoyo o mientras se desenrosca en parejas o triples para sacarla toda del hoyo.

La junta giratoria tiene la finalidad de conectar los equipos de elevación y de circulación de fluidos al sistema rotatorio. Por medio de su asa se conecta al sistema de izaje, mediante un tubo conector encorvado que lleva en su parte superior se une a las mangueras del sistema de circulación del fluido de perforación y por medio del tubo conector que se encuentra en su base se enrosca a la junta Kelly. ^[3]

La junta Kelly, la cual es conocida también como cuadrante y es en sí un eje que lleva un buje especial que se conecta con la mesa rotatoria y por medio de este buje la mesa rotatoria le imparte rotación al eje. Por su función, por las cargas estáticas y dinámicas a las que está sometida y por lo esfuerzos de torsión que se le imponen entre otras cosas, esta junta tiene que ser fabricada con las aleaciones más resistentes.

La sarta de perforación es una columna de tubos de acero, de fabricación y especificaciones especiales, en cuyo extremo inferior va colocada la sarta lastrabarrenas y en el extremo de ésta está enroscada la barrena de perforación la cual es una pieza que también es de fabricación y especificaciones especiales que se emplea para cortar los estratos de la formación a fin de hacer el hoyo que llegará al yacimiento. A toda la sarta se le imparte el movimiento rotatorio por medio de la junta Kelly, la cual está conectada a dicha sarta por la parte superior. ^[3]

Sistema de Circulación de Fluidos: este sistema es una parte esencial en la perforación, ya que cumple con las funciones del transporte, mezclado, tratamiento y manejo del fluido de perforación durante las operaciones. Está conformado por el conjunto de equipos que forman el circuito de circulación y por el lodo de perforación propiamente.

4.1.3.- Fluidos de perforación.

4.1.3.1.- Definición.

Son fluidos circulantes que se utilizan durante las operaciones de perforación rotatoria, de características químicas y físicas apropiadas que les permiten adaptarse a una gran variedad de condiciones para satisfacer las funciones más complejas de la perforación. Este fluido puede ser aire u otro gas, agua, petróleo y combinaciones de agua y aceite con diferente contenido de sólidos.

El propósito fundamental del lodo es ayudar a hacer rápida y segura la operación de perforación mediante el cumplimiento de ciertas funciones. Si el lodo falla en satisfacer una u otra función se puede cambiar o mejorar su composición mediante la adición de arcillas comerciales, material densificante, agua o algún otro producto químico. [5]

4.1.3.2.- Funciones de los fluidos de perforación.

Los fluidos de perforación tienen, entre otras, las siguientes funciones: [6]

- ✓ Transportar los cortes de las formaciones hasta la superficie y enfriar la mecha de perforación.
- ✓ Reducir la fricción entre la sarta de perforación y las paredes del hoyo.
- ✓ Mantener la estabilidad del hoyo y prevenir el influjo de fluidos desde las formaciones permeables.

-
-
- ✓ Formar una película protectora sobre las formaciones permeables llamada revoque.
 - ✓ Permitir la recolección de los cortes de las formaciones penetradas, para ser evaluadas y permitir tomar los registros que dan información sobre el pozo.
 - ✓ Sostener las tuberías y revestidores al aminorar el peso por la flotación que causa.
 - ✓ No debe causar daño a la salud del personal y debe ser benigno al medio ambiente.
 - ✓ Debe permitir terminar el pozo sin muchas complicaciones o problemas y no debe interferir con la producción del mismo.
 - ✓ No debe corroer las partes metálicas ni desgastarlas.

4.1.3.3.- Propiedades de los fluidos de perforación.

Densidad: crea una columna hidrostática o hidrodinámica en el anular del hoyo para contener las paredes del mismo y los fluidos que contienen las formaciones permeables también detiene la cedencia de algunas formaciones. Dependiendo de la presión de la formación se define el tipo de lodo a ser usado. ^[6]

Viscosidad de Embudo: tiene solamente una utilidad referencial para controlar cualquier cambio brusco en la viscosidad del lodo. No se utiliza para determinar causa alguna para el cambio de la viscosidad de la mezcla pero es útil en el momento de detectar algún inicio de un problema con las propiedades del lodo que afecte sus funciones.

Propiedades reológicas: se usan básicamente para relacionar el módulo viscoso (calor) y el elástico (trabajo) que los fluidos no-Newtonianos poseen. En perforación, los fluidos son generalmente no-Newtonianos. Los modelos más usados en fluidos de perforación son el de Plástico de Bingham y la ley de Potencia.

Filtrado: determina el grado de separación de la fase líquida del lodo, dejando una costra de sólidos en las paredes de las formaciones permeables que se denomina revoque. Esta función está relacionada con la penetración del fluido en formaciones permeables, lo cual puede ser origen de daños a las formaciones productoras en caso de

que exista incompatibilidad del filtrado con los fluidos de las formaciones, o que la fase libre moje las paredes de formaciones reactivas como las arcillas y las active, lo que causa hinchamiento, dispersión y/o desprendimiento del hoyo. ^[6]

Distribución de partículas: esta es una propiedad asociada al control del filtrado y al posible taponamiento de los sólidos transportados en el fluido a las formaciones que atraviesa.

Control de sólidos: se refiere a tener un contenido de sólidos cercano a las cantidades diseñadas en la mezcla y extraer los sólidos incorporados de la formación, que pueden alterar drásticamente las propiedades del lodo.

Bacterias, pH, iones y sulfatos: son propiedades que se determinan a través de los análisis químicos que se realizan al filtrado del lodo. El control bacteriano es imprescindible ya que sobre todo el lodo base agua es propenso a ser atacado por bacterias, lo cual descompone la mezcla. El pH preserva al lodo de ataques bacterianos y hace que algunos productos se activen. Los sulfatos, que pueden ser generados por las bacterias o por descomposición de algunos productos orgánicos, modifican la reología del lodo y pueden causar floculación de la mezcla. ^[6]

4.2.- Operaciones de cementación de pozos petroleros.

En la construcción de pozos petroleros y de gas, a medida que la profundidad del mismo aumenta, se van colocando revestidores, los cuales son tubos de acero cuya función principal es la de proveer estabilidad al pozo a fin de evitar que el mismo colapse, del mismo modo también es necesaria la cementación del espacio anular (espacio que queda entre el revestidor y las paredes del pozo), esto se hace con la finalidad de proveer un efectivo aislamiento zonal y proteger el revestidor. ^[7]

La cementación de pozos se define como un procedimiento combinado de mezcla de cemento y agua, y el bombeo de ésta a través de la tubería de revestimiento o la de

producción en zonas críticas, esto es, alrededor del fondo de la zapata de la tubería revestidora, en el espacio anular, en el hoyo no revestido y más abajo de la zapata o bien en la formación permeable. ^[3]

El proceso de cementación consiste en el desplazamiento de una cantidad suficiente de lechada de cemento a través del revestidor con la finalidad de colocarla en el espacio entre dicho revestidor y las paredes del pozo. Se conoce como lechada de cemento a la mezcla del cemento con los diferentes aditivos que se le agregan y el agua. Los objetivos fundamentales de las operaciones de cementación son: ^[8]

- ✓ Restringir el movimiento de los fluidos presentes en las zonas permeables de la formación (aislamiento zonal).
- ✓ Proveer el soporte mecánico al revestidor.
- ✓ Proteger al revestidor de la corrosión.
- ✓ Brindar un soporte a las paredes de la formación a fin de evitar el colapso de las mismas.

4.2.1.- Clasificación de los procesos de cementación.

Los procesos de cementación se clasifican de acuerdo a su finalidad en: cementación primaria y cementación secundaria o remedial.

4.2.1.1.- Cementación primaria.

La cementación primaria es el proceso mediante el cual la lechada de cemento es colocada en el espacio anular que se encuentra entre la tubería de revestimiento y las paredes de la formación expuestas en el pozo. Desde su implementación en el año 1903, el principal objetivo del proceso de cementación primaria ha sido siempre lograr un efectivo aislamiento zonal en pozos de petróleo, gas y agua, a fin de evitar que otros fluidos no deseados ingresen a los mismos. ^[9]

Para alcanzar este objetivo, debe asegurarse un sello hidráulico entre el revestidor y el cemento y entre el cemento y las paredes de la formación, mientras que al mismo tiempo se debe prevenir la formación de canales de flujo en la matriz del cemento (ver Figura N° 3). Estos requerimientos hacen de la cementación primaria la operación más importante dentro de la construcción de un pozo. [9]

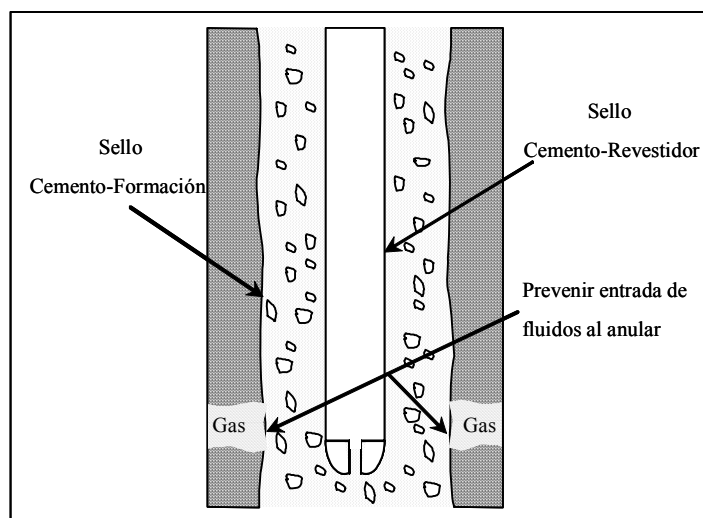


Figura N° 3: Objetivos de la cementación primaria.

La cementación primaria es realizada a presiones tales que la mezcla de cemento pueda ser bombeada a través del revestidor hasta la zapata que lleva la sarta en el fondo de la misma, la cual siempre se deja a cierto espacio del fondo del hoyo. Posteriormente la lechada de cemento asciende por el espacio anular hasta que el mismo queda cubierto completamente o hasta el nivel requerido, si en algunos casos se requiere cementar totalmente el anular hasta la superficie y dicho objetivo por alguna razón no es alcanzado, se complementa la cementación bombeando lechada desde la superficie hasta que se complete la operación.

Las funciones de la cementación primaria son las siguientes: [3]

- ✓ Afianzar el revestidor y protegerlo contra el deterioro que pueda sufrir durante los posteriores trabajos de reacondicionamiento que se le puedan hacer al pozo, así como las formaciones cercanas ya sean gasíferas, petroleras y/o acuíferas.

-
-
- ✓ Lograr el aislamiento de las formaciones productivas y el confinamiento de estratos acuíferos, así como evitar la migración de fluidos entre las formaciones y el espacio anular.
 - ✓ Proteger las formaciones contra derrumbes.
 - ✓ Reforzar el revestidor contra posibles aplastamientos producidos por las presiones externas, así como la resistencia de la tubería a presiones de estallido.
 - ✓ Proteger el revestidor contra la corrosión y contra los futuros trabajos de cañoneo.

Los equipos principales necesarios para llevar a cabo las operaciones de cementación primaria son (Ver Figura N° 4): ^[9]

- ✓ **Zapata guía:** el cual es un equipo que se encuentra en el fondo de la tubería de revestimiento y que tiene como función principal guiar a la misma a través del descenso en el hoyo, hasta ser colocada en su posición final. En su parte interna lleva un mecanismo de obturación, que actúa como una válvula de un solo paso la cual no permite que el fluido de perforación que se encuentra en el hoyo entre a la sarta pero sí que el fluido que se encuentra en la sarta pueda ser bombeado hacia el hoyo. ^[3]
- ✓ **Centralizador:** consiste en una herramienta, que es colocada alrededor de la tubería de revestimiento y que permite que la sarta quede bien centrada en el hoyo, a objeto de evitar que existan defectos en la continuidad del cemento en el espacio anular debido a una mala disposición espacial de la tubería.
- ✓ **Zapata flotadora:** este equipo ayuda a reforzar la tarea de la zapata guía. Se encuentra ubicado entre dos tubos del revestidor y actúa como válvula de contra presión. Esta tiene un asentamiento que se utiliza para que el tapón superior se sitúe de forma tal que impida el desplazamiento de la lechada de cemento evitando la contaminación del lodo.
- ✓ **Tapón inferior:** se desplaza delante de la lechada de cemento y su tarea principal además de separar la lechada de los preflujos es limpiar el interior del revestidor y evitar la contaminación del cemento. Este aparato se asienta en el interior de la

tubería y se rompe con un incremento de presión para permitir el paso de la lechada hacia el espacio anular.

- ✓ **Tapón superior:** su función principal es separar la lechada de cemento del fluido de perforación con el cual se impulsa la circulación del cemento a través de la tubería. Este equipo está diseñado para que cuando se asiente en la zapata flotadora se lea un incremento de presión y en este punto comparar el volumen de lechada de cemento desplazado con el calculado.

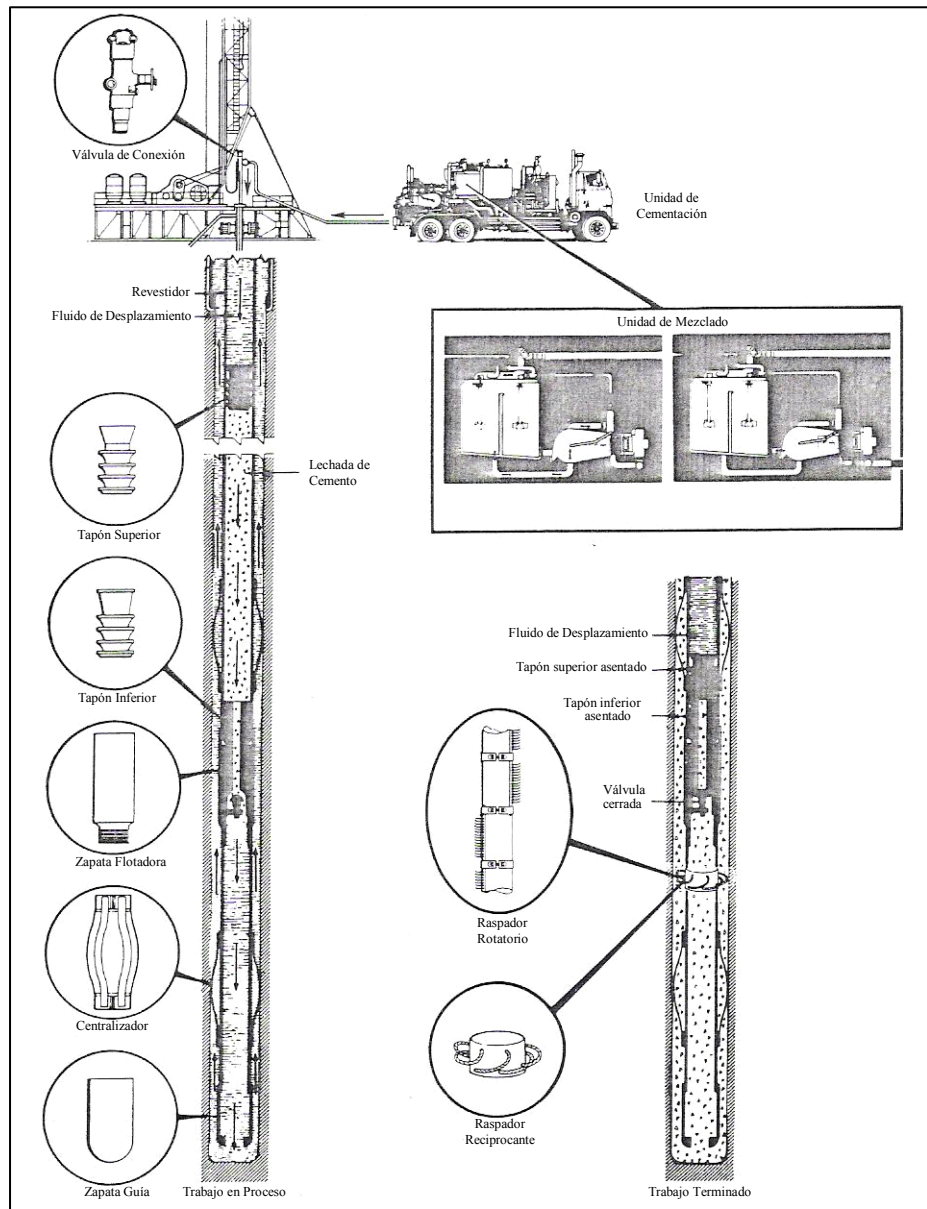


Figura N° 4: Esquema de la cementación primaria.

4.2.1.2.- Cementación secundaria o remedial.

La cementación secundaria o remedial se define como el proceso de forzar, mediante la aplicación de presión, el paso de la lechada de cemento a través de los canales o espacios vacíos que se encuentran en el espacio anular existente entre el revestidor y las paredes del pozo. Este tipo de cementación tiene muchas aplicaciones, ya sea durante la perforación o en las tareas de terminación de los pozos, o posteriormente durante el transcurso de la vida productiva de los mismos, en los trabajos de reparación y/o reacondicionamiento. ^[10]

Las aplicaciones más comunes para este tipo de cementación son las siguientes ^[9]:

- ✓ Reparación de los trabajos de cementación primaria, que fallaron debido a la contaminación de la lechada con lodo de perforación (canalización) o por una cantidad insuficiente de cemento en el espacio anular.
- ✓ Aislamiento de la zona productora de los diferentes mantos acuíferos que se encuentran por encima, por debajo o asociados a la misma.
- ✓ Reducción de la relación gas/crudo producido mediante el aislamiento de las zonas de gas presentes en las adyacencias de la zona productora.
- ✓ Reparación de filtraciones en el revestidor debido a la corrosión o a roturas en la tubería.
- ✓ Abandono de zonas no productivas o agotadas.
- ✓ Protección de la zona productora contra la migración de fluidos.
- ✓ Sellado de las zonas de pérdidas por circulación.

4.2.2.- Métodos para la cementación.

4.2.2.1.- Remoción del fluido de perforación.

Como se mencionó anteriormente, el principal objetivo de los trabajos de cementación es lograr un completo y efectivo aislamiento entre el pozo y los diferentes estratos permeables que se van perforando, a fin de asegurar el mayor tiempo de vida posible del hoyo. Para lograr este objetivo, tanto el lodo de perforación como los diferentes preflujos empleados para removerlo (sí existiesen) deben ser completamente retirados del espacio anular, el cual para que la operación se concrete con éxito debe ser llenado completamente con la lechada de cemento. ^[9]

En algunas ocasiones, el contacto directo entre la lechada de cemento y el lodo de perforación forma una interfase de alta viscosidad que ocasiona dificultades en la bombeabilidad de la lechada, además de una serie de problemas operacionales de considerable envergadura. Cuando lo anterior sucede se dice que los fluidos son incompatibles, lo cual tiene serias implicaciones a la hora de efectuar la operación de cementación del pozo, ya que por ejemplo, la interfase cemento-lodo representa una capa en la que no se podrá lograr un efectivo aislamiento, lo cual implica un costo adicional en cementación remedial para subsanar las fallas inherentes a este fenómeno.

En los casos donde se presenta incompatibilidad entre la lechada de cemento y el lodo de perforación, se hace necesario el uso de preflujos, los cuales son fluidos que se bombean entre el lodo y la lechada y que son compatibles con ambos. Dichos preflujos tienen dos funciones principales, la primera es prevenir o minimizar el contacto cemento-lodo; la segunda es eliminar el lodo del revestidor y las paredes del pozo, a fin de limpiar las superficies del hoyo para que la adherencia del cemento con las paredes tanto del hoyo como del revestidor sea la óptima. ^[9]

Una vez colocada en el espacio anular, la lechada debe endurecerse y desarrollar las propiedades mecánicas necesarias para proveer y mantener un sello hidráulico tal que

asegure la estabilidad del pozo y una larga vida operativa, por lo tanto una efectiva remoción del lodo de perforación y un adecuado desplazamiento de la lechada a través del espacio anular es fundamental para lograr el aislamiento del pozo. ^[9]

Una remoción inadecuada del lodo puede promover canales de lodo a través de las zonas de interés, los cuales pueden formar canales a través de los cuales puede haber circulación de fluidos de una zona de alta presión a una de menor presión, por lo tanto la durabilidad y efectividad del sello formado por el cemento depende en gran medida de la eficiencia en la remoción del lodo de perforación y de la capa sólida (revoque) formada por el mismo en las paredes del hoyo.

4.2.2.2.- Cementación en una etapa.

La cementación por etapas corresponde al tipo más sencillo de operación que se puede llevar a cabo, ya que consiste en bombear de manera continua una cantidad tal de lechada a través del revestidor, que pueda llenar completamente el espacio anular que se requiere cementar. Esta operación se usa generalmente en hoyos poco profundos o en las secciones más superficiales de un pozo.

Para llevar a cabo esta operación, se retira el lodo de perforación que circula por el revestidor, bombeando inicialmente un preflujo, posteriormente y de manera continua se hace circular la lechada de cemento a través de la tubería de revestimiento, separándola del preflujo con el tapón inferior. Cuando este tapón inferior queda retenido en la zapata flotadora, por efecto de la presión se rompe y entonces se permite el paso de la lechada de cemento hacia el espacio anular a través de la zapata guía (ver Figura N° 5).

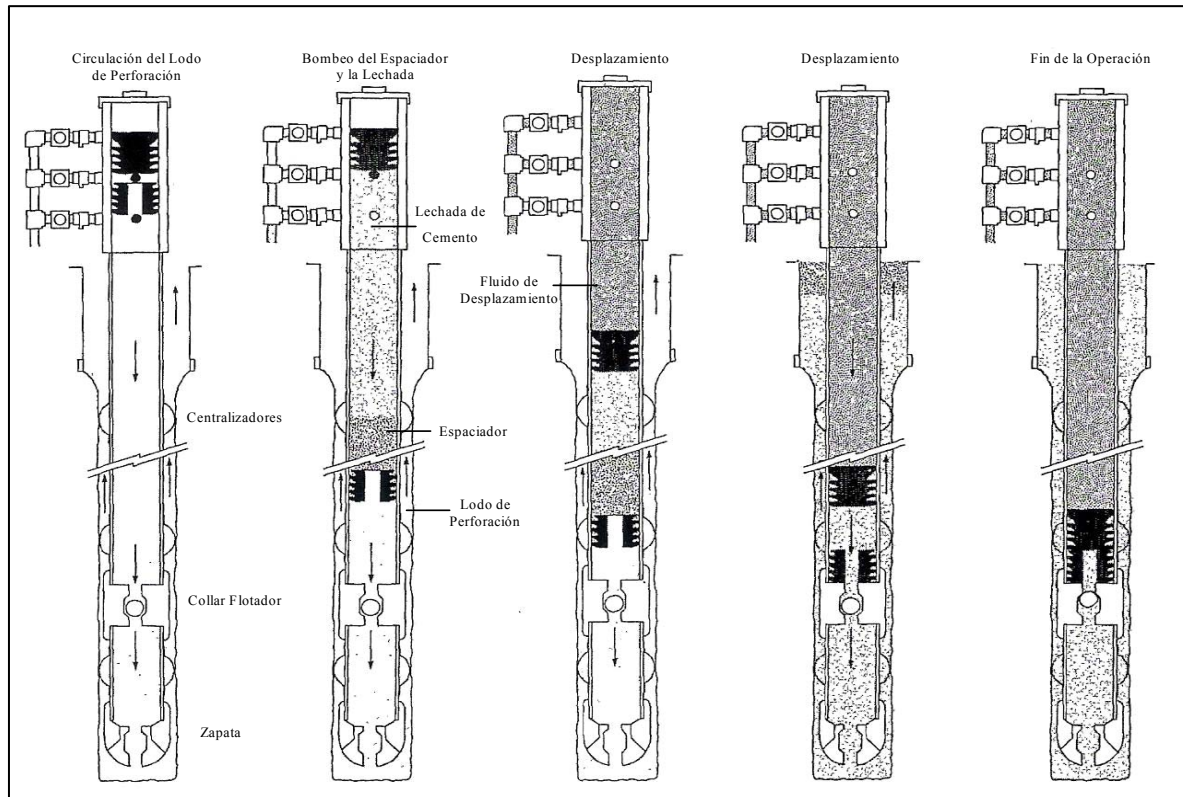


Figura N° 5: Cementación en una etapa.

Para mover la lechada a través del espacio anular se ejerce presión de bombeo sobre la misma, empleando para ello un fluido de desplazamiento (lodo de perforación), el cual se separa de la lechada mediante el uso del tapón superior. Este es una herramienta que permite determinar que la operación ha concluido y que todo el volumen de lechada calculado ha sido desplazado, mediante un aumento de presión en la tubería de revestimiento producido cuando el tapón se asienta en la zapata flotadora.

4.2.2.3.- Cementación en varias etapas.

Este tipo de operación de cementación se utiliza en pozos con grandes profundidades y tiene algunas ventajas con respecto a la cementación en una etapa ya que además de reducir la presión de bombeo reduce también la presión hidrostática de la columna de lechada en formaciones débiles, lo cual previene la fractura de las mismas. ^[9]

Este método se emplea en diversas situaciones, como por ejemplo:

- ✓ Cuando existe el peligro de fracturas en la formación debido a presión hidrostática suministrada por la lechada.
- ✓ En los casos en los que el tiempo de bombeo de la lechada esta limitado debido al posible fraguado prematuro de la misma en pozos profundos a altas temperaturas.
- ✓ Cuando debido a las condiciones térmicas se requiere el uso de materiales cementantes diferentes.
- ✓ En los casos en los que se desea reducir la presión en la boca del pozo producida por el bombeo de la lechada.

4.2.3.- Composición y clasificación del cemento Portland.

El cemento es fabricado de forma corriente usando materiales y métodos que han cambiado poco desde los inicios de esta industria. En 1824, Josep Aspdin, un constructor de Leeds (Reino Unido), obtuvo una patente para “un cemento de calidad superior parecido al Portland Stone”. El cemento de Aspdin era preparado procesando porciones fijas de materiales calcáreos (piedra caliza, tiza y conchas marinas) con aluminosilicatos (arcillas) en un horno a temperaturas muy altas (1425 °C - 1535 °C). El material resultante que se llama escoria, o Clinker, es enfriado luego y entremolido con yeso para formar el cemento Portland. El yeso se agrega para evitar un fraguado instantáneo. Además de los componentes básicos citados anteriormente, otros materiales tales como arena, bauxita y óxido de hierro pueden ser usados en la alimentación del horno para ajustar los índices elementales de la escoria resultante. ^[11]

Los principales componentes del cemento Portland común se presentan en la tabla N° 1:

Tabla N° 1: Composición del cemento Portland.

<i>Nombre</i>	<i>Porcentaje (%)</i>	<i>Formula Química</i>
Silicato Tricálcico (C ₃ S)	50	3 CaO.SiO ₂
Silicato Dicálcico (C ₂ S)	25	2 CaO.SiO ₂
Aluminato Tricálcico (C ₃ A)	9	3 CaO.Al ₂ O ₃
Ferroaluminato Tricálcico (C ₄ AF)	10	4 CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃
Otros Óxidos	5	- - - -

Las cantidades relativas de los componentes anteriores pueden ser variadas dependiendo de la aplicación que se pretende darle al cemento. El componente que tiene la mayor influencia sobre las características globales de resistencia del cemento Portland es el C₃S. El C₃A muestra la tasa más rápida de hidratación, el fraguado inicial y el tiempo de espesamiento del cemento, al igual que la sensibilidad del cemento fraguado a las aguas que contienen sulfatos, son influenciados por la concentración de este componente. El C₂S es el componente de reacción lenta que le hace adquirir gradualmente la resistencia, lo cual ocurre en un periodo prolongado de tiempo. Finalmente el C₄AF, es el componente de baja temperatura para la hidratación del cemento. ^[11]

De lo anterior se evidencia que el cemento está compuesto principalmente por una mezcla de óxidos metálicos anhídridos. La adición de agua a este material tiene el efecto de convertir estos compuestos. Después de un periodo de tiempo, los hidratos forman una estructura cristalina entramada que resulta en el fraguado del cemento y su impermeabilidad. ^[11]

Los materiales cementantes se clasifican según su uso en petroleros y de construcción. En líneas generales, todos los cementos son fabricados esencialmente de la misma forma y están compuestos por los mismos ingredientes, sólo que en diferentes proporciones. Los cementos de construcción se clasifican según la ASTM (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales) en Tipos I, II, III, IV y V, mientras los cementos

petroleros se clasifican según el API (Instituto Americano de Petróleo) en clases A,B,C,D,E,F,G y H. ^[12]

Las clases A,B y C de la clasificación del API corresponden a los tipos de cemento I, II, III de la ASTM, y las demás clases han sido desarrolladas para permitir el uso de aceleradores, retardadores y otros aditivos a fin de cumplir con requerimientos especiales^[12], por otro lado los tipos IV y V de la ASTM no tiene correspondencia con la clasificación del API. Del mismo modo, los cementos petroleros también son subclasificados en grados de acuerdo a su resistencia a los sulfatos en Ordinario (O), de moderada resistencia (MSR) y de alta resistencia (HSR). ^[13]

Las diferentes clases de cemento definidas por el API, tienen usos distintos, entre ellos se encuentran: ^[9]

- ✓ **Cemento clase A:** Está diseñado para ser usado desde la superficie hasta 6000 pies de profundidad, donde propiedades especiales de la lechada no son requeridas. Se encuentra disponible sólo en grado ordinario. Esta clase es similar al cemento tipo I de la ASTM.
- ✓ **Cemento clase B:** Se emplea a profundidades que van desde la superficie hasta 6000 pies, en hoyos que requieren de cemento con resistencia moderada o alta a los sulfatos. Esta clase es similar al cemento tipo II de la ASTM, y contiene menos C₃A que el de clase A.
- ✓ **Cemento clase C:** Está diseñado para ser usado a profundidades que van desde la superficie hasta 6000 pies, se emplea cuando se requiere de lechadas de baja densidad para evitar fracturas en la formación. Esta clase se encuentra disponible en todos los grados de resistencia a los sulfatos y es similar al cemento Tipo III de la ASTM.
- ✓ **Cemento clase D:** Diseñado para profundidades que van desde los 6000 pies hasta los 10000 pies, bajo condiciones de presión y temperaturas moderadamente altas. Está disponible sólo en los grados MSR y HSR.

-
-
- ✓ **Cemento clase E:** Diseñado para usar en profundidades que van desde 10000 pies hasta 14000, bajo condiciones de temperatura y presión altas. Igualmente se encuentra disponible sólo en los grados MSR y HSR.
 - ✓ **Cemento clase F:** El cual está diseñado para ser usado en profundidades que van desde los 14000 pies hasta los 16000 pies, en donde debe soportar presiones y temperaturas extremadamente altas. Esta clase de cemento se encuentra disponible en los grados MSR y HSR.
 - ✓ **Cemento clase G y H:** Diseñados para ser usados como cementos básicos para pozos de profundidades que van desde la superficie hasta 8000 pies, o también pueden ser usado con aditivos tales como aceleradores y retardadores para cubrir un amplio rango de profundidades y condiciones de pozo. Se encuentran disponibles en los grados MSR y HSR. Estas clases de cemento fueron desarrolladas como respuesta a las nuevas tecnologías en aceleradores y retardadores de lechadas por medios químicos. La composición de estas clases es básicamente la misma, sólo se diferencian en el área superficial de las partículas del Clinker. ^[9]

4.2.4.- Propiedades físicas de las lechadas de cemento.

Se define como lechada de cemento a la combinación de agua de mezcla y cemento, donde el agua de mezcla corresponde a la cantidad de agua pura que se requiere para preparar la lechada mas los diferentes aditivos en estado líquido que se le agregan a la misma con la finalidad de alterar una o varias de sus propiedades físicas y químicas. Las propiedades de las lechadas de cemento que son comúnmente evaluadas, son las siguientes:^[13]

- ✓ **Tiempo de espesamiento:** el cual es también conocido como tiempo de bombeabilidad, y corresponde a la cantidad de tiempo en que la lechada permanecerá fluida para que pueda ser bombeada bajo condiciones de pozo ^[14]. Otra manera de definirla es como el tiempo que toma la lechada en espesarse hasta 100 unidades Bearden de Consistencia (Bc). El tiempo de espesamiento es un parámetro muy importante, ya que debe ser mayor que el tiempo que va a durar la

operación, de lo contrario el cemento puede fraguar dentro del revestidor, o en zonas no deseadas. Por tal motivo, generalmente se debe cumplir que el tiempo de espesamiento sea mayor que el tiempo de operación, más un factor de seguridad que va de una a dos horas.

- ✓ **Densidad de la lechada:** corresponde a la cantidad de masa por unidad de volumen que posee la lechada de cemento, normalmente se expresan en unidades de Libras por Galón (LPG). Es importante controlar la densidad de la lechada para minimizar tanto los riesgos de fractura de la formación, la cual puede ser generada por una excesiva carga hidrostática provocada por la columna de lechada, como el flujo de fluidos a alta presión que se encuentran en dicha formación.
- ✓ **Resistencia a la compresión:** se define como la fuerza por unidad de área requerida para fracturar una muestra de cemento y es una medida de la dureza del mismo, es decir de su capacidad para resistir los esfuerzos.
- ✓ **Fluido libre:** líquido con o sin color que se separa de la lechada de cemento luego de permanecer en reposo durante 2 horas.
- ✓ **Reología:** por medio de esta prueba se describe el comportamiento de la lechada de cemento cuando fluye a través de tuberías y otros conductos. Para tal fin se emplean diferentes modelos de flujo, y se comparan con el mostrado por la lechada para determinar sus diferentes parámetros.
- ✓ **Pérdida de fluido:** es la cantidad de fluido que pierde una lechada cuando atraviesa una zona permeable, a nivel del laboratorio, esta prueba se lleva a cabo en un equipo de filtrado HPHT (alta presión y alta temperatura), en donde la lechada es sometida a un diferencial de presión de 100 psi durante treinta minutos y se filtra a través de una pantalla de 325 mesh.

4.2.5.- Aditivos del cemento.

Los pozos petroleros cubren amplios rangos de profundidades y distintas condiciones de presión y temperatura. En la actualidad existe gran cantidad de aditivos que se utilizan con el cemento petrolero para conseguir características óptimas de una

lechada de cemento para cualquier condición de pozo. Entre los aditivos más comunes se encuentran: ^[9]

- ✓ ***Aceleradores:*** son compuestos químicos que tienen la función de reducir el tiempo de fraguado de la lechada de cemento e incrementar el desenvolvimiento de la resistencia a la compresión. Muchas sales inorgánicas se usan como aceleradores del cemento Portland, entre estas los Cloruros son las más conocidas, sin embargo, se ha reportado el uso de otras sales tales como Carbonatos, Silicatos, Aluminatos, Nitratos, Nitritos, Sulfatos y algunas bases como los hidróxidos de Sodio, Potasio y Amonio.
- ✓ ***Retardadores:*** son químicos que extienden el tiempo de fraguado de la lechada de cemento. Las sales sódicas y cálcicas de los ácidos Lignosulfónicos son los retardadores más usados en los cementos petroleros. Los Lignosulfonatos son polímeros derivados a partir de la pulpa de madera. Entre otros compuestos retardadores se encuentran los ácidos Hidroxicarboxílicos, los compuestos Sacáridos, los derivados de celulosa (Polisacáridos) y algunos compuestos inorgánicos como el Cloruro de Sodio concentrado.
- ✓ ***Extendedores:*** son materiales que disminuyen la densidad de la lechada de cemento, es decir, que reducen la cantidad de cemento por unidad de volumen de mezcla. Entre los extendedores más usados se encuentran la Bentonita, los Silicatos Sódicos, Sílice, Microesferas y extendedores gaseosos como el Nitrógeno y el aire, los cuales son usados para preparar cementos espumados.
- ✓ ***Densificantes:*** materiales de alta gravedad específica que incrementan la densidad de la mezcla cementante. Los más usados en la industria son la Ilmenita, la Hematita y la Barita.
- ✓ ***Dispersantes:*** son compuestos químicos que reducen la viscosidad de la lechada de cemento. Los Sulfonatos son los dispersantes más comunes para lechadas de cemento, y son preferibles los materiales que contienen de 5 a 50 grupos Sulfonatos enlazados a una cadena polimérica altamente ramificada. Sin embargo algunos polímeros lineales tales como pequeñas moléculas orgánicas que contienen algunos grupos aniónicos también son efectivas como dispersantes.

-
-
- ✓ ***Agentes para el control de la pérdida de fluido:*** son materiales que permiten controlar la pérdida de la fase acuosa del sistema cementante hacia la formación. Existen básicamente dos tipos de aditivos para el control de la pérdida de fluido: los materiales particulados finamente divididos, entre los que se encuentran la Bentonita y los Látex; y los polímeros solubles en agua, tales como algunos derivados de celulosa.
 - ✓ ***Agentes para la prevención de pérdida circulación:*** son compuestos químicos que controlan la pérdida de lechada de cemento hacia formaciones débiles o permeables. Entre los materiales más usados se encuentran la Gilsonita y el carbón granulado.
 - ✓ ***Aditivos especiales:*** cualquier otro tipo de aditivo que no se encuentre en la clasificación anterior, tal como agentes antiespumantes, fibras, agentes descontaminantes y trazadores radioactivos, que permitan mejorar las propiedades físicas del cemento fraguado.
 - ✓ ***Agentes controladores de migración de gas:*** son compuestos que previenen que el gas que se encuentra en la formación se mueva hacia el espacio anular cementado, entre este tipo de materiales se encuentra el Látex y algunas mezclas poliméricas.

4.3.- Fenómeno de migración de fluidos en pozos petroleros.

En los pozos de petróleo y gas el cemento es bombeado en el espacio anular que existe entre la formación perforada y la tubería de revestimiento. La función principal del cemento es prevenir cualquier comunicación de fluidos entre las diferentes formaciones perforadas para proveer un efectivo aislamiento zonal durante un largo periodo de tiempo, de modo tal que la producción sea lo más segura y económica posible. Dicho aislamiento debe ser mantenido durante las operaciones del pozo y luego de que el mismo sea abandonado, y consiste en evitar que los diferentes fluidos que se encuentran en la formación confinados a alta presión entren al espacio anular y se muevan ya sea a una zona de menor presión o hacia la superficie del pozo. ^[15]

La migración de fluidos consiste en la invasión y posterior movimiento al espacio anular cementado de agua o gas, una vez allí pueden dirigirse hacia zonas de la formación que tengan menor presión o hacia la superficie. Este fenómeno es originado principalmente por el desequilibrio de presiones que puede llegar a suscitarse en la interfase cemento-formación. ^[9]

La migración de fluidos en el espacio anular de un pozo puede ocurrir ya sea durante la perforación o la completación del mismo y este ha sido uno de los problemas más molestos de la industria petrolera desde que el mismo fue identificado a principios de 1960 cuando se suscitó un serio problema de comunicación de gas en un pozo de almacenamiento en Estados Unidos. Dentro de la categoría de los problemas de migración de fluidos, la de gases es la más frecuente y sin duda la más crítica y peligrosa. Las fallas en los trabajos de cementación primaria llegan hasta un 15% del total de las operaciones realizadas, y de esta cuota, al menos un tercio corresponde a problemas con migración de los fluidos que se encuentran en la formación. ^[16]

La migración de gas es un problema potencial en casi todos los pozos en los que se entra en contacto con yacimientos ya sean de gas o de crudo con gas asociado. Sin embargo, la severidad del problema varía desde los muy peligrosos, por ejemplo, situaciones en las que se presentan reventones en donde se pierde el control de un pozo debido al extremo desequilibrio de presiones durante la perforación o la cementación; hasta los más marginales o despreciables tal como la detección de flujo de gas en la superficie del pozo con presiones muy bajas, se han reportado problemas de flujo de gas hacia la superficie en lapsos de tiempo tan pequeños como 30 minutos luego de haber terminado los trabajos de cementación primaria ^[17]. Además de estos problemas, también puede ocurrir el fenómeno de la comunicación interzonal dentro del hoyo, el cual es mucho más difícil de detectar, en estos casos la producción posterior puede verse afectada, además puede ocurrir un relleno de una zona superior agotada (posiblemente seguida por la migración de gas hacia la superficie o a otro pozo), o la eficiencia de los tratamientos de estimulación se pueden ver reducidos. ^[9]

4.3.1.- Mecanismo de migración del gas.

Luego de que el cemento es bombeado y alcanza la condición estática en el espacio anular, diferentes procesos empiezan a ocurrir en la lechada. Las propiedades resultantes de la lechada son función de la composición de la misma y de las diferentes condiciones del pozo que se presentan en cada intervalo cementado. Estos procesos incluyen la deshidratación de la fase líquida, gelificación de la lechada y por último la solidificación de la misma, otorgando la propiedad de adherencia entre la formación y el revestidor. A una determinada profundidad, uno o más procesos de los mencionados anteriormente pueden dominar sobre los otros y de esta manera controlar los cambios en el comportamiento de la lechada. ^[18]

Inicialmente, toda la columna de lechada de cemento se comporta como un fluido puro y es capaz de transmitir completamente la carga hidrostática causada por su propio cabezal más el cabezal generado por los fluidos que se encuentran encima de la misma. Como los procesos de deshidratación, gelificación y fraguado de la lechada progresan a medida de que pasa el tiempo, a las diferentes profundidades y a lo largo de la columna de cemento, ocurren cambios en la lechada que causan que la misma se desvíe del comportamiento de un líquido puro. ^[18]

Entender el mecanismo del flujo de gas a través de una columna de cemento y la predicción de cómo fluye este gas requiere del conocimiento adicional del comportamiento de la lechada en el pozo, sin embargo, no se han reportado simulaciones del proceso que sean 100% exitosas o experimentos a escala de laboratorio que permitan obtener una predicción general y cuantitativa de la migración de gas. La dificultad para entender y modelar el fenómeno de la migración de gas radica en el hecho de que el material a través del cual el gas puede canalizar, como es el caso de una columna de lechada de cemento que llena el espacio anular del pozo, cambia sus propiedades físicas y mecánicas con el tiempo. El estado físico de la lechada cambia de ser líquido inmediatamente después del desplazamiento de la misma, a ser gel luego de encontrarse

un tiempo estático, en sólido débil y permeable cuando fragua y finalmente se convierte en un sólido fuerte e impermeable cuando se endurece. ^[18]

Las consecuencias potenciales del problema de la migración del gas son numerosas pero no siempre son inmediatamente detectables. Frecuentemente la cementación remedial es empleada para lograr cerrar el flujo de gas y que la presión sea reducida hasta un nivel equivalente al requerido por la política de seguridad del operador y las regulaciones locales. Sin embargo la eficiencia de la cementación forzada en estas circunstancias es muy pobre debido a tres causas: ^[9]

1. Los canales de gas pueden ser muy difíciles de hallar, especialmente si los mismos son submilimétricos.
2. Los canales pueden ser muy pequeños y por ende no permitir que la lechada de cemento pasa a través de ellos.
3. La presión ejercida durante la cementación forzada algunas veces es suficiente como para romper los sellos de cemento en el pozo o incluso para iniciar la fractura de la formación, empeorando los problemas de comunicación en el pozo. Por lo tanto, prevenir el problema de migración del gas es preferible que repararlo.

4.3.2.- Posibles rutas de migración del gas.

Se entiende generalmente que la migración de gas o cualquier otro fluido que se encuentre en la formación y que entre al espacio anular del pozo, puede ocurrir a través de canales formados entre las interfases cemento-formación, cemento- tubería, cemento-lodo e inclusive en la matriz misma del cemento. Una vez que el gas ha entrado en el anular, el mismo puede desplazarse, a través de cualquiera de los canales mencionados anteriormente hacia la superficie o hacia zonas de la formación que tienen menor presión (Ver Figura N° 6). ^[19]

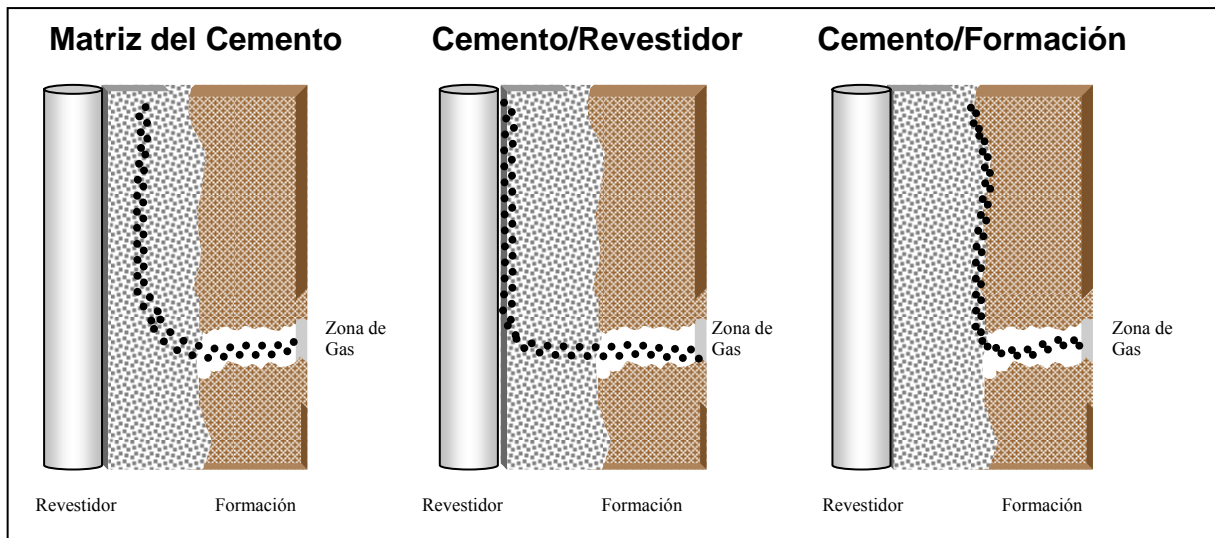


Figura N° 6: Rutas de migración del gas.

Los canales que se forman en las diferentes interfases, son producto de las variaciones tanto de la presión como de la temperatura del pozo a medida que avanzan las operaciones de cementación, por otro lado los que se forman a través de la columna de cemento, en su mayoría lo hacen durante el tiempo en que la lechada pasa de estado líquido a sólido.

4.3.3.- Factores que controlan la entrada del gas presente en la formación al anular cementado.

El principal factor que previene la entrada de gas al espacio anular durante las operaciones de cementación es la presión hidrostática que provee la columna de lechada y el fluido de perforación que se encuentra encima de la misma. Esta presión debe ser mayor que la presión de poro de la formación que contiene al gas para prevenir la invasión del mismo a la columna de cemento, además de esto, es necesario que dicha presión no exceda la presión de fractura de la formación, de manera que se eviten o minimicen las pérdidas de fluidos. ^[15]

La habilidad de la lechada de cemento para transmitir esta presión hidrostática es otra característica que afecta a la presión hidrostática total de la columna de fluido que

se encuentra en el espacio anular. Esta capacidad es función de la fuerza de gel de la lechada de cemento. Mientras más baja es la fuerza de gel, mayor es la capacidad que tiene la columna de lechada para transmitir la presión hidrostática en el espacio anular y viceversa. Cuando la presión ejercida por la columna es la misma que la presión de poro y la fuerza de gel no es lo suficientemente alta, la migración de fluidos puede ocurrir. ^[19]

La pérdida de presión hidrostática en la columna de lechada de cemento que se encuentra en el espacio anular debe ocurrir antes de que el gas pueda invadirla. La transmisibilidad de la presión hidrostática de la columna de cemento disminuye como una función de su gelificación y fraguado. Las propiedades físicas que afectan la pérdida de presión hidrostática de la lechada son: el desarrollo de la fuerza de gel estática, la reducción del volumen por hidratación, la pérdida de fluido hacia las formaciones permeables. ^[20]

4.3.3.1.- Reducción de volumen.

Cuando la lechada comienza la reacción de hidratación, sus propiedades cambian y su comportamiento pasa de ser el de un fluido verdadero, el cual transmite completamente la presión hidrostática, hasta convertirse en una masa viscosa que va perdiendo poco a poco su capacidad de transmitir dicha presión hidrostática. Durante este periodo de transición, son dos los fenómenos que contribuyen principalmente con la reducción del volumen de agua dentro de la matriz del cemento, resultando esto en una disminución de la presión de poro del cemento y de este modo permitiendo la invasión de gas dentro de la matriz del cemento.

El primero de estos fenómenos es la reacción de hidratación del cemento, la cual ciertamente consume parte del agua que se pierde, disminuyendo su volumen y el segundo es la cantidad de agua que ingresa hacia la formación en la forma de pérdida de fluido, lo cual de igual manera será causal de la reducción del volumen de agua en el sistema cementante. A pesar de que es imposible influir en el primer fenómeno, es posible controlar la capacidad de pérdida de fluido de la lechada de cemento. ^[19]

De este modo, las lechadas con pérdidas mínimas de fluido son mejores para el control de la migración de gas durante esta etapa de transición. Es importante señalar, que la pérdida de fluido debilita la estructura del cemento e incrementa su permeabilidad. La habilidad de las burbujas de gas para migrar a través del cemento no fraguado es una función de la fuerza de gel estática (SGS) de la lechada. ^[19]

Una vez que la hidratación ha terminado, el cemento se convierte en un sólido impermeable y como ya se mencionó anteriormente, en esta etapa la migración sólo es posible a través de canalizaciones interfaciales. Formadas entre el cemento y la formación, o entre el cemento y el revestidor.

Lo explicado anteriormente permite concluir que la habilidad de la lechada de cemento para prevenir la migración de fluidos a través del espacio anular depende de la tasa de pérdida de volumen de la lechada de cemento y del tiempo que tarde la misma para desarrollar una estructura de gel que sea capaz de evitar la invasión del gas presente en la formación.

4.3.3.2.- Desarrollo de la fuerza de gel estática.

La fuerza de gel estática (Static Gel Strength, SGS) es la fuerza de resistencia aplicada por la lechada de cemento al perímetro mojado de la superficie del hoyo y del revestidor. La SGS es el resultado de una pequeña cantidad de productos que se han formado en las etapas tempranas de la reacción de hidratación. ^[20]

Cuando la lechada de cemento se encuentra en estado estático luego del desplazamiento de la misma, las fuerzas iónicas empiezan a interactuar y las mismas crean una estructura ternaria débil que al pasar el tiempo se irá endureciendo. Esta estructura se desarrolla en la matriz del cemento mientras la misma cambia de estado líquido a sólido y se comporta como un semisólido, este proceso ocurre antes que alguna resistencia a la compresión se desarrolle (Ver Figura N° 7). ^[21]

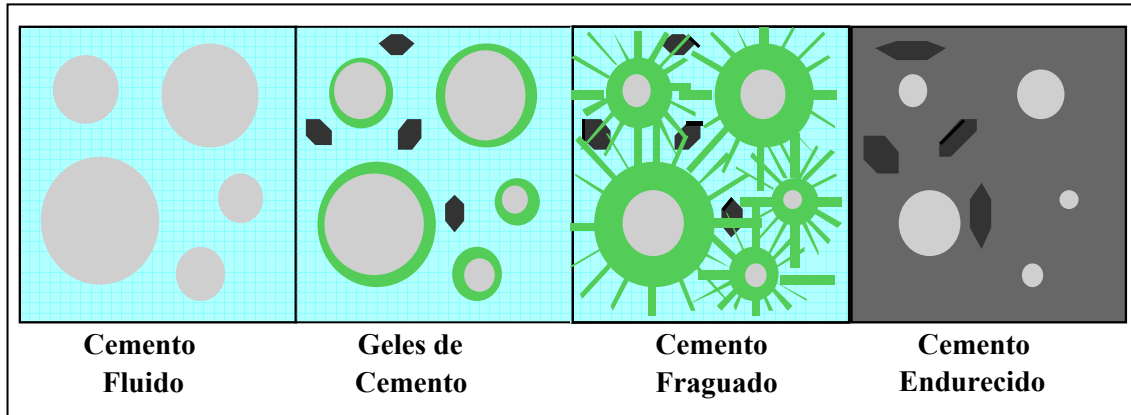


Figura N° 7: Proceso de gelificación del cemento.

En algunos aspectos, durante la gelificación, el cemento puede ser considerado como un material similar a los polímeros. Esto es cierto desde el momento en que la matriz exhibe un comportamiento reológico No-Newtoniano y exhibe un punto cedente, conocido también como fuerza de gel estática. Comúnmente expresado en unidades de esfuerzo cortante ($\text{lbf}/100 \text{ pie}^2$), la fuerza de gel estática puede ser considerada como el esfuerzo cortante que existe en los límites de la pared al iniciarse el movimiento de la columna de cemento en el espacio anular debido a la presencia de un cabezal de presión. ^[15]

El proceso de gelificación es el responsable de que la columna de cemento se adhiera mejor a la superficie de la formación, pero esto trae como consecuencia que la columna de lechada de cemento pierda su capacidad para transmitir la presión hidrostática. Este proceso se desarrolla hasta el punto en que el cemento pasa completamente al estado sólido, pero en algún momento de dicho proceso la lechada de cemento tendrá suficientes características sólidas como para que el gas no pueda invadir la matriz de la columna de cemento. ^[20]

Se desconoce a que valor de fuerza de gel estática la lechada de cemento adquirirá un nivel de solidificación tal que se cumpla lo anteriormente expuesto, sin embargo, en muchos trabajos de investigación es aceptado que a un desarrollo de fuerza de gel estática mayor a $100 \text{ lbf}/100 \text{ pie}^2$, puede ocurrir la invasión del gas o cualquier otro fluido a la matriz del cemento. Este es el punto considerado como el inicio de un

parámetro llamado tiempo de transición, que se define como el periodo de tiempo durante el cual la lechada cambia de ser un fluido hidráulico hasta convertirse en una masa altamente viscosa que muestra algunas características sólidas bajo condiciones estáticas. [22]

Del mismo modo es ampliamente aceptado que el tiempo de transición termina cuando la SGS se incrementa hasta 500 lbf/100 pie². En este punto, la lechada ha desarrollado suficiente fuerza de gel para prevenir la migración de fluido o gas dentro de la columna de cemento [22]. En la Figura N° 8 se muestra el efecto del desarrollo de los geles del cemento sobre la caída de la presión hidrostática en la columna de cemento hasta el punto de potencial invasión del gas.

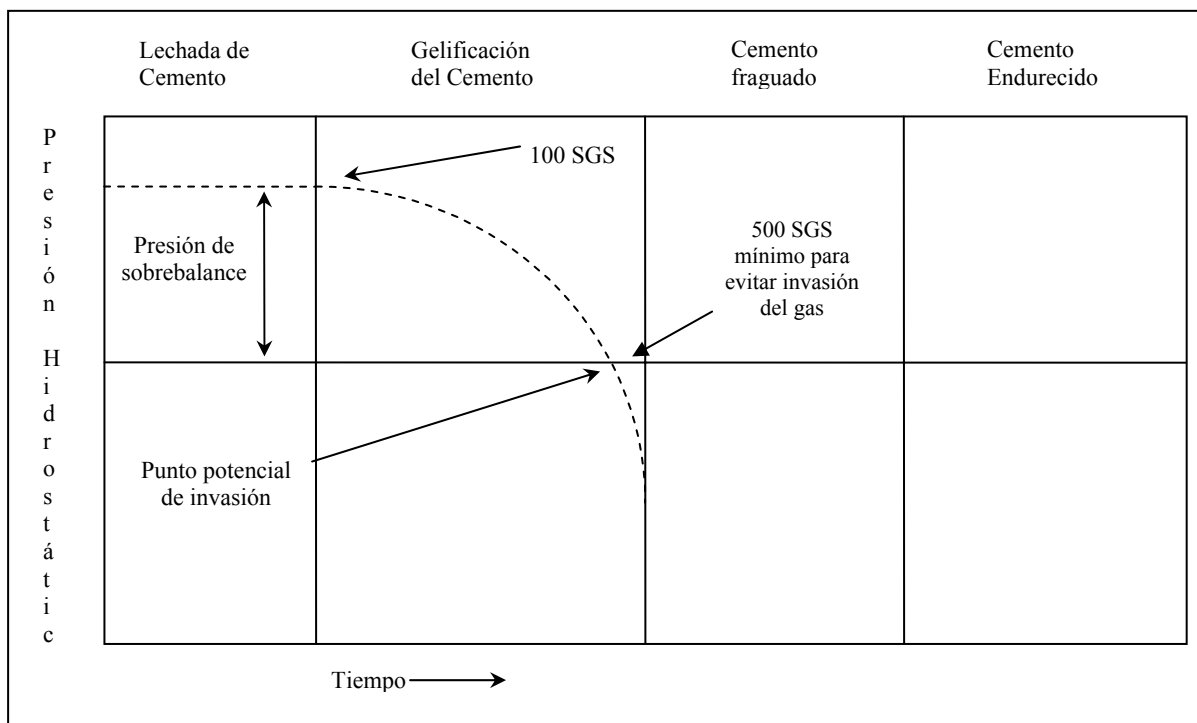


Figura N° 8: Efecto del desarrollo de la fuerza de gel sobre la presión hidrostática de la columna de cemento.

Este es uno de los puntos de mayor interés en el estudio de la migración de gas, ya que teóricamente se puede presentar el problema de la migración si el cemento no posee una SGS de 500 lbf/100 pie² al momento en que debido a la reducción de presión

hidrostática de la columna de cemento, la misma se iguale o sea menor que la presión de la formación de gas. ^[2]

Actualmente no existe ningún método estandarizado y/o reconocido industrialmente para la determinación de la fuerza de gel estática en sistemas de cementos petroleros. Sin embargo, la ISO (Organización Internacional de Estandarización), está evaluando tres tipos diferentes de equipos para pruebas de laboratorio a fin de desarrollar un método estándar para la determinación de dicha propiedad. ^[15]

Uno de estos equipos de prueba es un aparato de ultrasonido (SGSA), el cual usa la interpretación de transmisiones ultrasónicas que pasan a través de la matriz de la lechada para determinar el desarrollo de la SGS, la limitación que posee este equipo es esencialmente su incapacidad de medir SGS en lechadas de baja densidad. Un segundo aparato que se está estudiando es un equipo tipo Vane, el cual es esencialmente un Reómetro tipo Vane que opera con un sistema de corte intermitente, dicho equipo, a diferencia de los otros aparatos disponibles para la medición de la SGS, está limitado a una presión máxima de aproximadamente 800 psi. El tercer tipo de aparato trabaja de manera similar a un consistómetro HTHP, llamado MINIMACS (ver Figura N° 9). Antes del uso de este equipo la lechada es llevada a condiciones de presión y temperatura del hoyo a través del tiempo, mientras es continuamente cortada a una tasa consistente con la del desplazamiento del pozo. Luego de ser acondicionada la lechada bajo condiciones de pozo durante un tiempo aproximadamente igual al requerido para el desplazamiento de la misma, se lleva al equipo de medición, en donde la SGS de la lechada es continuamente monitoreada a través del tiempo mediante una paleta especial, la cual se encuentra en un recipiente presurizado. Esta paleta rota a una velocidad constante de 0.26 °/min, y la resistencia a la rotación es cuantificada mediante un medidor de torque ^[22]. Este equipo presenta como desventaja que es extremadamente sensible a las perturbaciones externas durante las mediciones, lo cual hace bastante difícil su operabilidad. ^[15]



Figura N° 9: MINIMACS, equipo para la evaluación de Fuerza de Gel Estática.

4.3.4.- Control del fenómeno de la migración del gas.

El control de la migración de gas u otros fluidos en el espacio anular luego de la cementación, ha sido objeto de gran cantidad de estudios y artículos. Estos incluyen enfoques prácticos, enfoques teóricos, y modelaje matemático y/o físico, cada uno concentrándose en una o dos causas específicas de la migración de gas. Lo único que todos estos estudios tienen en común es que todos presentan conclusiones válidas, y aunque representan un beneficio, en algún momento todas han fallado en su aplicación en el campo. Estas fallas han demostrado que aunque se ha aprendido mucho sobre prevención y control de la migración, aún queda mucho por aprender. ^[22]

La premisa principal para controlar la migración de fluidos en pozos de petróleo y/o gas es prevenir la entrada de gas al espacio anular, lo cual requiere que se mantenga el control de la presión en la formación de gas y eliminar las potenciales rutas de migración a través del cemento en su periodo de transición de líquido a sólido. Este objetivo se puede lograr a través de tres mecanismos básicos:

-
-
- ✓ **Alteración de las propiedades de la lechada de cemento.** Lo cual se puede lograr mediante aditivos que son capaces de variar algunas propiedades de la lechada tales como: desarrollo de la fuerza de gel estática, pérdida de fluido y/o reducción de volumen.
 - ✓ **Bloqueo mecánico de las rutas de migración.** Este método consiste en colocar un sello externo al revestidor para retener al gas en las zonas más profundas del pozo. Dicho sello externo es instalado en el revestidor colgante por encima de la zona de gas y luego es colocado el cemento. Cuando la lechada es colocada y aun no se ha fraguado, el sello expande y provee un aislamiento mecánico mientras el cemento cambia de fase.
 - ✓ **Incremento de la presión ejercida sobre la formación de gas.** Consiste en incrementar la densidad del fluido con la finalidad de aumentar la diferencia de presión y lograr de este modo que la formación sea taponada, un efecto equivalente se obtiene al aumentar la presión de bombeo en la superficie. Todo lo anterior debe tomar en cuenta los máximos valores permitidos para la presión de bombeo y para la densidad de la lechada a fin de evitar posibles fracturas en la formación.

4.4.- Espectroscopía de impedancia electroquímica.

La espectroscopía de impedancia electroquímica es un poderoso y relativamente nuevo método que es usado para la caracterización de muchas de las propiedades de diferentes materiales y sus interfases con electrodos conductores. Entre sus múltiples usos se encuentran la investigación de la dinámica de las cargas fijas y móviles en la matriz o en las regiones interfaciales de cualquier tipo de material, ya sea sólido o líquido, del tipo iónico, conductor, semiconductor e inclusive materiales dieléctricos (aislantes).^[23]

Actualmente, es una técnica de investigación que está ganando mucho terreno en el monitoreo del desarrollo de la microestructura del cemento, ya que es una poderosa herramienta que permite la separación de los procesos de conducción en materiales no homogéneos o multifásicos.

4.4.1.- Conceptos básicos.

4.4.1.1.- Definición de Impedancia.

Se define como resistencia eléctrica a la habilidad que tiene un elemento de circuito para impedir el flujo de corriente a través de su seno. Como es bien conocido, la Ley de Ohm define la resistencia eléctrica como la relación que existe entre el voltaje ($v(t)$) y la intensidad de corriente ($i(t)$) que circulan a través de un elemento de circuito, lo cual se puede expresar de la siguiente manera: ^[24]

$$R(t) = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (1)$$

Donde:

$R(t)$: Resistencia, Ohmios (Ω)

$v(t)$: Diferencia de Potencial, Voltios (V).

$i(t)$: Intensidad de corriente, Amperios (A)

Sin embargo el uso de la expresión anterior se encuentra limitado a los resistores ideales, los cuales deben cumplir con las siguientes restricciones:

- ✓ Cumplir con la Ley de Ohm para todos los niveles de voltaje y de intensidad de corriente.
- ✓ El valor de la resistencia debe ser independiente de la frecuencia.
- ✓ El voltaje y la corriente alterna siempre deben estar en la misma fase.

Como es de suponer, en la vida real existen elementos de circuito que presentan un comportamiento mucho más complejo que el de los resistores ideales, y en este caso se hace necesario emplear un término denominado impedancia, el cual es un parámetro mucho más general que puede ser aplicado a los elementos de circuitos reales. ^[24]

La impedancia, al igual que la resistencia, es una medida que cuantifica la capacidad de un aparato, material, dispositivo o elemento de circuito, para oponerse al flujo de corriente a través de él, pero al contrario que la resistencia, este parámetro no se encuentra limitado por las restricciones de los resistores ideales.

La impedancia es un concepto mucho más general que la resistencia porque toma en cuenta las diferencias de fase que existe entre la señal de estímulo y la señal de respuesta y por tanto se ha convertido en un concepto fundamental y esencial en la Ingeniería Eléctrica. En tal sentido, la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE), es sólo una rama específica del árbol de las mediciones eléctricas. ^[23]

La Espectroscopía de Impedancia Electroquímica es una técnica mediante la cual se hace circular corriente alterna a través de la muestra que se está estudiando a una frecuencia determinada y se mide la magnitud y la fase de la corriente resultante. Este procedimiento es repetido para diferentes frecuencias dentro de un rango definido, y el espectro obtenido viene dado por el comportamiento de la impedancia (u otras cantidades derivadas) como función de la frecuencia. ^[25]

La corriente alterna tiene la característica de que las cargas fluyen primero en una dirección y luego en otra, repitiendo el ciclo con una frecuencia definida, lo cual puede ser representado perfectamente como una onda sinusoidal, ya que el potencial eléctrico oscila entre valores negativos y positivos ^[26]. Si se aplica una diferencia de potencial del tipo sinusoidal (p.e. corriente alterna) de baja amplitud como señal de estímulo a una muestra que se desea estudiar, dicha señal tendrá la siguiente forma en el dominio del tiempo:

$$v(t) = V_m \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

Donde:

V_m : Amplitud, Voltios (V).

ω : Frecuencia radial, (rad/s).

Se conoce que la frecuencia radial se relaciona con la frecuencia (f) mediante la siguiente relación:

$$\omega = 2\pi f \quad (3)$$

Como la señal aplicada es de baja amplitud, esto permite que el sistema se comporte de manera lineal (o pseudo-lineal). Si el sistema se comporta de esta manera, la respuesta será una señal (intensidad de corriente) sinusoidal desfasada (ver Figura N° 10) con la siguiente forma: ^[24]

$$i(t) = I_m \cdot \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (4)$$

Donde:

I_m : Amplitud de la señal de respuesta, Amperios (A).

θ : Ángulo de fase, (rad)

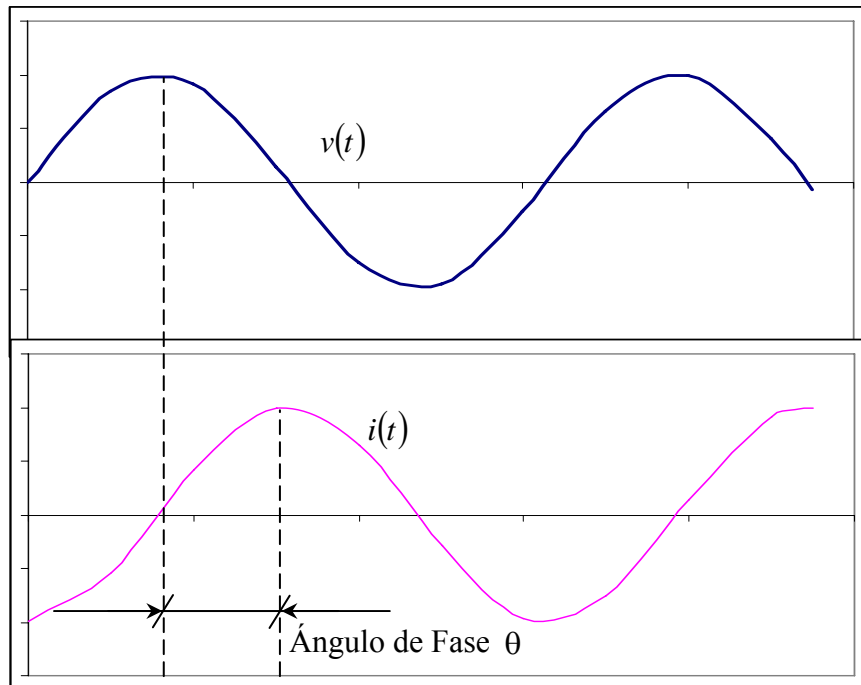


Figura N° 10: Respuesta de un sistema lineal a una señal de excitación sinusoidal.

Es importante destacar que el ángulo de fase tiene valor cero cuando el sistema en estudio se comporta como un resistor puro (ideal). A partir de una expresión análoga a la Ley de Ohm mostrada en (1), se puede definir la impedancia $Z(t)$ como:

$$Z(t) = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (5)$$

Sustituyendo las expresiones (2) y (4) en la ecuación (5) se tiene:

$$Z(t) = \frac{Vm \cdot \text{sen}(\omega t)}{Im \cdot \text{sen}(\omega t + \theta)} \quad (6)$$

A partir de la identidad de Euler, la cual se puede escribir de la siguiente manera:

$$\exp(\pm jz) = \cos(z) \pm j\text{sen}(z) \quad (7)$$

Es posible expresar la impedancia como una función compleja. Operando la ecuación (7) se pueden generar las siguientes relaciones: ^[24]

$$\cos(z) = \frac{\exp(jz) + \exp(-jz)}{2} \quad (8)$$

$$\text{sen}(z) = \frac{\exp(jz) - \exp(-jz)}{2j} \quad (9)$$

Empleando las identidades (8) y (9), es posible demostrar que las expresiones (2) y (4), se pueden transformar en:

$$v(t) = Vm \cdot \exp(j\omega t) \quad (10)$$

$$i(t) = Im \cdot \exp(j\omega t - j\theta) \quad (11)$$

Finalmente, se puede sustituir las expresiones (10) y (11) en la ecuación (5) y de este modo se puede generar una representación de la impedancia como número complejo en su forma polar:

$$Z(\omega) = \frac{Vm}{Im} \cdot \exp(j\theta) \quad (12)$$

$$Z(\omega) = Z_0 \cdot \exp(j\theta) \quad (13)$$

De la misma manera, empleando la identidad de Euler, es posible convertir la expresión (13) a su forma rectangular, de acuerdo a lo siguiente:

$$Z(\omega) = Z_0 \cdot (\cos(\theta) + j \cdot \sen(\theta)) \quad (14)$$

Nótese que las expresiones (13) y (14) no dependen del tiempo, sino que contienen información sólo de la amplitud y el ángulo de fase. El proceso mediante el cual es posible suprimir la dependencia temporal de las señales, tanto de entrada como de salida, se conoce como transformación fasorial, y el uso de esta técnica es de especial utilidad en la simplificación de los cálculos correspondientes a los análisis de circuitos de corriente alterna, ya que se evita la resolución de ecuaciones integro-diferenciales derivadas del tratamiento teórico del sistema usando simples ecuaciones algebraicas conformadas por fasores que permiten obtener soluciones equivalentes, con menor esfuerzo de cálculo.

Comúnmente se puede denotar la estructura compleja de la impedancia mostrada en la ecuación (14) de la siguiente manera:

$$Z(\omega) = Z'(\omega) - j \cdot Z''(\omega) \quad (15)$$

Donde:

$Z'(\omega)$: Componente real de la impedancia, Ohmios (Ω).

$Z''(\omega)$: Componente imaginaria de la impedancia, Ohmios (Ω).

Posteriormente, a partir de la ecuación (15) se pueden derivar las siguientes expresiones:

$$Z'(\omega) = |Z_0| \cdot \cos(\theta) \quad (16)$$

$$Z''(\omega) = |Z_0| \cdot \sen(\theta) \quad (17)$$

$$\theta = \arctang\left(\frac{Z''(\omega)}{Z'(\omega)}\right) \quad (18)$$

Donde:

$|Z\omega|$: Módulo de la Impedancia, Ohmios (Ω)

Como se puede deducir de lo anteriormente explicado, la impedancia es una función de la frecuencia, en tal sentido, la espectroscopía de impedancia convencional consiste en la cuantificación de la impedancia en función de la frecuencia a lo largo de un amplio rango. Posteriormente, a partir de la estructura resultante del espectro de impedancia es que se pueden derivar los diferentes parámetros del sistema electrodo – material que se encuentran bajo estudio. ^[23]

4.4.1.2.- Funciones relacionadas con la Impedancia.

Tal y como puede observarse en la ecuación (15), la impedancia es un número complejo que puede adoptar la siguiente forma en coordenadas rectangulares:

$$Z(\omega) = R + j \cdot X \quad (19)$$

En la expresión anterior se puede observar que la impedancia está conformado por un componente resistivo (R) y un componente reactivo (X). El componente resistivo corresponde propiamente a la contribución del efecto de resistencia del material al paso de corriente a través del mismo.

Por otro lado, el componente reactivo de la impedancia es causada por la presencia de efectos inductivos y capacitivos dentro de la muestra que se está estudiando. La reactancia se define como la oposición al flujo de corriente alterna causada en un circuito por la presencia de inductancias y capacitancias más que por resistencias. ^[26]

Dependiendo del signo del componente reactivo (X), se puede definir el tipo de reactancia que se presenta en el circuito o la muestra estudiada, de esta manera se puede expresar lo siguiente respecto a este componente: ^[26]

- $X < 0$: La reactancia se debe a efectos capacitivos.
- $X = 0$: La impedancia es puramente resistiva.
- $X > 0$: La reactancia se debe a efectos inductivos.

Existen otras magnitudes, ya sean medidas o derivadas, que pueden ser relacionadas con la impedancia, las cuales juegan un papel importante en la EIE, ya que su uso puede en algunos casos facilitar tanto análisis como el tratamiento matemático de los datos experimentales. Estas cantidades se denominan de forma general como Inmitancias. ^[23]

La primera de las inmitancias a tratar corresponde al recíproco de la impedancia, la cual es conocida como Admitancia y se puede expresar de la siguiente manera en términos resistivos y capacitivos:

$$Y(\omega) = Z(\omega)^{-1} = G(\omega) + j \cdot B(\omega) \quad (20)$$

Donde:

$G(\omega)$: Conductancia, Siemens (S).

$B(\omega)$: Susceptancia, Siemens (S).

Al igual que la admitancia, existen otras dos cantidades derivadas que son usualmente definidas como la función módulo y la constante dieléctrica compleja o permitividad dieléctrica, las cuales se expresan de la siguiente manera: ^[23]

$$M(\omega) = j\omega Cc \cdot Z(\omega) = M'(\omega) + j \cdot M''(\omega) \quad (21)$$

$$\varepsilon(\omega) = M(\omega)^{-1} = \varepsilon'(\omega) + j \cdot \varepsilon''(\omega) \quad (22)$$

Donde:

$M(\omega)$: Función Módulo.

$\varepsilon(\omega)$: Permitividad dieléctrica, (F/m).

C_c : Capacitancia de la celda de medición vacía, (F).

El valor de la capacitancia de la celda de medición vacía, se puede calcular como:

$$C_c = \frac{\varepsilon_o \cdot A_c}{l} \quad (23)$$

Donde:

ε_o : Permitividad dieléctrica del vacío, (8.854×10^{-12} F/m).

A_c : Área de los electrodos, (m^2).

l : Espacio entre los electrodos, (m).

4.4.1.3.- Impedancia de diferentes elementos de circuito.

Como ya se mencionó anteriormente, los datos de espectroscopía de impedancia muestran el comportamiento de la impedancia como función de la frecuencia y generalmente se analizan mediante su comparación con la respuesta obtenida a partir del modelado del sistema como un circuito eléctrico equivalente. Muchos de los componentes del modelo, son elementos eléctricos comunes como resistores, capacitores e inductores y tanto la elección como la configuración de los mismos se basa en la electroquímica física del sistema. ^[24]

Los elementos de circuito que generalmente se usan para el modelaje de sistemas electroquímicos en espectroscopía de impedancia, se pueden dividir en dos grupos: ^[27]

- ✓ Elementos simples: tales como resistencias (R), capacitancias (C) e inductancias (L). Son elementos eléctricos y pueden describir sistemas homogéneos.

-
-
- ✓ Elementos dependientes de la frecuencia: son elementos que describen comportamientos no homogéneos de la dependencia del sistema con la frecuencia. Estos elementos fueron desarrollados para describir algunos procesos, por lo tanto son elementos electroquímicos.

A partir del análisis fasorial de los diferentes elementos de circuito, es posible determinar su impedancia en el dominio de la frecuencia. En tal sentido se presentan las expresiones de impedancia para los elementos simples de acuerdo a lo siguiente: ^[27]

- ✓ **Resistencias:** el valor de la impedancia para estos elementos viene dado por la siguientes expresión:

$$Z_R(\omega) = R \quad (23)$$

En la ecuación (23) se puede observar que la parte imaginaria de la impedancia es igual a cero ($Z''(\omega) = 0$) y que la parte real es directamente el valor de la resistencia ($Z'(\omega) = R$).

- ✓ **Capacitancias:** la impedancia de estos elementos de circuito se puede describir como:

$$Z_C(\omega) = (j\omega C)^{-1} \quad (24)$$

En la cual se muestra que la capacitancia sólo tiene una parte imaginaria ($Z'(\omega) = 0$).

- ✓ **Inductancias:** para estos elementos de circuito se tiene que la expresión de impedancia toma la forma:

$$Z_L(\omega) = j\omega L \quad (25)$$

Donde al igual que para las capacitancias, la impedancia de los inductores sólo tienen parte imaginaria ($Z'(\omega) = 0$).

En la tabla N° 2 se presenta un resumen de las relaciones voltaje - intensidad de corriente tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia para los elementos de circuito tratados anteriormente. Nótese que las expresiones fasoriales (en el dominio de la frecuencia) son algebraicas y además lineales, a diferencia de sus análogas en el dominio del tiempo (inductores y capacitores).

Tabla N° 2: Relaciones Voltaje - Intensidad de corriente para diferentes elementos de circuito.

Elemento	Dominio del tiempo	Dominio de la frecuencia
Resistores	$v = R \cdot i$	$V = R \cdot I$
Inductores	$v = L \cdot \frac{di}{dt}$	$V = j\omega L \cdot I$
Capacitores	$v = \frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt$	$V = \frac{1}{j\omega C} \cdot I$

4.4.1.4.- Representación de los datos de Impedancia.

Una vez que se han obtenido los datos experimentales, se deben analizar los mismos para poder extraer de ellos los parámetros que son de interés para el estudio. Este proceso, generalmente requiere de la elaboración de gráficos en los que se muestra el comportamiento de la impedancia para el sistema estudiado. En tal sentido, existen dos formas de llevar a cabo este proceso dependiendo si se conoce o no previamente el modelo que representa el sistema. ^[28]

Si no se conoce el modelo, es necesario presentar los datos sin ningún postulado preinterpretativo, en este caso el uso de gráficos como el de Nyquist y el de Bode es necesario, ya que los mismos representan los datos crudos. Por otro lado, si el modelo es (o se cree) conocido, existen diferentes tipos de gráficas que se encuentran en la bibliografía y que sirven de apoyo para el análisis de dichos datos.

El diagrama de Nyquist o plano complejo (ver Figura N° 11), ha sido usado durante mucho tiempo, y en el se representa el negativo de la parte imaginaria de la impedancia (o admitancia) con respecto a parte real de la impedancia (o admitancia). La elección de esta convención de signos tan peculiar tiene su origen en que los primeros experimentos de impedancia se hacia a altas frecuencias y las interfases solamente exhibían un comportamiento capacitivo, por lo que esta convención de signos se adoptó para que el diagrama quedara convenientemente dibujado en el primer cuadrante. [28]

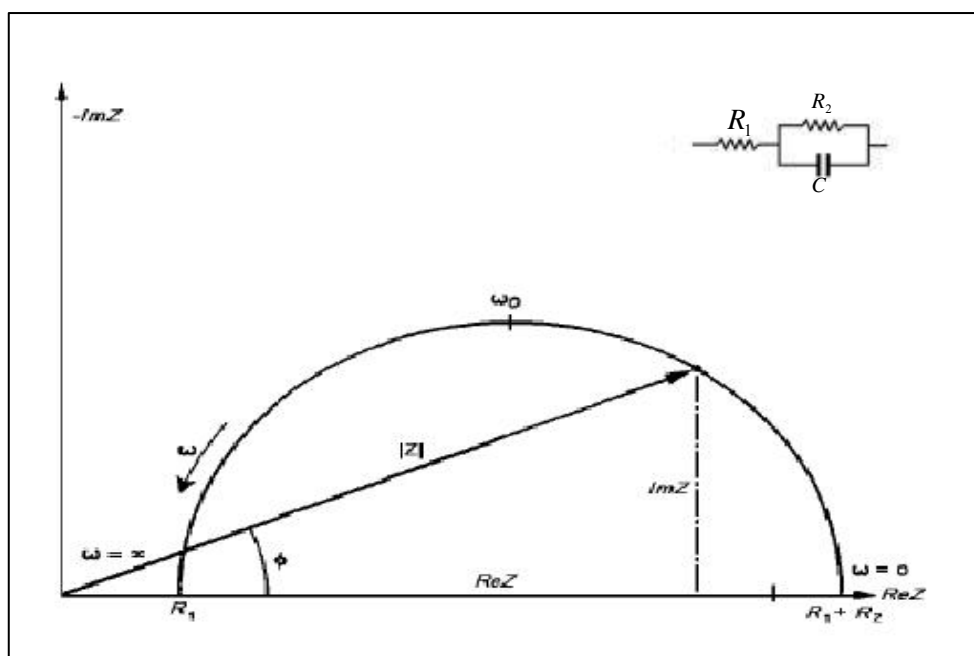


Figura N° 11: Diagrama de Nyquist.

Por otro lado, el uso del diagrama de Bode (ver Figura N° 12) es mas reciente en la electroquímica. En este tipo de gráfico, se representa el módulo de la impedancia y el ángulo de fase como función del logaritmo de la frecuencia. Al contrario que en el diagrama de Nyquist, en el que se puede representar toda la información en un solo gráfico, el de Bode debe ser dividido en dos secciones, una para el comportamiento del módulo de la impedancia y la otra para representar la variación del ángulo de fase. [29]

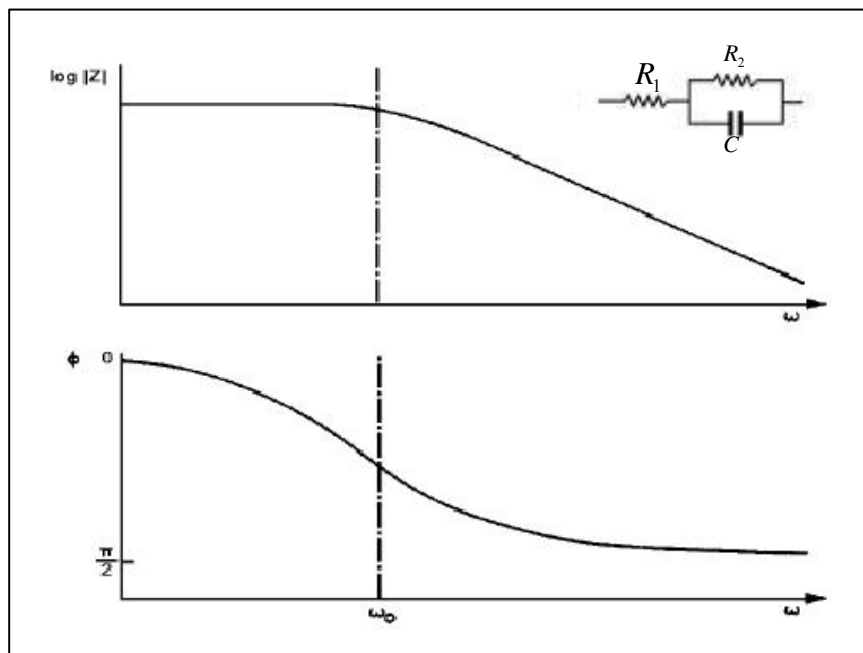


Figura N° 12: Diagrama de Bode.

Para los trabajos de investigación en el área electroquímica, algunos investigadores se inclinan por el uso del diagrama complejo, sin embargo la elección entre los dos tipos de gráficos depende de diversos factores. De hecho, los diagramas de Nyquist de algunos procesos tienen comportamientos característicos, que permiten de una manera sencilla identificarlos (ver Figura N° 13). Dichas características son sin duda alguna mucho más fáciles de identificar en el diagrama complejo que en la representación de Bode. ^[28]

Los gráficos de Bode son empleados a menudo cuando se presentan condiciones especiales con los datos que hacen restrictivo el uso de los diagramas complejos, por ejemplo cuando se tienen amplias variaciones en el módulo de la impedancia (10^{-10} a $10^6 \Omega$) con la frecuencia, no es sencillo graficar todos los datos experimentales en un diagrama complejo y por lo tanto el uso del diagrama de Bode se hace factible.

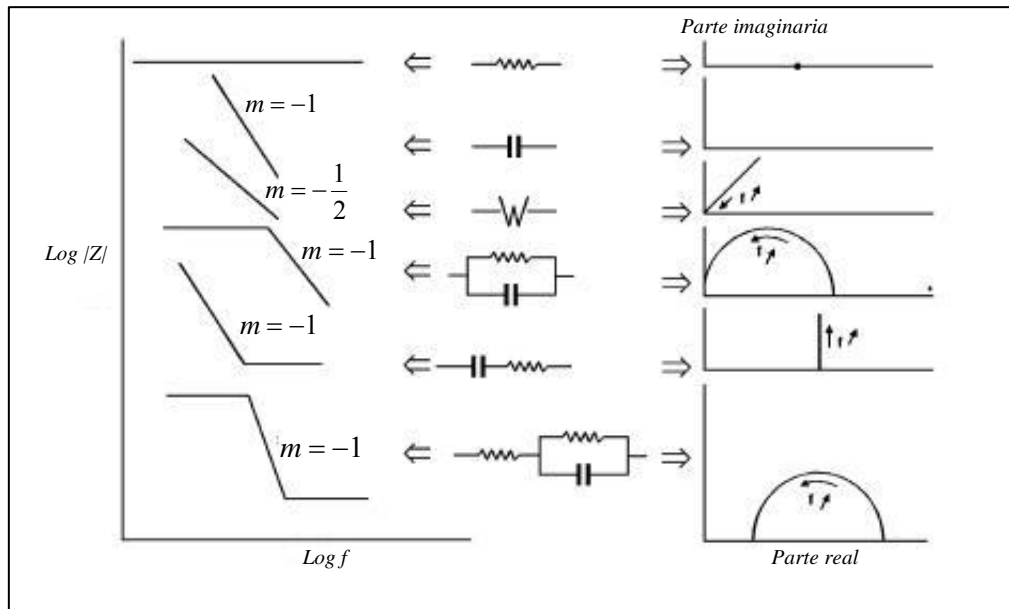


Figura N° 13: Diagramas de Nyquist y Bode para diferentes circuitos.

4.4.2.- Experimentos de espectroscopía de impedancia.

4.4.2.1.- Fundamentos.

Los experimentos basados en mediciones eléctricas para caracterizar un sistema electrodo – material electrolítico, desde el punto de vista electroquímico son llevadas a cabo usualmente en celdas de medición que pueden tener forma cilíndrica o de paralelepípedo, en las que a través de dos electrodos idénticos colocados en las caras de la muestra se aplica un estímulo eléctrico (voltaje o corriente conocidos) y se mide la respuesta de la muestra. ^[23]

La forma más común y estandarizada para medir la impedancia, consiste en cuantificar directamente esta magnitud en el dominio de la frecuencia mediante la aplicación a una muestra de un voltaje definido a una frecuencia determinada y midiendo el ángulo de desfase y la amplitud o los componentes real e imaginario de la corriente resultante a dicha frecuencia. En la actualidad esta operación se encuentra completamente automatizada gracias a la disponibilidad de muchos instrumentos comerciales que permiten efectuar la medición de forma rápida y precisa.

Es importante destacar que cualquier propiedad del material que influya de alguna manera sobre la conductividad de un sistema electrodo – material puede ser caracterizada mediante el uso de la espectroscopía de impedancia. En tal sentido, se puede decir que los parámetros obtenidos a partir de un espectro de impedancia, caen generalmente en dos categorías: las correspondientes sólo a la matriz del material electrolítico y las correspondientes a la interfase electrodo – material. [23]

Un esquema general del proceso de caracterización de un sistema usando la técnica de espectroscopía de impedancia se presenta en la Figura N° 14, de lo que se desprende que los datos obtenidos experimentalmente a partir de las pruebas pertinentes, pueden ser analizados por dos vías distintas, una de ellas es empleando un modelo matemático que prediga la impedancia teórica ($Z_T(\omega)$) y que esté basado en una teoría físicamente plausible; la otra manera corresponde a uso de un circuito equivalente relativamente empírico que permita obtener predicciones de impedancia ($Z_{EC}(\omega)$).

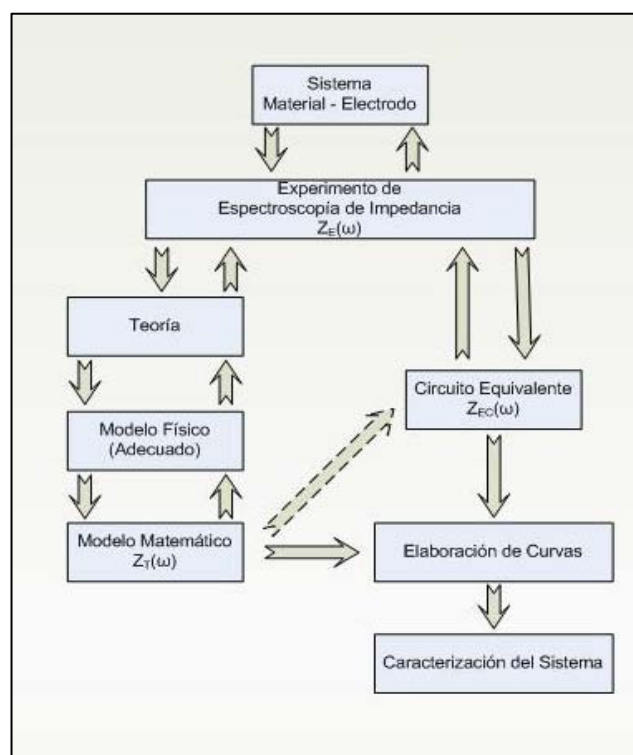


Figura N° 14: Proceso de caracterización de sistemas electrodo – material empleando espectroscopía de impedancia.

Indistintamente de las dos opciones de modelaje que se empleen, el paso final para la caracterización del sistema consiste en comparar los datos experimentales ($Z_E(\omega)$) con los predichos ya sea por el modelo de impedancia teórica ($Z_T(\omega)$) o por el circuito equivalente ($Z_{EC}(\omega)$) y estimar los parámetros que se busca cuantificar. [23]

4.4.2.2.- Suposiciones de trabajo.

Aunque los análisis de impedancia han sido desarrollados exitosamente para su aplicación en sistemas electroquímicos, esta técnica sólo es capaz de proporcionar resultados que deriven en información útil y confiable cuando la investigación de impedancia es llevada a cabo correctamente. En general, el foco principal de los problemas en este tipo de estudios se encuentra en la complejidad intrínseca de los sistemas electroquímicos, de ahí que para llevar a cabo de manera exitosa las pruebas de impedancia, es necesario cumplir con algunos requerimientos básicos.

En este sentido, se tiene que el análisis de impedancia de sistemas electroquímicos complejos, necesita una serie de simplificaciones que pueden ser generalizadas en dos grupos de suposiciones de trabajo que deben ser cumplidas, para asegurar los requerimientos mínimos necesarios a fin de llevar a cabo correctamente el estudio. Estos grupos de suposiciones son por una parte las correspondientes al análisis del sistema y por otro lado las concernientes al comportamiento del sistema electroquímico. [27]

Un sistema bien diseñado debe obedecer todas las suposiciones de trabajo. Las técnicas de medición aplicadas y la instrumentación empleada para tal fin son responsables de hacer que se cumplan las suposiciones correspondientes al análisis del sistema. Por otro lado, las simplificaciones inherentes al comportamiento del sistema electroquímico permiten la elaboración y resolución del modelo teórico de impedancia, en tal sentido, es obvia la importancia de que se cumplan con ciertas condiciones

experimentales mínimas, ya que las mismas determinan la precisión del modelo de impedancia electroquímica.

4.4.2.2.1.- Suposiciones correspondientes al análisis del sistema.

En este grupo de suposiciones se encuentran: ^[27]

- ✓ **Linealidad:** este es un requerimiento que se puede cumplir si la amplitud de la perturbación sinusoidal de entrada es lo suficientemente pequeña. Esto radica en el hecho de que los sistemas electroquímicos tienden a mostrar un comportamiento fuertemente no lineal cuando los voltajes o corrientes aplicados son muy grandes.

Pero mientras que la diferencia de potencial aplicada (amplitud de la señal de perturbación) sea menor que un parámetro denominado voltaje termal (aproximadamente 25 mV a 25 °C), se puede demostrar que las ecuaciones diferenciales básicas que gobiernan la respuesta del sistema se pueden aproximar a ecuaciones lineales. ^[23]

El voltaje termal puede ser calculado como:

$$V_T = \frac{R \cdot T}{F} \quad (25)$$

Donde:

V_T : Voltaje termal, (V).

R : Constante de los gases, (8.314 m³ Pa / mol K).

F : Constante de Faraday, (96520 Coul / equiv-g).

- ✓ **Estado estable:** lo cual implica que la medición de la impedancia debe ser independiente del momento en que se lleve a cabo la misma. Este requerimiento debe cumplirse para todo el rango de frecuencias.

-
-
- ✓ **Valores finitos:** lo que se traduce en que tanto la parte real como la parte imaginaria de la impedancia deben tener valores finitos sobre la totalidad del rango de frecuencias estudiado.
 - ✓ **Señal simple de entrada y salida:** lo cual se puede lograr manteniendo constante el resto de los parámetros que influyen sobre el experimento de impedancia tales como temperatura, presión, pH, etc.
 - ✓ **Ausencia de memorización de propiedades:** lo que significa que el sistema no debe recordar la historia de los experimentos realizados sobre él, y por lo tanto el resultado debe ser independiente de la secuencia de las mediciones.
 - ✓ **Observabilidad:** ya que, evidentemente, el fenómeno que se está investigando debe ser observable en el rango de frecuencias empleado para efectuar la medición.

4.4.2.2.- Suposiciones correspondientes al comportamiento del sistema electroquímico.

Dentro de las suposiciones concernientes al comportamiento del sistema se tienen:^[27]

- ✓ **Adición:** de la corriente farádica y la corriente de carga de la doble capa.
- ✓ **Electro neutralidad:** lo cual implica que prácticamente el total de la densidad de carga en todos los puntos de la muestra se asume como cero.
- ✓ **Ausencia:** de masa y flujos de carga laterales en la superficie de los electrodos.

4.4.3.- Modelaje de los datos de Impedancia.

La información de interés en un estudio de impedancia electroquímica para la caracterización de un sistema electrodo – material se encuentra concentrada en las funciones que modelan el comportamiento de la impedancia (o admitancia) que presenta el sistema analizado. Dichas funciones contienen toda la información que fue recolectada en los datos experimentales mediante la aplicación de una señal de

perturbación y cumpliendo con las diferentes suposiciones de trabajo necesarias para llevar a cabo el análisis.

Una herramienta que es esencial para solucionar el problema de mejorar la interpretación de los datos experimentales es la construcción de un modelo de trabajo que tenga asidero físico o que esté basado en el conocimiento previo del sistema, ya que el mismo tiene la función de describir las propiedades de los procesos que se llevan a cabo en la muestra que se está estudiando. En efecto, dicho modelo puede ser considerado como una representación racional del fenómeno existente y del conocimiento preliminar que se tenga de los procesos que ocurren en el sistema. ^[27]

En primera instancia, se puede decir que el análisis de los datos experimentales de impedancia se pueden hacer mediante dos vías diferentes, la primera, conocida como enfoque teórico, consiste en la confirmación de un modelo hipotético derivado preliminarmente a partir de suposiciones hechas sobre el comportamiento físico del sistema, la cual es la que predomina en los análisis de espectroscopía de impedancia electroquímica y que consiste en escoger la estructura del modelo a priori y compararlo con los datos experimentales, por lo que se dice que el procedimiento de identificación es sólo paramétrico.

La segunda vía de análisis corresponde a la derivación de un modelo de trabajo a partir de los datos experimentales y a este enfoque se le conoce como experimental, en cuyo caso el proceso de identificación del modelo es estructural y paramétrico a la vez. ^[27]

Además de lo mencionado anteriormente, existen dos procedimientos de modelado diferentes, que se pueden aplicar para el análisis de los datos de impedancia, por una parte se encuentra el modelado clásico, en el cual se derivan expresiones teóricas para el comportamiento de la impedancia del sistema basadas en algunas consideraciones sobre los procesos que se llevan a cabo en el mismo, las cuales se

traducen en un conjunto de ecuaciones integro – diferenciales que describen la distribución espacial de las variables que caracterizan al sistema.

Por otro lado se tiene el modelado estructural, el cual es el más usado en la actualidad, en donde se asume que el modelo de impedancia puede ser representado directamente en el dominio de la frecuencia como una estructura conformada por distintos elementos de circuito, los cuales se conectan siguiendo diferentes leyes de acuerdo al comportamiento real del sistema.

En este tipo de modelado, cada elemento de circuito describe un proceso físico simple que se lleva a cabo dentro del sistema que se está estudiando, por lo que el modelo completo será un circuito electroquímico (circuito equivalente) que corresponderá con el mecanismo estudiado, lo cual tiene una ventaja muy importante comparada con el modelado clásico, la cual es que el número de parámetros que se maneja en el modelado estructural es mucho menor, lo cual los hace totalmente identificables y que el modelo sea más fácil de manipular y más eficiente. ^[27]

4.4.3.1.- Circuitos equivalentes.

Se puede definir el circuito equivalente como el arreglo de una serie de elementos (resistores, capacitores, inductores, elementos de fase constante, etc), que se encuentran conectados ya sea en serie o en paralelo y que modelan el comportamiento de impedancia que tiene el sistema electrodo – material que se está estudiando.

Tener a la mano un modelo fisicoeléctrico detallado de los diferentes procesos que se llevan a cabo durante la caracterización de un sistema mediante medidas de impedancia puede ser muy difícil, ya que el mismo puede no estar disponible, ser prematuro o quizás muy complicado como para garantizar su uso inicial. En estos casos, lo que se trata de hacer para solventar el problema es mostrar que los datos experimentales de impedancia se pueden representar con cierta precisión mediante el

uso de un circuito eléctrico equivalente que modele el comportamiento de impedancia del sistema.

En estos circuitos, una resistencia representa un camino conductivo y un resistor dado podría cuantificar la conductividad de la matriz del material o incluso una medida asociada con algún tipo de proceso (reacción) que se lleve a cabo en la interfase electrodo – material. De igual manera, las inductancias y capacitancias serán asociadas generalmente con regiones de polarización de cargas y con procesos específicos de adsorción y electrocristalización en el electrodo. Es importante destacar que los elementos de circuito ordinarios, tales como resistores y capacitores son tratados como elementos ideales. ^[23]

4.4.3.2.- Modelos electroquímicos básicos.

En los estudios de impedancia de sistemas electroquímicos existen tres estructuras fundamentales de circuitos eléctricos que son muy conocidas y usadas como base para el modelado del sistema. En algunos casos, como por ejemplo cuando se presentan elementos parásitos en las mediciones, es necesario combinar los modelos a fin de obtener el comportamiento deseado. Estos modelos electroquímicos básicos son los siguientes: ^[27]

- ✓ **Estructura de Maxwell:** en este tipo de modelo (ver Figura N° 15), las corrientes que fluyen a través de las ramas de la estructura son aditivas y la corriente total es calculada como la sumatoria de cada corriente individual. Esta estructura es usada para el modelaje de sistemas en los que ocurren procesos en paralelo.

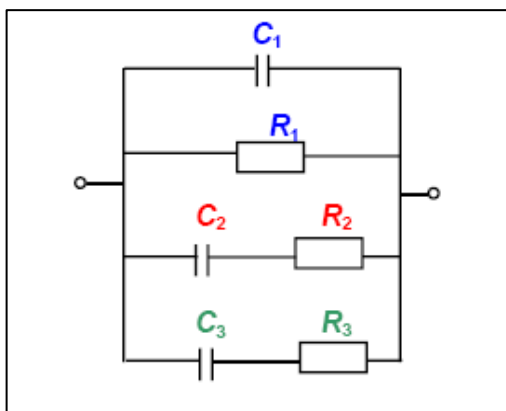


Figura N° 15: Estructura de Maxwell.

- ✓ **Estructura de Voigt:** este modelo (ver Figura N° 16) consiste en mallas (compuestas por resistencias y capacitancias en paralelo) conectadas en serie. La corriente que fluye por el sistema es igual para cada malla y el fenómeno modelado por cada una de ellas comienza instantáneamente. Esta estructura es usada básicamente para la descripción de la impedancia de muestras en estado sólido, y en especial es la estructura más tradicional para modelar el comportamiento de la impedancia en los sistemas cementantes.

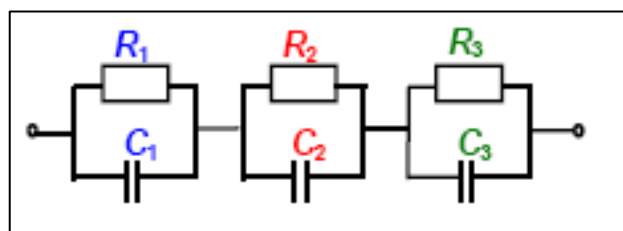


Figura N° 16: Estructura de Voigt.

- ✓ **Estructura escalonada:** este modelo (ver Figura N° 17) consiste en un número de elementos correspondientes a los fenómenos modelados, los cuales ocurren consecutivamente.

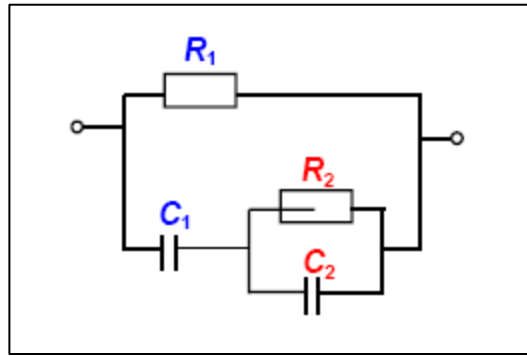


Figura N° 17: Estructura escalonada.

4.4.3.3.- Componentes parásitos.

Todos los componentes o elementos de circuito no son ni puramente resistivos ni puramente reactivos, más bien son una combinación de ambos elementos de impedancia. Todo esto resulta en que los elementos de circuito reales tienen asociados elementos parásitos (inductancias en resistores, resistencias en capacitores, capacitancias en inductores, etc.). [29]

Por supuesto, la existencia de materiales diferentes y la forma en que son manufacturados los sistemas de medición de impedancia producen cantidades variables de elementos parásitos afectando tanto la utilidad del componente como la precisión con la cual se puede determinar su impedancia. En este sentido, es importante tener acotado que los sistemas de medición reales cuentan con elementos parásitos, por lo tanto, tener en cuenta esta premisa permite identificar posibles problemas en los análisis de datos experimentales.

4.4.3.4.- Cálculo de los modelos de impedancia.

Las expresiones de impedancia se pueden tratar de la misma manera que las resistencias, con la salvedad de que son cantidades complejas, por lo cual es necesario tomar en cuenta el álgebra de los números complejos para efectuar los cálculos. Por otro lado, validez de las leyes de Kirchhoff en el dominio de la frecuencia permite demostrar que las impedancias que se encuentran conectadas en serie o en paralelo pueden ser

tratadas matemáticamente bajo las mismas reglas que las establecidas para las resistencias. [27]

Como fue mencionado anteriormente, la estructura de Voigt es la más tradicional en el modelado de sistemas cementantes, por lo cual se presentará el desarrollo matemático para este modelo. En general, los estudios de impedancia electroquímica permiten obtener dos tipos de resultados, los concernientes a la interfase electrodo – material y los referidos a la matriz del material como tal. Como se observa en la Figura N° 18, el sistema lechada de cemento – electrodo se puede simular con dos mallas conectadas en serie, cada una de ellas compuesta de un resistor y un capacitor conectados en paralelo. En la misma se tiene que los componentes R_1 y C_1 corresponden a la simulación de la muestra y los elementos R_2 y C_2 son por referidos a la interfase electrodo – muestra.

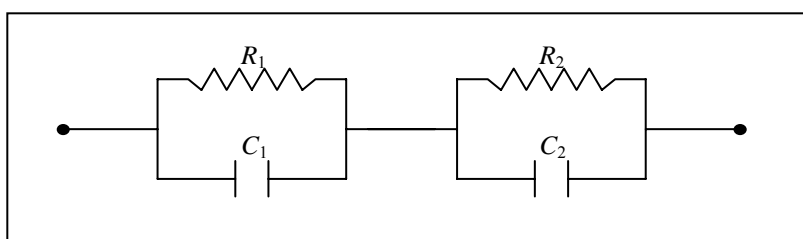


Figura N° 18: Circuito equivalente para el sistema electrodo – lechada de cemento.

A partir de las leyes de Kirchhoff se puede decir que el cálculo para estos circuitos equivalentes se sigue con la regla de que las impedancias conectadas en serie se suman, mientras que para las que se encuentran en paralelo se suman los recíprocos, es decir, las admitancias. A partir de esta consideración, y de las expresiones mostradas en la tabla N° 2, se puede generar las siguientes expresiones para la impedancia total del circuito:

$$Z'(\omega) = \frac{R_1}{1 + (\omega \cdot C_1 \cdot R_1)^2} + \frac{R_2}{1 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2)^2} \quad (26)$$

$$Z''(\omega) = \frac{R_1^2 \cdot \omega \cdot C_1}{1 + (\omega \cdot C_1 \cdot R_1)^2} + \frac{R_2^2 \cdot \omega \cdot C_2}{1 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2)^2} \quad (27)$$

El diagrama de Nyquist para el circuito equivalente estudiado, es como se muestra en la Figura N° 19, en donde se puede ver que los valores de R_1 y C_1 son menores que los valores de R_2 y C_2 , lo cual sucede generalmente. Esto hace que el primer término de la sumatoria de las expresiones (26) y (27) sea predominante a altas frecuencias y que el segundo término de ambas expresiones lo sea a bajas frecuencias.

De esta manera y tomando en cuenta algunas consideraciones físicas como por ejemplo que la mayor resistencia que se puede encontrar en el sistema corresponde a la interfase electrodos-material, es posible decir que a altas frecuencias se reflejan los elementos que modelan el comportamiento de la matriz del material y que a bajas frecuencias predominan los elementos que simulan la interfase.

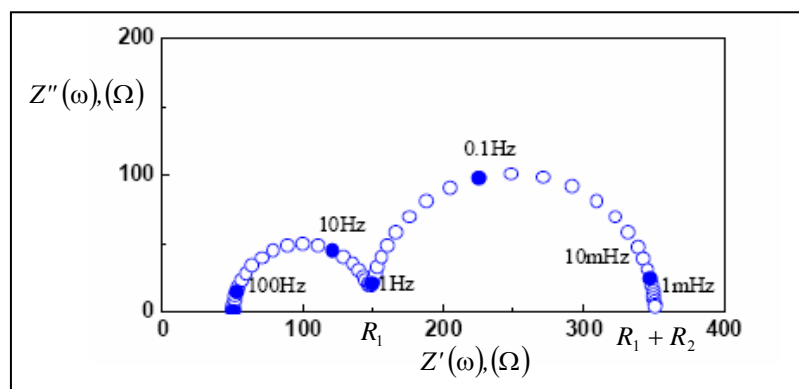


Figura N° 19: Diagrama de Nyquist para el circuito equivalente que modela el sistema electrodo – lechada de cemento.

4.4.4.- Distorsión de los valores de impedancia electroquímica medidos a alta frecuencia.

La distorsión de los valores de impedancia a altas frecuencias es prácticamente en todos los casos un problema originado por el sistema de medición que se está empleando para los estudios. Dichas distorsiones pueden ser provocadas ya sea por

componentes parásitos que posea la celda o por el instrumento de medición que se esté utilizando. ^[28]

Debido a lo anteriormente mencionado, se deben tomar algunas medidas preventivas a la hora de llevar a cabo las pruebas experimentales, entre ellas se encuentra el uso de cables coaxiales lo más cortos posibles para evitar efectos inductivos en los mismos, asegurarse de la integridad de las soldaduras y conexiones que se tienen en la celda de medición a fin de evitar efectos capacitivos parásitos en las mismas. ^[10]

Por otro lado, una vez que se han empleado las medidas correspondientes a fin de minimizar los efectos de los componentes parásitos en el sistema de medición y aún persiste el problema, se hace necesaria la cuantificación de dichos efectos a fin de sustraerlos de los datos experimentales. Sin embargo, en algunos casos lo anterior puede ser muy difícil de realizar, por lo que se hace necesario, en última instancia, rediseñar el sistema de medición a fin de mejorar los resultados experimentales. ^[10]

4.4.5.- Ventajas y limitaciones del uso de la impedancia electroquímica.

El uso de técnicas basadas en la medición de propiedades eléctricas, como la espectroscopía de impedancia, se ha hecho muy popular en la investigación y desarrollo de materiales debido a que requiere solamente de medidas eléctricas relativamente simples que pueden ser leídas automáticamente y cuyos resultados pueden ser correlacionados con propiedades complejas de las muestras que se están estudiando. ^[23]

En el caso de estudios sobre sistemas cementantes, la espectroscopía de impedancia presenta algunas ventajas importantes: ^[30]

- ✓ El método no es invasivo, ni destructivo, por lo cual las muestras no requieren de ningún tipo de preparación especial.

-
-
- ✓ Se pueden desarrollar modelos de circuitos equivalentes y con los elementos que los conforman se pueden correlacionar algunas características del material, para estudiar su evolución en el tiempo.
 - ✓ Las medidas se pueden llevar a cabo sobre muestras mucho más grandes, en las que los efectos de la matriz del material puedan ser cuantificados con mayor facilidad.

Las dos desventajas principales con las que cuenta esta técnica es su incapacidad para diferenciar entre los factores esenciales responsables de la conducción dentro de la muestra, por lo que se pueden presentar posibles ambigüedades en la interpretación de los datos experimentales, y por otro lado, el problema de que para un mismo comportamiento de impedancia se pueden presentar diferentes modelos de circuitos equivalentes, lo cual representa un problema importante a la hora del modelado del sistema. En tal sentido, la elección de un modelo adecuado debe ir acompañada por la intuición física y el conocimiento previo del comportamiento del sistema. ^[23]

4.5.- Antecedentes.

En esta sección se presentan algunos trabajos previos en dos áreas relacionadas con la presente investigación, la primera concerniente al fenómeno de migración de fluidos en pozos petroleros y la segunda corresponde a trabajos de investigación en el área de espectroscopía de impedancia aplicada a sistemas cementantes.

4.5.1.- Migración de fluidos en pozos petroleros.

Evaluación de materiales cementantes para pozos de petróleo y/o gas con propiedades antimigratorias de gas. ^[31] (2002)

En este trabajo especial de grado, se hace una importante revisión bibliográfica sobre la problemática de migración de fluidos en pozos petroleros, de la misma manera indica que se han realizado diferentes estudios para evaluar diversas propiedades de las lechadas de cemento y determinar su influencia sobre el control de la migración de

fluidos. Sin embargo, no existe ninguna metodología que indique cuales propiedades de la lechada deben evaluarse y controlarse para prevenir la migración del gas.

Se evaluaron las propiedades establecidas por la API, así como el desarrollo de la fuerza de gel estática a lechadas con y sin aditivos antimigratorios, y se evidenció la importancia del tiempo de transición, ya que se obtuvo que para lechadas de cemento antimigratorias, este valor no debe exceder de 90 minutos. De igual manera se determinó que el desarrollo de fuerza de gel es un parámetro significativo en el control de la migración del gas.

Por otro lado, en esta investigación se hace la observación de que el MINIMACS (equipo para la evaluación del desarrollo de la SGS) es un sistema mecánica y electrónicamente inestable que dificulta las medidas de SGS. Del mismo modo se enfatiza en la necesidad de estudiar otras técnicas para la evaluación del desarrollo de la SGS, a fin de establecer una metodología para evaluar el control antimigratorio en lechadas de cemento.

Dificultades de perforación originadas por gas superficial en el Golfo de Tailandia. ^[19] (2004)

En este artículo se presentan historias de problemas de migración de gas presentados en tres pozos perforados en el golfo de Tailandia, además se da una descripción de los enfoques dados para la solución de estos problemas, los cuales resultaron en cambios en las operaciones tanto de perforación como de cementación.

De la misma manera se presenta un importante resumen sobre la teoría de migración de gas en pozos petroleros y se concluye que el problema de la migración de fluidos es sumamente complicado y tiene un gran impacto en la planificación de las operaciones de campo.

Tiempo de transición de lechadas de cemento, definiciones y conceptos errados respecto a la migración de fluidos en el espacio anular. ^[22] (2004)

El control de la migración de gas u otros fluidos en el espacio anular luego de las operaciones de cementación ha sido objeto de gran cantidad de estudios, los cuales incluyen enfoques prácticos, teóricos y modelaje matemático y/o físico, cada uno concentrándose en una o dos causas en específico y a pesar de que han presentado conclusiones válidas, todos han fallado en su momento.

En esta investigación se establece una definición para el tiempo de transición en lechadas de cemento y se discute sobre la idea errada de usar solamente el desarrollo de la fuerza de gel estática para el control de la migración del gas en los pozos petroleros.

Se define el tiempo de transición como el espacio de tiempo que dura la lechada desde que tiene un desarrollo de SGS de 100 lbf/100 pie², hasta que alcanza 500 lbf/100 pie², que es cuando tiene suficiente fuerza de gel para evitar la invasión del gas.

Se presentan cuatro tipos de lechadas de cemento que muestran comportamientos que dan origen a conceptos errados sobre lo que es el tiempo de transición. Además de esto se concluye que la SGS, a pesar de que es crítica en la prevención de la entrada de aguas superficiales al pozo, no es por sí sólo un factor crítico para prevenir la migración de gas a través de la lechada de cemento.

Metodología para evaluar la migración de gas en lechadas de cemento. ^[15] (2004)

La migración de gas en pozos petroleros representa el 25% de las fallas en los trabajos de cementación primaria, por lo cual los trabajos deben orientarse al estudio de algunas propiedades de las lechadas de cemento, entre ellas la fuerza de gel estática (SGS). De igual manera se establece que el estudio de estas variables no ha mostrado una metodología que permita atacar el problema controlando alguna de estas propiedades por separado.

Este artículo presenta una nueva metodología para evaluar la capacidad que tiene una lechada de cemento para controlar la migración de fluidos en tres pasos que consisten en la estimación del factor potencial de flujo (FPF), la fuerza de gel estática (SGS) y la simulación de la reducción de presión debido a la SGS en función del tiempo. Del mismo modo, se establece que esta metodología permite seleccionar el diseño óptimo de la lechada de cemento a fin de prevenir accidentes industriales y asegurar la vida del pozo.

Se establece también que no existe ningún método estandarizado en el ámbito industrial para la determinación de la SGS en sistemas de cementos petroleros y que la ISO (International Organization for Standardization) está evaluando tres equipos de laboratorio a fin de establecer dicho método.

De esta investigación se tomaron datos importantes respecto a la teoría de la migración de fluidos en pozos petroleros y sobre el estado del arte de esta problemática en la industria.

4.5.2.- Espectroscopía de impedancia aplicada a sistemas cementantes.

Espectro de Impedancia para pastas de cemento hidratadas. ^[32] (1991)

Este estudio fue llevado a cabo con la finalidad de estudiar más detalladamente el comportamiento de la impedancia de pastas de cemento durante todo el proceso de hidratación, dando especial atención a las características del espectro correspondientes a la matriz del cemento. Se monitorearon los cambios en la resistencia global de la matriz y su comportamiento individual como una función del tiempo de hidratación, además de que se desarrollaron modelos de circuito equivalente para cada tipo de espectro obtenido.

Los espectros de impedancia se obtuvieron en un rango de frecuencias desde 5 Hz hasta 13 MHz, usando para ello un analizador de impedancia HP-4192, igual al que

se empleará para la presente investigación. Por otro lado, se determinó que la resistencia de la matriz de cemento aumenta con el tiempo, por lo que se graficó el comportamiento de este parámetro en función del tiempo de hidratación.

Se efectúa en este artículo un buen análisis del circuito equivalente generado y se dan algunos valores típicos para los elementos que conforman el circuito. Finalmente, se concluye que la espectroscopía de impedancia es una poderosa herramienta para la separación de los procesos de conducción en materiales heterogéneos o multifásicos. De igual manera se menciona que las técnicas de medición con corriente directa o con corriente alterna a frecuencia simple, pueden arrojar datos no confiables para estudiar los cambios de la conductancia en la matriz del cemento con el tiempo.

Aplicación, medición e interpretación de la espectroscopía de impedancia en materiales cementantes hidratados. ^[33] (1994)

Este trabajo corresponde a un estado del arte del uso de la espectroscopía de impedancia para estudiar la evolución de la microestructura de los materiales cementantes durante la hidratación. En el mismo se tratan aspectos teóricos sobre la técnica de impedancia, tales como antecedentes, fundamentos, ventajas, desventajas, etc. Del mismo modo, se presentan algunos comportamientos típicos de los espectros de impedancia de los materiales cementantes hidratados y el modelo de circuito equivalente más usado para simular el sistema.

Se emplearon diferentes muestras con relaciones agua/cemento diferentes, así como una celda de medición de plexiglass de dimensiones conocidas con electrodos de acero inoxidable. Para las mediciones se emplearon dos analizadores de impedancia, uno de ellos fue el HP-4192 y se empleó el procedimiento de corrección presentado en este artículo para la eliminación de las impedancias correspondientes a elementos parásitos, las cuales se hacían más importantes a medida que aumentaba la frecuencia.

Se concluye que algunos comportamientos de la respuesta de la matriz del cemento pueden ser relacionados con la estructura de los poros del cemento. Por otro lado, la constante dieléctrica del material puede ser estimada a partir de la frecuencia que hace máximo al componente imaginario de la impedancia en la región de alta frecuencia. De la misma manera se expresa que la habilidad del experimentador para interpretar el espectro de impedancia radica en la combinación de los esfuerzos teóricos y experimentales.

Interpretación de la espectroscopia de impedancia de pastas de cemento mediante el modelado por computadora. ^[25] (1995)

Se expresa en esta investigación que se ha demostrado que el espectro de impedancia de las pastas de cemento depende fuertemente de la cantidad de porosidad que hay en la microestructura y quizás, en gran medida del arreglo y la conectividad de la porosidad. Del mismo modo, se presentan algunas características experimentales particulares de los espectros de impedancia, así como el modelo computacional utilizado, el cual es una representación digital en dos o tres dimensiones de la microestructura del cemento.

De igual manera se indica en este trabajo que la resistencia de la matriz del cemento aumenta como consecuencia de que el fluido conductor que se encuentra en los poros de la misma es reemplazado con productos de reacción que tienen propiedades dieléctricas.

Se concluye a partir de los resultados generados por el modelo que los cambios en el espectro de impedancia a través del tiempo de hidratación son debido a los cambios en las cantidades, distribución y arreglos de las fases. En tal sentido con una selección apropiada de las propiedades eléctricas adecuadas para las fases microestructurales, se puede modelar cuantitativamente el espectro de impedancia.

**La aplicación de la espectroscopía de impedancia a los sistemas cementantes. ^[30]
(1999)**

En este trabajo se reporta que las primeras investigaciones sobre mediciones eléctricas en pastas de cemento hidratadas se remontan a 1920. La principal motivación de estos trabajos fue usar técnicas eléctricas para la determinación de tiempos de fraguado, desde esa fecha se han publicado un gran número de investigaciones sobre la conductividad/resistividad de cemento hidratado.

De igual manera este trabajo presenta un estado el arte de la aplicación de las técnicas eléctricas en sistemas cementantes y presenta las diferentes ventajas que tienen estas técnicas sobre métodos tradicionales de análisis microestructural. Se expresa que prácticamente todos los trabajos publicados sobre la aplicación de espectroscopía de impedancia a sistemas cementantes han sido orientados al estudio de pastas de cemento puras y morteros, específicamente en las etapas finales de la hidratación, como por ejemplo luego del fraguado.

En la actualidad sólo hay datos limitados sobre las respuestas de impedancia de sistemas cementantes durante etapas tempranas de la hidratación, como por ejemplo antes del fraguado, además que esos datos fueron obtenidos para pastas de cemento puras. También se presenta en esta investigación algunos datos sobre el efecto de la adición de agregados sobre el espectro de impedancia de la pasta de cemento.

Modelo de circuito equivalente para la espectroscopía de impedancia del concreto. ^[34] (2000)

En este trabajo de investigación se propone un nuevo modelo de circuito equivalente para el concreto, que busca revelar el significado físico de los parámetros que conforman los circuitos equivalentes tradicionales, basado en la estructura física del concreto. En este aspecto se profundiza mucho y además se muestra un análisis

microestructural del concreto y la relación entre los elementos del circuito equivalente propuesto y los elementos de circuito del modelo tradicional.

A partir del modelo desarrollado se hace un análisis del comportamiento de impedancia para el concreto, así como de algunas características particulares del mismo. También se expresa que el modelo propuesto es capaz de explicar exitosamente y con un basamento físico las diferentes peculiaridades que muestra la impedancia del concreto.

Uso de la espectroscopía de impedancia electroquímica en la caracterización de lechadas de cemento con propiedades antimigratorias de gas utilizadas en la construcción de pozos petroleros. ^[35] (2002)

Este trabajo es el primero que se reporta en Venezuela en aplicación de espectroscopía de impedancia en cementos petroleros y en especial en la cuantificación del tiempo de endurecimiento para lechadas de cemento. Se reportan pruebas de caracterización de lechadas según la API, de capacidad de migración de gas y pruebas de impedancia electroquímica.

Algunas consideraciones importantes se desprenden de este trabajo especial de grado, las cuales sirven como referencia a la presente investigación. Entre ellas se tiene, que la implementación del circuito de referencia con la estructura de Voigt modela adecuadamente el sistema electrodos- lechada de cemento, por otro lado, se tiene que el elemento de circuito que provee la información necesaria para la caracterización de las propiedades de la lechada, es la resistencia que se encuentra en la malla correspondiente a la muestra de lechada.

Por otra parte se logró identificar que la primera derivada de la curva de resistencia en el tiempo provee la información respecto al tiempo de endurecimiento con un error de ± 15 minutos, de este modo se puede decir que el significado físico de esta derivada puede ser la velocidad de desaparición del agua de la lechada de cemento por reacción química.

En esta investigación también se hace mención acerca de los problemas operacionales que presenta el MINIMACS para la determinación del desarrollo de fuerza de gel estática.

5.- DESCRIPCIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS

Balanza para fluidos presurizada, marca Halliburton, modelo único: Este equipo es utilizado para medir la densidad de la lechada de cemento. Consta de una copa de volumen fijo, en la cual se introduce la muestra a estudiar y se aplica presión a fin de minimizar el efecto del aire entrampado sobre las mediciones. Se equilibra la copa tanteando con los contrapesos del equipo y se lee directamente el valor de la densidad en libras por galón (± 0.1 lb/gal).

Mezclador, marca Chandler Engineering, modelo 3060: Se usa para mezclar y homogenizar la lechada de cemento. Este equipo tiene una capacidad de 1/4 de galón y opera de dos formas: a velocidad variable (controlada manualmente) y con dos velocidades predeterminadas (4000 rpm y 12000 rpm). La primera velocidad se emplea para el mezclado de los aditivos sólidos y líquidos, por otro lado, la segunda velocidad se usa para simular la energía de mezcla que se transfiere a la lechada de cemento a fin de mantenerla homogénea antes de bombearla al pozo.

Cámara de curado, marca Chandler Engineering: Se usa este equipo para llevar la lechada de cemento a condiciones de presión (± 1 psi) y temperatura ($\pm 0,1$ °F) de pozo, a fin de determinar posteriormente algunas propiedades de la muestra como su permeabilidad, resistencia a la compresión y sedimentación. Esta cámara trabaja hasta una presión de 3000 psi y una temperatura de 500 °F.

Consistómetro presurizado, marca Chandler Engineering, modelo Cp8: Este equipo es empleado para la determinación del tiempo de espesamiento de una lechada de cemento, el cual corresponde al tiempo en que la misma se puede bombear al pozo bajo condiciones de temperatura y presión simuladas. El equipo consta de un recipiente cilíndrico rotatorio, que contiene la lechada y una paleta fija con la cual se puede medir el torque generado por el espesamiento de la muestra bajo condiciones dinámicas. El cilindro trabaja a una velocidad constante de 150 rpm y el equipo hasta una presión de 10000 psi y una temperatura de 500 °F.

Balanza, marca Mettler, modelo PM 2000: Se emplea para cuantificar la masa de los diferentes aditivos que se emplean para preparar las lechadas de cemento, tiene una precisión de $\pm 0,01\text{g}$.

Consistómetro atmosférico, marca Chandler Engineering: Al igual que el consistómetro presurizado, se emplea para determinar el tiempo de espesamiento de la lechada de cemento pero a presión atmosférica. Este equipo funciona bajo los mismos principios que el consistómetro presurizado. De igual manera es empleado tanto en el acondicionamiento de lechadas a temperatura circulante del pozo, para la posterior determinación de la reología, pérdida de fluido y fluido libre, como en la simulación del proceso de premezclado de las lechadas que se evaluarán en el MINIMACS para la determinación de fuerza de gel estática.

Viscosímetro, marca Chandler Engineering, modelo 35: Este equipo es empleado para la determinación de las propiedades reológicas de la lechada de cemento (viscosidad, punto cedente y rompimiento de geles) a partir del ajuste de los datos experimentales a modelos conocidos.

Cilindro graduado: Se emplea este instrumento para determinar el volumen ($\pm 0.1\text{ mL}$) de fluido libre que tiene la lechada de cemento.

Vernier digital, marca Mitutoyo, modelo CD-6''-SC: Con este instrumento se obtienen las dimensiones de los cubos de cemento fraguado que se emplean como muestra para la prueba de resistencia a la compresión ($\pm 0,001\text{ mm}$).

Prensa, marca SHIMADZU, modelo UH20A: Este equipo es empleado para la determinación de la resistencia a la compresión del cemento fraguado ($\pm 50\text{ psi}$).

MiniMACS (Mini Multiple Analyzer Cement Slurry), marca Halliburton, modelo prototipo: Con este equipo es posible efectuar medidas de tiempo de espesamiento y de fuerza de gel estática. Siendo para esta última función que se empleará en la presente

investigación. Este aparato cuantifica la fuerza de gel estática (± 50 SGS) en función del tiempo, mediante un algoritmo que convierte el torque que le imprime una paleta rotatoria (0.5 a 2 grados/min)^[36] a la lechada de cemento, en fuerza de gel estática.

Analizador de Impedancia, marca Hewlett-Packard, modelo 4192A: Con este equipo es posible determinar de forma automática los diversos parámetros analizados para lograr los objetivos de la presente investigación (magnitud y componente real e imaginario de la impedancia, ángulo de fase, etc.). El aparato genera la frecuencia (entre 5 Hz y 13 MHz) a la que se van a determinar los parámetros de interés, y permite la aplicación de diferencias de potencial que van de 1.1 voltios a 5 milivoltios. Por otro lado, el equipo cuenta con funciones automáticas para anular elementos parásitos que se encuentren presentes en el sistema de medición.

Celdas de espectroscopía de impedancia electroquímica, prototipos desarrollados por PDVSA-INTEVEP: Para la presente investigación se emplearon tres modelos de celda electroquímica, los dos primeros (celdas #1 y #2) para la validación de los datos del equipo y del sistema de medición y el último (celda #3) para la obtención de los datos experimentales a correlacionar. La celda #1 corresponde a la empleada en una investigación anterior^[35], y consiste en dos placas planas cuadradas de acero inoxidable con un área de 5.5 cm² y con 10 cm de separación entre ellas (ver Figura N° 20), la estructura de dicha celda esta conformada por tres placas de plexiglass que sirven de recipiente para contener la muestra de lechada que se está estudiando. La celda tiene dos conectores coaxiales soldados a las placas de acero que sirven para enlazarla con el analizador de impedancia.

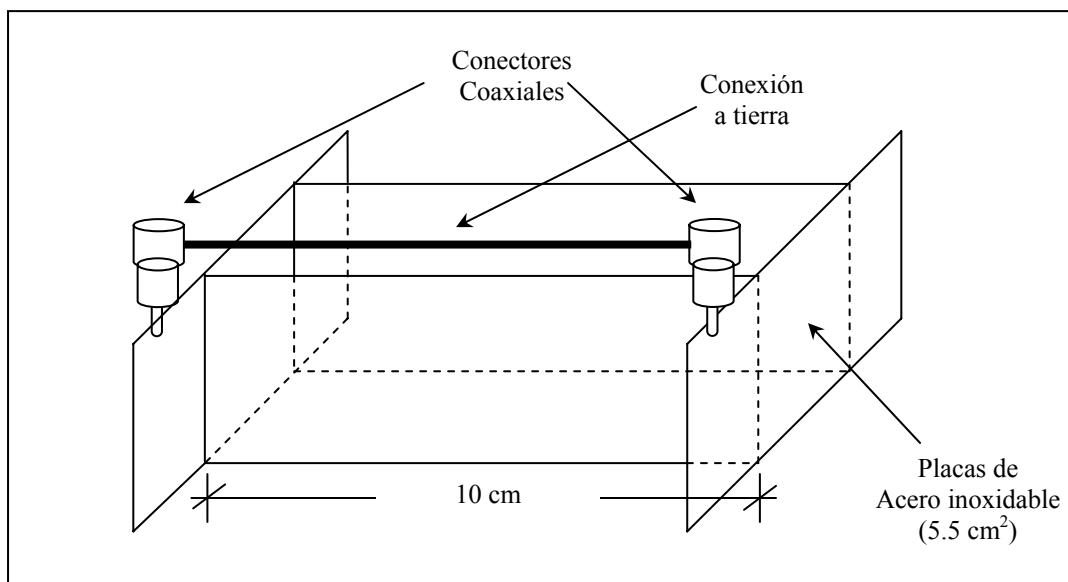


Figura N° 20: Esquema de la celda electroquímica #1.

Por otro lado, la celda #2 (ver Figura N° 21), es un rediseño ideado a partir de la celda #1 a fin de disminuir los errores por elementos parásitos que presenta dicha celda, este nuevo modelo se diferencia del anterior porque las placas planas son de menor área (2 cm^2) y porque se reconfiguró la posición de los electrodos y los puntos de soldadura de los mismos a las placas de acero.

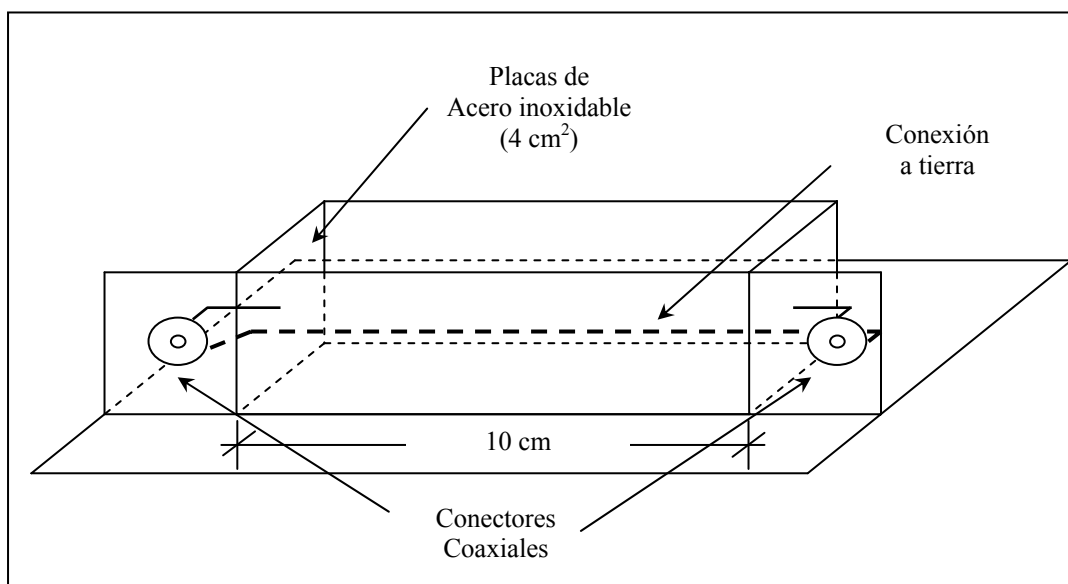


Figura N° 21: Esquema de la celda electroquímica #2.

La celda #3 (ver Figura N° 22) se diseñó con la finalidad de adicionar presión (hasta 1500 psi) y temperatura (hasta 400 °F) al sistema mientras se lleva a cabo la medición de impedancia electroquímica. En este nuevo diseño se plantea una estructura cilíndrica de acero inoxidable, capaz de soportar altas presiones y temperaturas, recubierta internamente por un material que permite aislar la lechada de cemento de la carcasa de acero. El aparato cuenta con electrodos de acero inoxidable de 1 cm de diámetro que son colocados perpendicularmente al cuerpo de la celda y completamente alineados longitudinalmente.

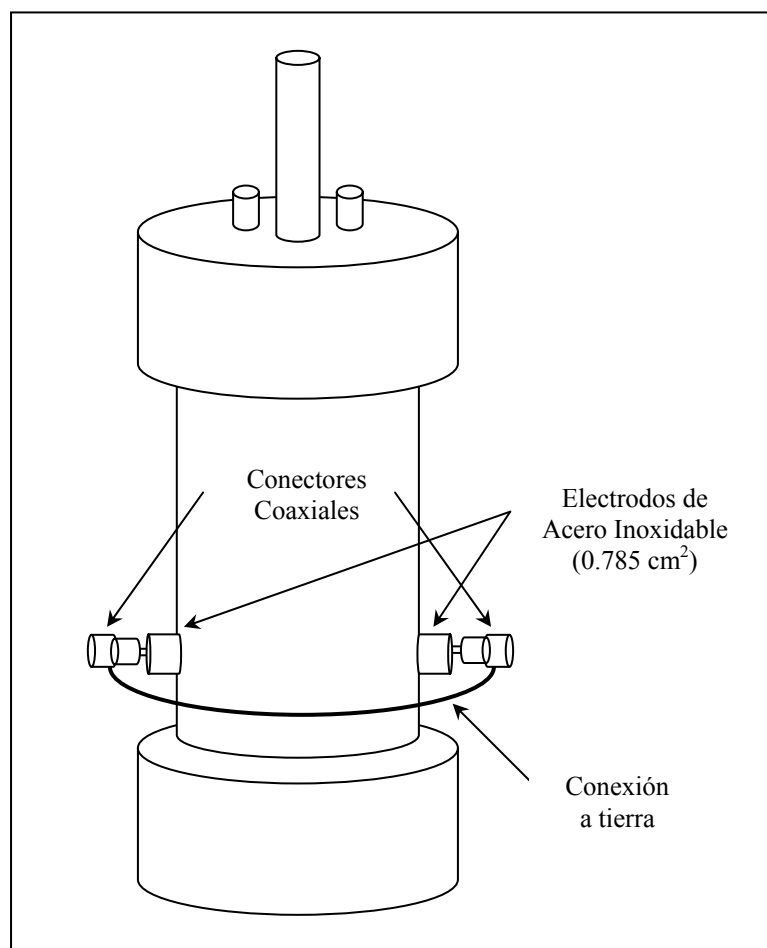


Figura N° 22: Esquema de la celda electroquímica #3.

6.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para cumplir con los objetivos planteados en la presente investigación se dividió el trabajo experimental en tres etapas consecutivas y dependientes entre sí. En la Figura N° 23 se presenta un diagrama de flujo en el que se muestra la estructura del marco metodológico del presente estudio.

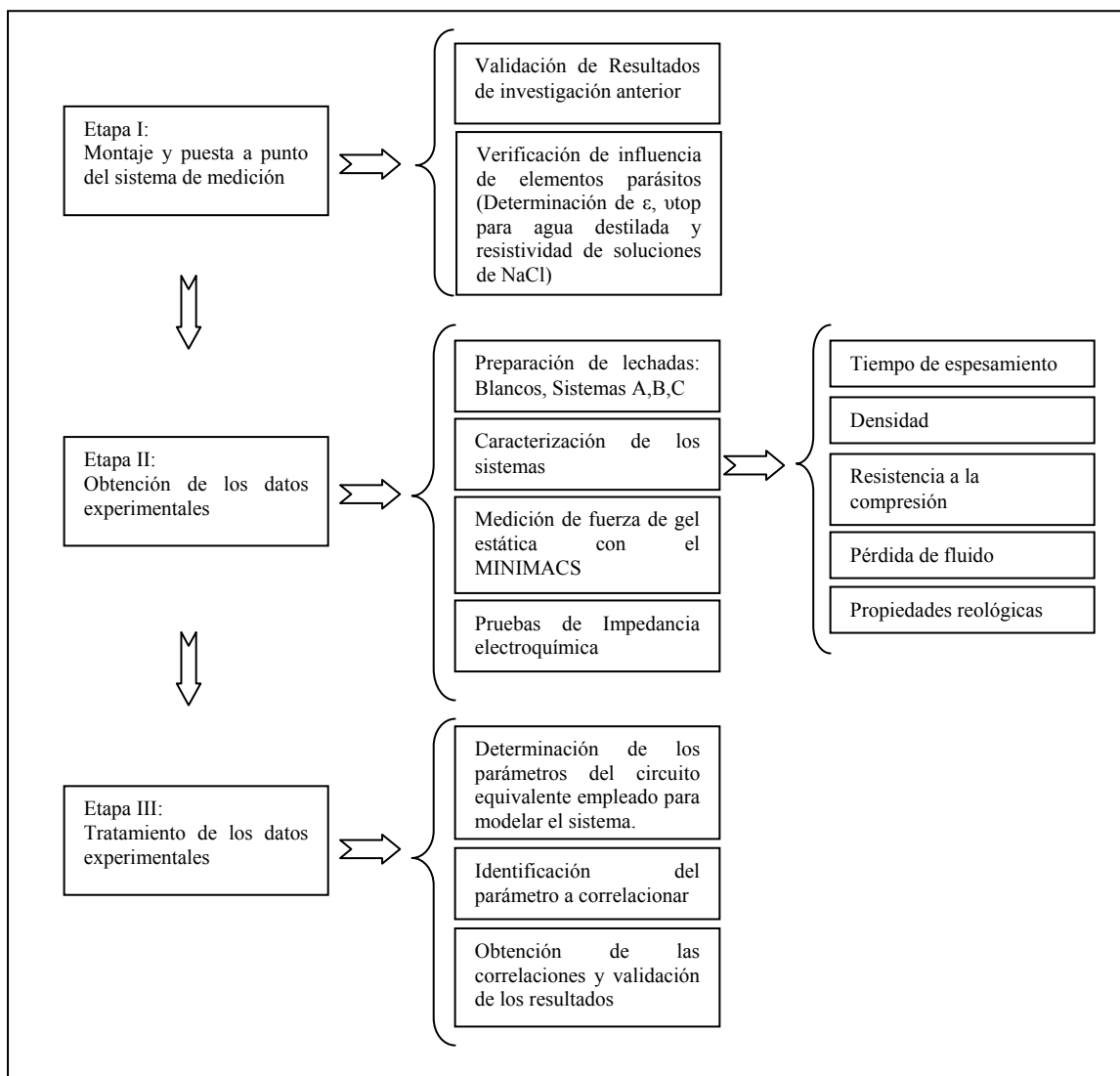


Figura N° 23: Diagrama de flujo de la metodología experimental.

6.1.- Montaje y puesta a punto del sistema de medición.

Para esta etapa de la investigación se empleó agua destilada y soluciones de Cloruro de Sodio a diferentes concentraciones como muestras patrón para la determinación de los espectros de impedancia electroquímica. De este modo, una vez que se instaló y verificó la operatividad de los equipos e instrumentos, se usaron las celdas #1, #2 y #3 para llevar a cabo las pruebas de impedancia.

Con la celda #1 se verificaron los resultados obtenidos en una investigación anterior ^[35], a fin de corroborar que no existe ningún desperfecto en los equipos e instrumentos utilizados. Posteriormente se emplearon las celdas #1, #2 y #3 para las pruebas de verificación de la influencia de los elementos parásitos presentes en las mismas, esto se hizo a partir de la obtención experimental (y posterior comparación con datos teóricos reportados en la bibliografía ^[35,37,38]) de parámetros como la constante dieléctrica (ϵ) del agua destilada, la frecuencia que hace máxima a la componente imaginaria de la impedancia (ω_{top}) para los barridos con agua destilada y la resistividad de las soluciones de Cloruro de Sodio.

Con los resultados obtenidos en esta etapa se identificó la presencia de desperfectos y componentes parásitos en el sistema de medición, a fin de eliminar los primeros y minimizar el efecto de los segundos sobre los resultados experimentales en los sistemas evaluados.

6.2.- Obtención de los datos experimentales.

6.2.1.- Preparación de las lechadas de cemento.

Para llevar a cabo el presente estudio se emplearon cuatro sistemas con propiedades antimigratorias denominados A, B, C y D además de los blancos, los cuales se definen en este trabajo como los sistemas que no poseen formulaciones

antimigratorias. El uso de estos blancos se hizo con la finalidad de observar diferencias en los resultados de impedancia electroquímica entre sistemas antimigratorios y no antimigratorios para identificar los comportamientos o parámetros que puedan distinguirlos.

Para la preparación de las diferentes lechadas que se emplearon en la presente investigación, se aplicó la metodología establecida por las prácticas recomendadas API 10B^[13], las cuales son estándares internacionales que indican detalladamente el procedimiento y los equipos empleados para la preparación de lechadas de cemento.

6.2.2.- Caracterización de los sistemas.

Al igual que la preparación de las lechadas de cemento, las pruebas para la caracterización de las mismas se efectuaron siguiendo las prácticas recomendadas API 10B^[13]. Dichas pruebas se realizaron a cada uno de los sistemas y blancos que se emplearon en el presente estudio para alcanzar los objetivos planteados.

6.2.2.1.- Medición del tiempo de espesamiento.

Para llevar a cabo esta prueba se empleó un consistómetro presurizado, el cual simula las condiciones del pozo a las que se quiere trabajar, las pruebas se llevaron a cabo de manera automática y el equipo es capaz de cuantificar la consistencia (Bc, unidades Bearden) de la lechada en función del tiempo, está estipulado que la prueba finalice en el momento que se alcanzan los 100 Bc. Cuando la lechada alcanza este valor de consistencia, se dice que la misma ya no es bombeable, se detiene la experiencia y se reporta este valor como tiempo de espesamiento.

6.2.2.2.- Determinación de la densidad de la lechada de cemento.

Para cuantificar esta propiedad se empleó una balanza presurizada para fluidos, en la que se coloca la lechada a presión en una copa de volumen fijo y se lee directamente la densidad de la misma en libras por galón.

6.2.2.3.- Pruebas de resistencia a la compresión.

Estas pruebas se le hacen a cubos de cemento fraguado de aproximadamente 2 pulgadas de lado, que se envejecen a condiciones de pozo en una cámara de curado. Una vez que se ha cumplido el tiempo de curado, se cuantifica el área de las caras y se procede al rompimiento de los cubos ejerciendo presión sobre los mismos con ayuda de una prensa a fin de determinar la carga neta que soportaron las muestras antes de fracturarse.

6.2.2.4.- Pruebas de pérdida de fluido estático.

En esta prueba se ajusta la temperatura de una celda HPHT (alta presión y alta temperatura) a las condiciones de pozo. Esta celda cuenta con una malla de filtrado con un área de 22.6 cm^2 , y la experiencia es llevada a cabo aplicando una presión de 1000 psi a la celda y cuantificando la masa de filtrado en una balanza de precisión por 30 minutos o hasta que la lechada de cemento se deshidrate completamente.

6.2.2.5.- Determinación de las propiedades reológicas.

Estas pruebas se efectuaron en un viscosímetro rotacional compuesto por dos cilindros concéntricos que se sumergen en la lechada de cemento que se va a estudiar, dichos cilindros se hacen girar a diferentes velocidades en intervalos de 10 segundos y se mide la resistencia ocasionada por la muestra a la rotación de los cilindros. Posteriormente se verifica a que modelo teórico se ajustan los datos obtenidos y se calculan los parámetros de dicho modelo.

6.2.3.- Determinación de la fuerza de gel estática.

Estas pruebas se llevaron a cabo en el MINIMACS, el cual es capaz de cuantificar de forma automatizada la fuerza de gel como función del tiempo. La experiencia se efectúa a condiciones de pozo luego de un acondicionamiento previo de la lechada que se efectúa en el consistómetro atmosférico. Estas pruebas se hicieron por triplicado a fin de validar los resultados y evaluar la repetibilidad de los mismos. Los datos obtenidos mediante este equipo fueron suministrados por PDVSA-INTEVEP para cada una de las formulaciones usadas en esta investigación a las condiciones definidas para las pruebas de impedancia electroquímica.

6.2.4.- Pruebas de impedancia electroquímica.

Estas pruebas se efectuaron de manera automatizada, usando un sistema de medición (ver Figura N° 24) compuesto por un analizador de impedancia, una celda electroquímica (celdas #1 y #2 para validación y celda #3 para las pruebas con los sistemas), un equipo de adquisición de datos y una computadora. Inicialmente se hicieron barridos en todo el espectro de frecuencias que abarca el equipo (5 Hz – 13 MHz), para acotar posteriormente el rango de dichos barridos a la zona de alta frecuencia que se evidencie en los espectros iniciales.

Las experiencias que se llevaron a cabo con los sistemas cementantes se efectuaron a 77, 150, 200 y 250 °F, a una presión de 14.7 psi para la primera temperatura y de 1000 psi para las restantes. De igual manera se efectuaron un total de tres pruebas por cada sistema cementante y por cada condición de temperatura a fin de evaluar la repetibilidad en los resultados.

Los resultados de estas pruebas fueron los valores de las componentes real e imaginaria de la impedancia del sistema como función de la frecuencia para el caso de los barridos y como función del tiempo (a una frecuencia de 5 MHz) para el caso de las pruebas a una sola frecuencia. Con dichos valores, fue posible determinar todos los

parámetros del circuito equivalente usado para modelar el sistema y por tanto determinar la variación de los mismos en el tiempo.

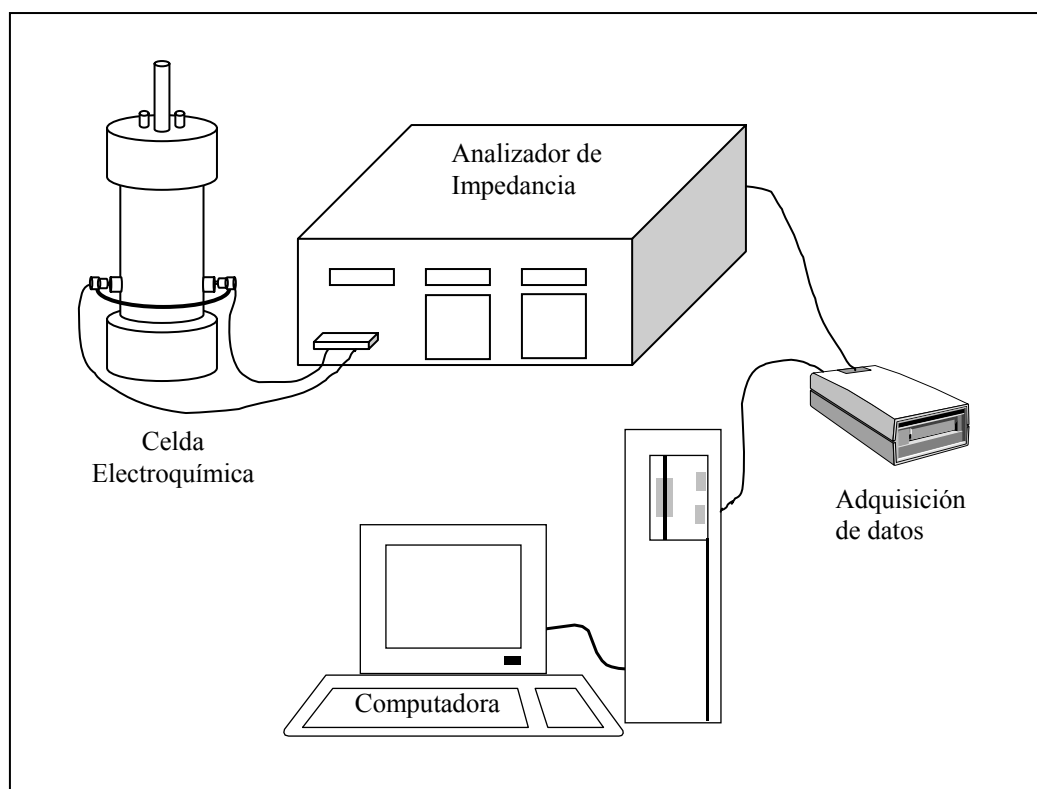


Figura N° 24: Esquema del sistema de medición y monitoreo de datos.

6.3.- Tratamiento de los datos experimentales.

Una vez obtenidos los datos experimentales con las pruebas de impedancia, se empleó un circuito equivalente compuesto por dos mallas en serie, cada una de ellas conformada por una resistencia y una capacitancia en paralelo, para el modelaje del comportamiento del sistema en estudio, este circuito se definió a partir de resultados de investigaciones anteriores ^[35, 40-46], en las que fue empleado con este mismo fin, por ser capaz de simular la realidad física del sistema. Se usaron los resultados experimentales para el cálculo de los diferentes elementos que conforman el circuito equivalente empleado para el modelaje y de esta manera se determinó la variación de estos parámetros en el tiempo.

Luego de conocida la dependencia con el tiempo de los valores de los elementos del circuito equivalente empleado se procedió a escoger el parámetro a correlacionar con los valores de fuerza de gel obtenidos a partir del MINIMACS, se procedió a la determinación de la expresión que relaciona ambas curvas y posteriormente a la validación de la misma mediante parámetros estadísticos pertinentes, tales como el coeficiente regresión y la evolución de residuales.

7.- PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presentan y analizan los diferentes resultados obtenidos para alcanzar los objetivos planteados en la presente investigación, de acuerdo a la estructura metodológica definida anteriormente.

7.1.- Montaje y puesta a punto del sistema de medición.

Antes de obtener los resultados experimentales, fue necesario determinar la confiabilidad de los datos recabados mediante las pruebas de impedancia, para ello se dividió la etapa del montaje y la puesta a punto del sistema de medición en dos partes, la primera corresponde a la validación de los resultados obtenidos de una investigación anterior ^[35] y la segunda parte tiene que ver con la evaluación de la influencia de elementos parásitos presentes en el sistema de medición.

7.1.1.- Validación de resultados de la investigación anterior.

El objetivo fundamental de esta etapa de la investigación radicó en verificar que los equipos que conforman el sistema de medición arrojan resultados confiables, basándose estos estudios en la determinación del espectro de impedancia electroquímica para el agua destilada, usando la celda #1 (celda empleada en una investigación anterior ^[35]) y comparando este espectro con el reportado en el mencionado trabajo.

En la Tabla N° 3 se presentan las condiciones experimentales bajo las cuales se obtuvieron los espectros de impedancia para el agua destilada en la presente investigación. Es importante destacar que el espectro para la muestra estudiada se obtiene perfectamente haciendo barridos hasta los 3.5 MHz aproximadamente, lo cual en este caso es sólo función del volumen de agua destilada que se emplea para llevar a cabo las experiencias.

Tabla N° 3: Condiciones experimentales para las pruebas de validación

<i>Condición</i>	<i>Valor</i>	<i>Observaciones</i>
Temperatura (°F)	77	
Presión (psi)	14.7	
Voltaje aplicado (mV)	10	
Barrido (kHz)	0.005 - 3500	En este rango se obtiene el arco completo.

Por otro lado, se presenta en la Figura N° 25 el espectro de impedancia obtenido en el presente trabajo para el agua destilada a las condiciones mencionadas anteriormente. En la misma se muestran de igual manera los valores característicos de frecuencia para este tipo de barridos. Es importante hacer notar que se obtuvo la forma semicircular característica para este sistema según lo esperado teóricamente ^[23,35], en donde se evidencia una alta resistencia del sistema y un amplio efecto capacitivo, lo cual es producto de la ausencia de iones en la muestra que faciliten la conductividad eléctrica.

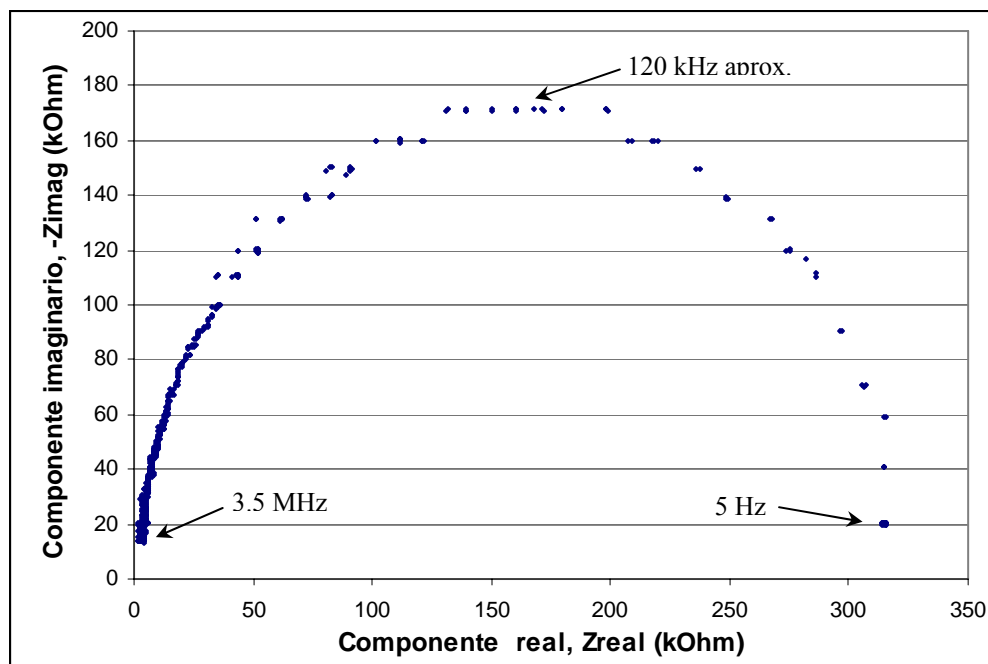


Figura N° 25: Espectro de impedancia para el agua destilada usando la celda #1

Como puede ser apreciado en la figura anteriormente mostrada, el barrido presenta cierta dispersión en los datos, lo cual puede ser producto de que se trabajó con

la data cruda sin aplicar la función “average” que tiene el equipo HP-4192A (esta función arroja como resultado un promedio de las mediciones del equipo cuando las mismas presentan mucha variación). Sin embargo, el hecho de que se presente esta variabilidad en el espectro también puede estar originado por vibraciones o corrientes de aire que inciden directamente sobre la celda. Se pudo constatar la existencia de estas corrientes de aire en el laboratorio en el que se hicieron las pruebas.

Por otro lado, además de que se obtuvo la misma forma semicircular reportada en una investigación anterior (ver Apéndice A), también se verificó que la frecuencia que hace que el componente imaginario de la impedancia sea máximo (120 kHz), se encuentra en el mismo orden de magnitud que la obtenida en dicha investigación (100 kHz)^[35]. En este caso la diferencia entre ambos valores puede tener su origen en diversas causas que van desde variaciones en las condiciones de las superficies de los electrodos, hasta el hecho de que el volumen de muestra es una cantidad medida apreciativamente, ya que lo que se hace es llenar la celda hasta los bordes de la misma.

Por otro lado, se muestra en la Figura N° 26 la comparación de tres pruebas realizadas con la celda #1 a fin de evaluar si los resultados obtenidos son repetibles y ver si existe distorsión entre una prueba y otra. Como puede ser apreciado en la figura, los barridos efectuados a intervalos de tiempo variables (10 minutos entre los barridos N° 1 y N° 2 y 20 minutos entre los barridos N° 2 y N° 3), presentan una notable diferencia en los arcos de impedancia y por tanto muestran valores distintos en la resistencia real del sistema.

Es importante mencionar para el caso del sistema que se está estudiando, que el mismo puede ser modelado a partir de un circuito equivalente como el mostrado en la Figura N° 18, en el cual la malla del lado izquierdo corresponde al comportamiento de la matriz del agua destilada y la otra corresponde a la interfase electrodo – muestra. Lo anterior se puede corroborar con lo expresado en la bibliografía ^[27] ya que para el sistema electrodos-agua destilada se presenta el fenómeno de la sobreposición de los arcos de impedancia a baja y a alta frecuencia, lo cual se traduce en que los valores de

los parámetros del circuito equivalente son aproximadamente iguales tanto para la muestra como para la interfase electrodo-muestra. Por lo tanto, la información de la resistencia de la muestra se puede leer directamente en el gráfico y la misma corresponde a la mitad del valor del punto del espectro que se encuentra sobre el eje real del gráfico de Nyquist y que tiene componente imaginario igual a cero.

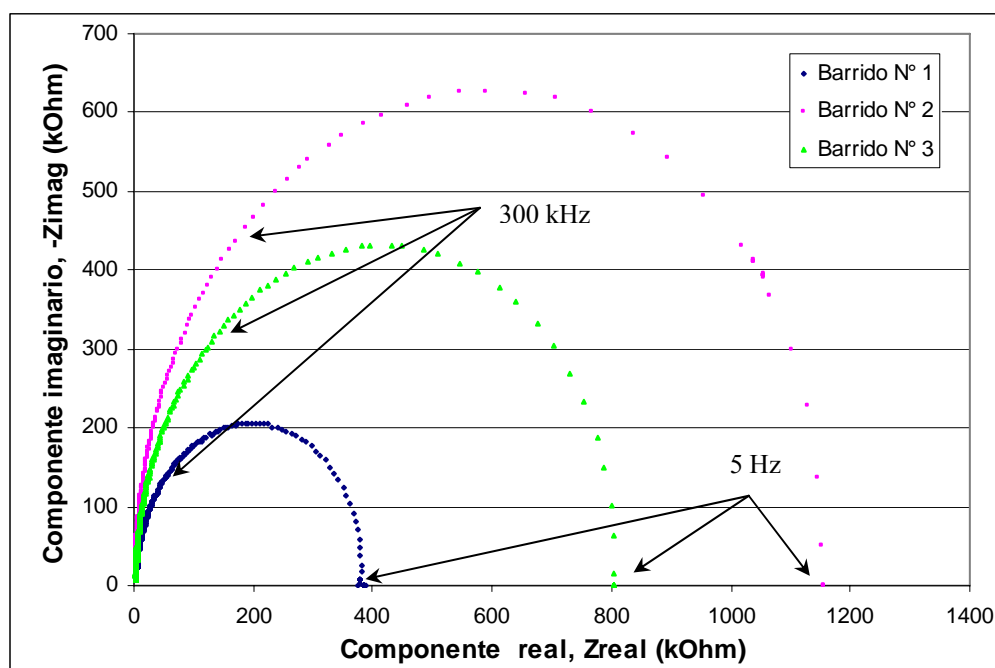


Figura N° 26: Pruebas de repetibilidad del espectro de impedancia para el agua destilada usando la celda #1

El comportamiento mostrado en la figura presentada anteriormente puede tener su origen en dos causas bien diferenciadas, la primera corresponde a problemas con la superficie de los electrodos, lo cual ya fue mencionado por Vázquez^[35] en una investigación realizada anteriormente (ver Apéndice B), en la que indica como cambian los espectros de impedancia tan sólo con limpiar la superficie de los electrodos con una lija. Por otro lado, la segunda causa corresponde a un efecto capacitivo que se puede observar claramente en la zona de baja frecuencia (entre 5 Hz y 300 kHz), el cual es producto del diseño de los electrodos, ya que si se observa la Figura N° 20, se puede notar que los mismos presentan un área que no se encuentra en contacto con la muestra, sino que se encuentra al aire libre, lo

cual la hace muy sensible a cambios en el entorno tales como humedad y movimiento del aire, estas apreciaciones fueron corroboradas por observaciones experimentales.

En este sentido, la Figura N° 27 muestra dos espectros de impedancia realizados en un intervalo de diez minutos, luego de haber limpiado los electrodos con una lija.

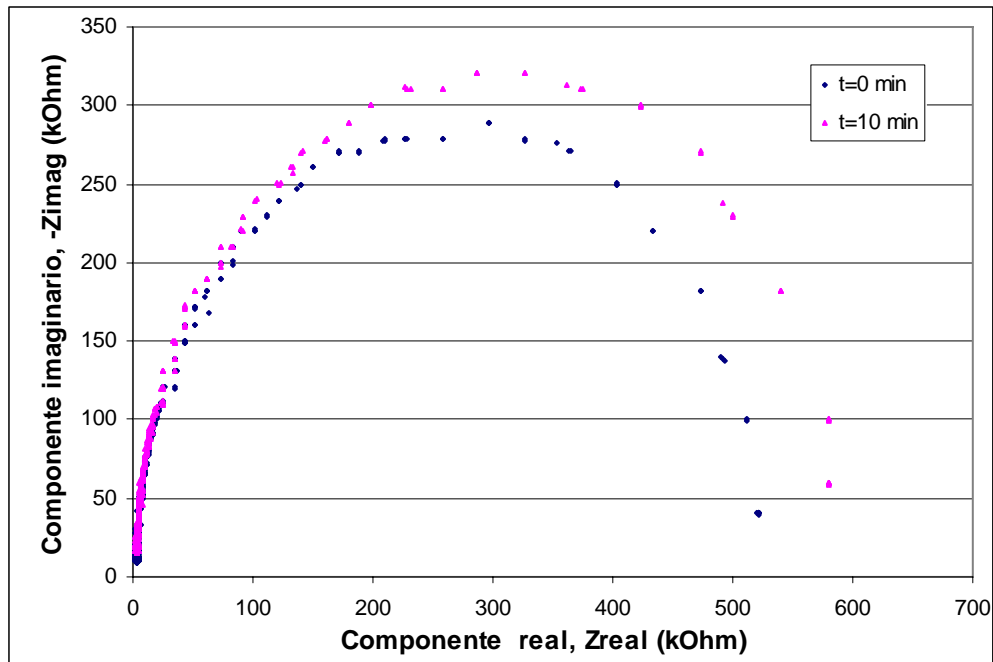


Figura N° 27: Pruebas de repetibilidad del espectro de impedancia para el agua destilada usando la celda #1 con electrodos lijados

Nótese que la figura anterior presenta una menor variabilidad en los espectros de impedancia para el agua destilada, lo cual es producto de que los electrodos fueron limpiados, sin embargo las diferencias entre ambos barridos aún persisten lo cual puede ser motivado por el efecto capacitivo del diseño de los electrodos que fue explicado anteriormente.

De lo antes expuesto se desprenden tres puntos importantes, el primero es que el sistema de medición arroja resultados confiables ya que se pudo reproducir un espectro de impedancia reportado en la bibliografía, el segundo corresponde a que el estado de la superficie de los electrodos de la celda es un factor determinante que se debe cuidar

cuando se realizan las pruebas de impedancia electroquímica y el último es que el diseño de los electrodos incide en gran medida en la disminución de la influencia de elementos parásitos que distorsionan los datos a la hora de efectuar las mediciones.

7.1.2.- Influencia de elementos parásitos en el sistema.

Para llevar a cabo la verificación de la influencia de los elementos parásitos se determinaron diferentes parámetros que de acuerdo a la bibliografía [25] son independientes de la geometría y/o del sistema de medición a emplear y que permiten vislumbrar qué tan importantes son los efectos de la presencia de dichos elementos en el sistema de medición. El primero de estos parámetros es la constante dieléctrica del agua destilada, la cual es una propiedad dependiente de la temperatura e intrínseca del material, por lo tanto el sistema de medición no debería influir sobre los valores de la misma, en el caso de la muestra estudiada, la constante dieléctrica tiene un valor de 80 a una temperatura de 25 °C [37].

Otro parámetro a determinar es a la frecuencia que hace máximo al componente imaginario de la impedancia, la cual debe ser la misma para una muestra en específico y para una celda en particular, todas estas estimaciones se hicieron a partir de los espectros de impedancia obtenidos para cada una de las celdas empleadas en la presente investigación.

Christensen et al.^[33] presentan una expresión que permite calcular la constante dieléctrica de la muestra a partir del arco de impedancia obtenido, la misma tiene la siguiente forma:

$$\varepsilon = \left(2 \cdot \pi \cdot v_{top}\right)^{\left(\frac{2 \cdot \theta}{\pi} - 1\right)} \cdot \left(\frac{L}{R \cdot A \cdot \varepsilon_o}\right) \quad (28)$$

Donde:

ε : Constante dieléctrica del agua (Adim).

- v_{top} : Frecuencia en el punto máximo de la curva (Hz).
- θ : Ángulo de depresión de la curva (rad).
- L : Longitud entre los electrodos (m).
- R : Resistencia de la muestra (Ω).
- A : Área de electrodos (m^2).
- ϵ_o : Permitividad del vacío (8.854×10^{-12} F/m).

El ángulo de depresión de la curva se define como la cantidad de grados que la misma se encuentra rotada por debajo del eje real del diagrama de Nyquist, para el caso de los sistemas estudiados se supone que el mismo tiene un valor de 0, ya que inicialmente en los espectros analizados no se observa ningún tipo de depresión de la curva por debajo de dicho eje real.

En la Tabla N° 4 se presenta un resumen de las dimensiones de las diferentes celdas empleadas en la presente investigación, cuyos valores se usan en la determinación de los parámetros de validación mencionados anteriormente (ver Apéndice C.1).

Tabla N° 4: Dimensiones de las celdas empleadas en esta investigación

<i>Parámetro</i>	<i>Celda #1</i>	<i>Celda #2</i>	<i>Celda #3</i>
Longitud entre los electrodos (m)	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-1}	4.765×10^{-2}
Área de los electrodos (m^2)	5.332×10^{-4}	4.151×10^{-4}	7.854×10^{-5}

Para el caso de la celda #1, se tiene que sustituyendo los datos geométricos de la misma en la ecuación 28 y a partir de los espectros de impedancia mostrados en las figuras N° 25 y N° 27, se puede generar la Tabla N° 5, en la cual se muestra una comparación de las frecuencias de tope del espectro de impedancia y la constante dieléctrica calculada para el agua destilada, así como los errores relativos de este último parámetro con respecto al reportado en la bibliografía.

Tabla N° 5: Valores de los parámetros de validación para la celda #1

Barrido	Resistencia de la muestra, R (kΩ)	Frecuencia de Tope (kHz)	Constante Dieléctrica	Error Relativo (%)
01	315	130	82.3	2.9
02	550	70	87.6	9.5
03	575	70	83.5	4.4

En la tabla anteriormente mostrada se puede evidenciar las diferencias que existen entre el primer barrido (Figura N° 25) y las pruebas posteriores (Figura N° 27), los electrodos fueron lijados entre los barridos 01 y 02, lo que provocó un cambio importante en la frecuencia de tope del espectro. Sin embargo, como puede notarse sólo el barrido 2 presenta un porcentaje de error mayor al 5%, como esta prueba se hizo inmediatamente después de llenar la celda, los resultados pudieron ser influenciados por esto y acarrear más error debido a que no se esperó a que el sistema se estabilizara para iniciar la medición.

A pesar de lo antes discutido se puede concluir que los resultados obtenidos con la celda #1, además de ser confiables ya que permiten reproducir datos que se reportan en la bibliografía, no están influenciados de manera importante por la presencia de elementos parásitos ya que los errores obtenidos para la constante dieléctrica son menores al 10% y entre los barridos 2 y 3 se repitió la frecuencia de tope. Sin embargo, se debe tener en cuenta la existencia de dichos elementos parásitos, los cuales distorsionan los datos experimentales obtenidos con esta celda.

Por otro lado, para la celda #2, se presentan en la Figura N° 28 los espectros de impedancia obtenidos a diferentes tiempos para el agua destilada, observándose la forma semicircular esperada de acuerdo a lo reportado en la bibliografía y que al igual que la celda #1, los barridos presentan distorsiones debido a la presencia de elementos parásitos y por lo tanto los espectros cambian en el tiempo.

Es importante destacar que la celda #2 fue construida como un rediseño de la celda #1, en que se intentaba disminuir la influencia de los elementos parásitos a partir de una modificación en los electrodos y de mejoras en la estructura física de dicha celda a fin de hacerla más fácil de operar y darle mayor estabilidad.

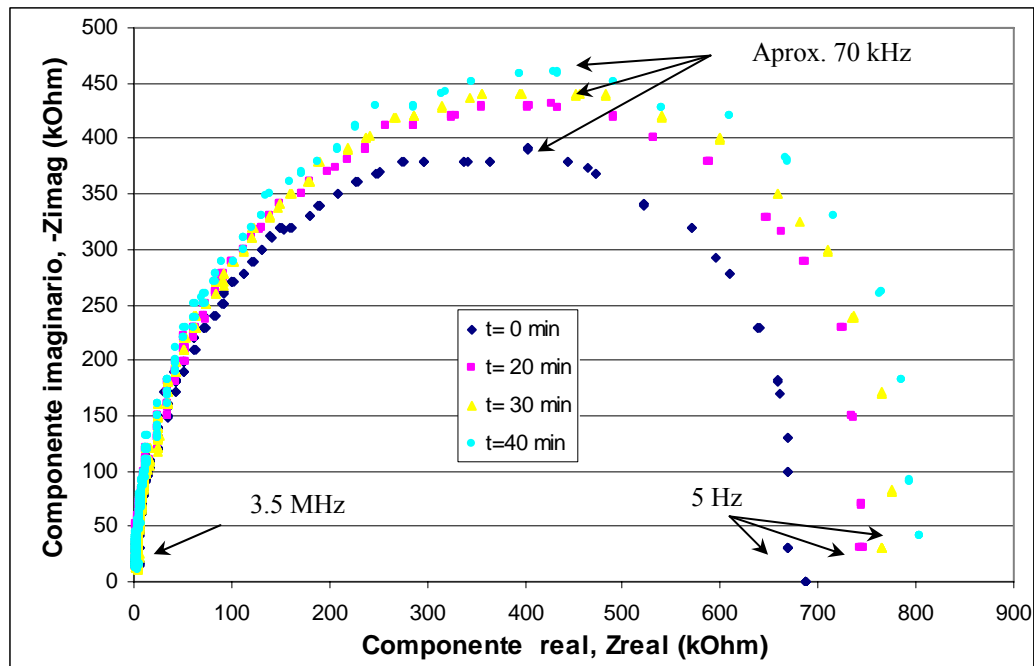


Figura N° 28: Espectros de impedancia para el agua destilada usando la celda #2

Sin embargo, tal y como puede observarse en la figura antes mostrada, persiste pero en menor medida, la influencia de elementos parásitos en la celda estudiada ya que los barridos cambian en el tiempo para una misma muestra. Esto puede estar originado en el diseño de los electrodos, ya que los mismos quedan al aire libre y puede presentarse el problema de la sensibilidad a los cambios externos, el cual fue explicado anteriormente para la celda #1.

De igual manera se presentan en la tabla N° 6 los resultados de la determinación de los parámetros de validación, así como los errores de la constante dieléctrica con respecto a lo reportado en la bibliografía.

Tabla N° 6: Valores de los parámetros de validación para la celda #2

Barrido, t (min)	Resistencia de la muestra, R (kΩ)	Frecuencia de Tope (kHz)	Constante Dieléctrica	Error Relativo (%)
0	675	80	80.2	0.3
20	750	70	82.5	3.1
30	775	70	79.8	0.3
40	815	65	81.7	2.1

Los resultados de los parámetros de validación presentados anteriormente corroboran la suposición de que la influencia de los elementos parásitos es menor en la celda #2 que en la celda #1, esto se puede sustentar en que los errores relativos de la constante dieléctrica experimental son menores al 3.5 % al contrario que para la celda estudiada anteriormente en la que los errores están por debajo del 10 %. De igual manera, se puede observar que la frecuencia que hace máximo al componente imaginario de la impedancia se encuentra en un valor que oscila alrededor de los 70 kHz.

Por otro lado, se presenta en la Figura N° 29 los espectros de impedancia obtenidos para muestras de 120 mL de agua destilada con la celda #3, los cuales representan los resultados de una serie de tres pruebas diferentes (t1, t2, t3) con sus respectivas repeticiones efectuadas a los 10 minutos del primer barrido de impedancia. Cabe destacar que las pruebas realizadas con la celda #3 para obtener los resultados mostrados en la Figura N° 29 fueron realizadas sólo con la mencionada celda, sin incluir los sistemas de calentamiento y presurización, lo cual se hizo de esta manera porque se quería evaluar los efectos de los elementos parásitos en la celda, sin tomar en cuenta los efectos debido a elementos parásitos presentes en el sistema de calentamiento o en el sistema de presurización.

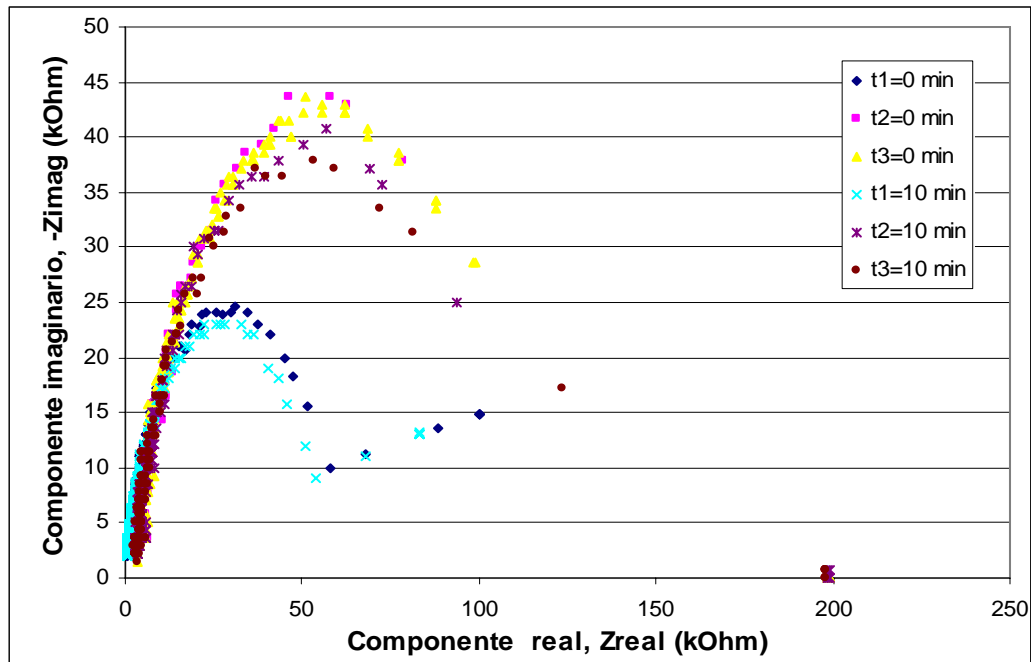


Figura N° 29: Espectros de impedancia para el agua destilada usando la celda #3

Como puede ser observado en la figura anteriormente mostrada, los espectros de impedancia presentan una alta variabilidad, lo cual tiene su origen exclusivamente en problemas en el montaje de la celda en estudio, ya que se pudo observar experimentalmente que dichos espectros mejoraban notablemente cuando se limpiaba la celda y se colocaban recubrimientos a los electrodos que impedían fugas de la muestra en el equipo.

De esta manera, en la Figura N° 30 se presentan los espectros de impedancia para el agua destilada empleando la celda #3 y aplicando los procedimientos correctivos necesarios para el montaje óptimo de la celda. En la mencionada figura, se muestran los resultados de diferentes pruebas realizadas bajo las mismas condiciones que las presentadas anteriormente. En la figura se puede observar una clara mejoría en los espectros obtenidos para el agua destilada, lo cual es producto de la aplicación de los diferentes procedimientos correctivos mencionados anteriormente.

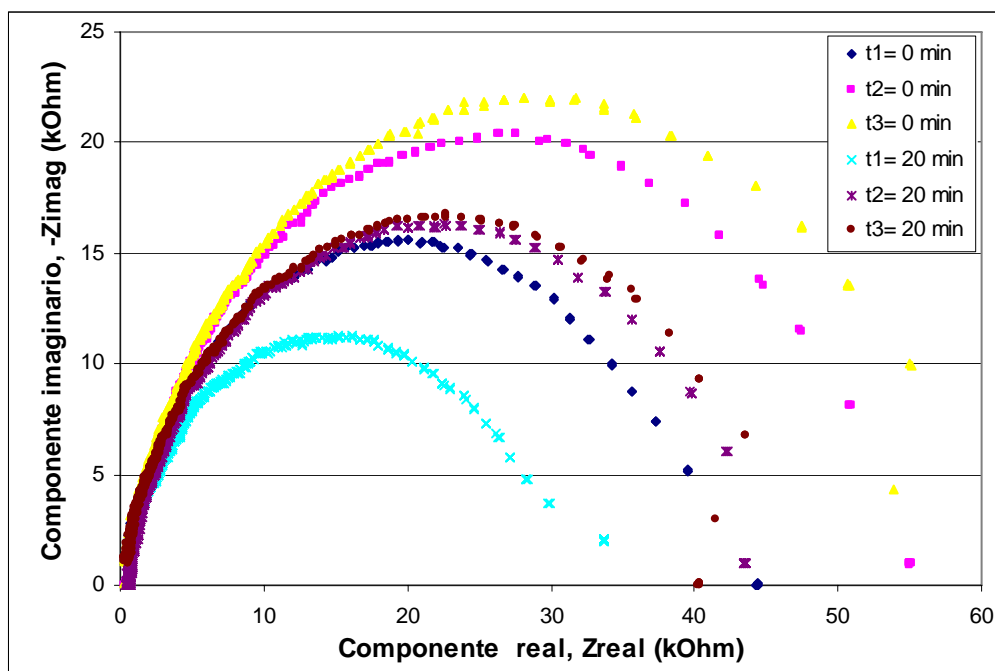


Figura N° 30: Espectros de impedancia para el agua destilada usando la celda #3, luego de usar procedimientos correctivos.

Como puede observarse en la figura anteriormente mostrada, al igual que para las celdas #1 y #2, se presenta el problema de la variabilidad de los espectros de impedancia, lo cual en este caso se debe a efectos parásitos inductivos que tiene esta celda, lo cual se puede apreciar en el hecho de que para cada serie de barridos se tiene que al arco correspondiente al barrido a 20 min es más pequeño que el que se obtuvo para el barrido a 0 min, caso contrario a lo sucedido para las celdas estudiadas anteriormente.

Es importante mencionar que este comportamiento se debe al diseño de la celda, por lo cual se fijó como metodología de trabajo iniciar la medición a un tiempo de 5 minutos luego de agregar la muestra a la celda, esto se hizo con la finalidad de obtener repetibilidad en las mediciones. Sin embargo, es importante notar que los procedimientos correctivos mejoraron la estructura de los barridos, lo cual permite continuar con la investigación ya que a pesar de que existen los errores, el sistema puede reproducir el comportamiento de la muestra.

En la Figura N° 31 se presentan los resultados de los espectros de impedancia para el agua destilada, fijando como metodología iniciar los barridos 5 minutos después de agregada la muestra.

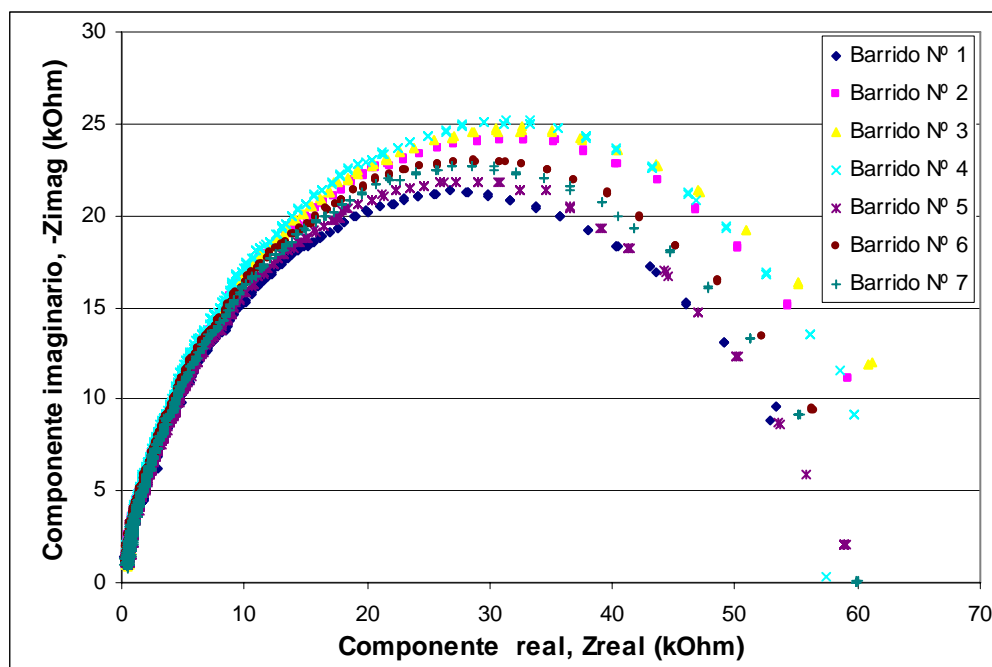


Figura N° 31: Espectros de impedancia para el agua destilada 5 minutos después de agregada la muestra, usando la celda #3.

En la figura antes mostrada se puede observar la alta repetibilidad que se obtuvo en los espectros de impedancia para el agua destilada empleando la metodología planteada anteriormente. Es importante notar que las diferencias fundamentales se presentan en la zona de baja frecuencia, lo cual puede ser originado por limitaciones del equipo ya que los barridos se iniciaron en 5 Hz, la cual es la menor frecuencia que puede generar el HP-4192A. En tal sentido, se concluye que los barridos para el cemento se iniciarán luego de 5 minutos de agregada la muestra a la celda a fin de lograr repetibilidad en las mediciones.

En la Tabla N° 7 se presentan los resultados obtenidos para los parámetros de validación para la celda a partir de los barridos mostrados en la Figura N° 31.

Tabla N° 7: Valores de los parámetros de validación para la celda #3

Barrido	Resistencia de la muestra, R (kΩ)	Frecuencia de Tope (kHz)	Constante Dieléctrica	Error Relativo (%)
01	60	105	3641	-----
02	65	95	3755	-----
03	70	72	4560	-----
04	65	105	3360	-----
05	60	110	3457	-----
06	65	83	4256	-----
07	60	100	3841	-----

Es importante mencionar que a pesar de que los barridos presentan gran repetibilidad y que la resistencia de la muestra oscila alrededor de un valor de 65 kΩ, se pueden ver variaciones importantes en la frecuencia de tope, sin embargo en la mayoría de los barridos se puede observar que la misma se encuentra por el orden de los 100 kΩ.

Por otro lado, se puede apreciar que los valores de la constante dieléctrica de la muestra calculados a partir de los datos de los diferentes barridos de frecuencia realizados, superan el 100 % de error sobre el valor teórico. Esto se debe fundamentalmente a la geometría del sistema, lo cual puede ser observado en la ecuación 28 ^[33], ya que la misma asume que el área de transferencia de carga es constante, por lo tanto emplea un factor geométrico definido como la relación entre la longitud de separación de los electrodos y el área transversal de flujo de carga. Sin embargo, esto último sólo es posible cuando se tiene una celda en la que el área transversal de la muestra es igual al área de los electrodos (celdas #1 y #2), por lo contrario en el caso de la celda #3 se tiene que el área de transferencia de carga no es constante, sino que varía en dos dimensiones (longitudinal y axial), por lo cual es evidente que los valores de la constante dieléctrica calculados a partir de la ecuación 28 no se corresponden con la realidad.

En vista de esta situación, se buscó una manera de calcular un factor de corrección que permita determinar los valores de la constante dieléctrica a partir de los datos obtenidos con la celda #3, para ello se pensó en emplear una constante que permita obtener un área de flujo de carga equivalente que suprima el efecto de la geometría de esta celda. Para ello se presenta en la Tabla N° 8 los valores del diámetro de los electrodos requeridos para que la constante dieléctrica calculada se corresponda con la reportada en la bibliografía.

Tabla N° 8: Valores de los diámetros de celda requeridos para obtener una constante dieléctrica acorde a lo reportado en la bibliografía.

Barrido	Diámetro de electrodos (mm)	Área equivalente de electrodos (m²)	Constante Dieléctrica	Error Relativo (%)
01	67.0	3.53x10 ⁻³	81.1	1.4
02	68.0	3.63x10 ⁻³	81.2	1.5
03	75.0	4.42x10 ⁻³	81.1	1.3
04	65.0	3.32x10 ⁻³	79.5	0.6
05	65.0	3.32x10 ⁻³	81.8	2.3
06	73.0	4.19x10 ⁻³	79.9	0.2
07	69.0	3.74x10 ⁻³	80.7	0.9
Promedios	68.9 ± 3.8	3.72x10 ⁻³ ± 4.22x10 ⁻⁴	80.8 ± 0.8	1.2 ± 0.7

Suponiendo que el factor de corrección geométrica que se desea calcular, es una constante que multiplica al área de los electrodos, el mismo se puede determinar a partir de la siguiente ecuación:

$$A_{equivalente} = F * A_{real} \quad (29)$$

Donde:

$A_{equivalente}$: Área equivalente, (m²).

F : Factor de corrección geométrica calculado, (Adim).

A_{real} : Área real del electrodo, (7.85x10⁻⁵ m²).

De la aplicación de la ecuación 29, se desprende que el valor del factor de corrección es de 47.4 (ver Apéndice C.2), lo cual es producto de estimar un diámetro equivalente de electrodos aproximadamente 7 veces mayor que el diámetro real.

Por otro lado, a fin de verificar lo anteriormente calculado, se procedió a la determinación de este factor de corrección a través de otra vía que permita discernir si los problemas en el cálculo de la constante dieléctrica del agua se deben sólo al problema de la geometría variable o existe una fuerte influencia por parte de la presencia de elementos parásitos en la celda en estudio.

La vía propuesta en la presente investigación para el cálculo del factor de corrección geométrico, corresponde a la determinación de la resistividad de diferentes soluciones de Cloruro de Sodio a distintas concentraciones, y su posterior comparación con datos obtenidos teóricamente^[38]. Esta propiedad del material se puede determinar a partir del diagrama de Nyquist para la solución en estudio y mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$R_v = \frac{R_b}{\left(\frac{L}{A}\right)} \quad (30)$$

Donde:

R_v : Resistividad de la solución, (Ω -m).

R_b : Resistencia real del sistema, (Ω).

En la Figura N° 32 se presentan los espectros de impedancia para soluciones de Cloruro de Sodio a 1000 y 2000 ppm, obteniéndose en los mismos la forma esperada del espectro para este tipo de muestras. De igual manera, se puede apreciar en dicha figura los valores de resistencia real de la solución, los cuales corresponden al mínimo de cada curva.

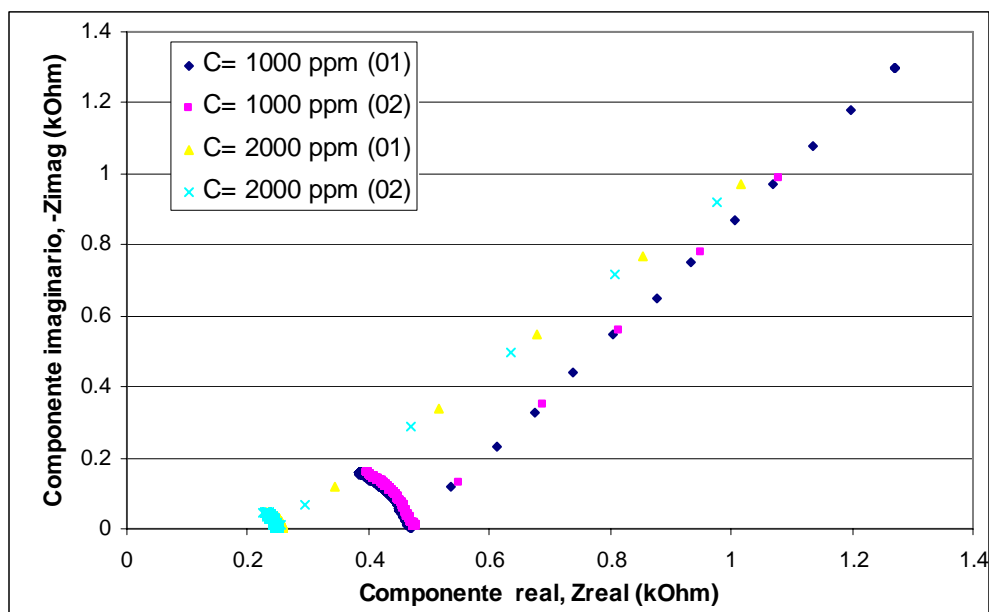


Figura N° 32: Espectros de impedancia para soluciones de Cloruro de Sodio a bajas concentraciones usando la celda #3.

De igual manera se presenta en la Figura N° 33, los espectros de impedancia para soluciones de Cloruro de sodio a 5000 y 10000 ppm.

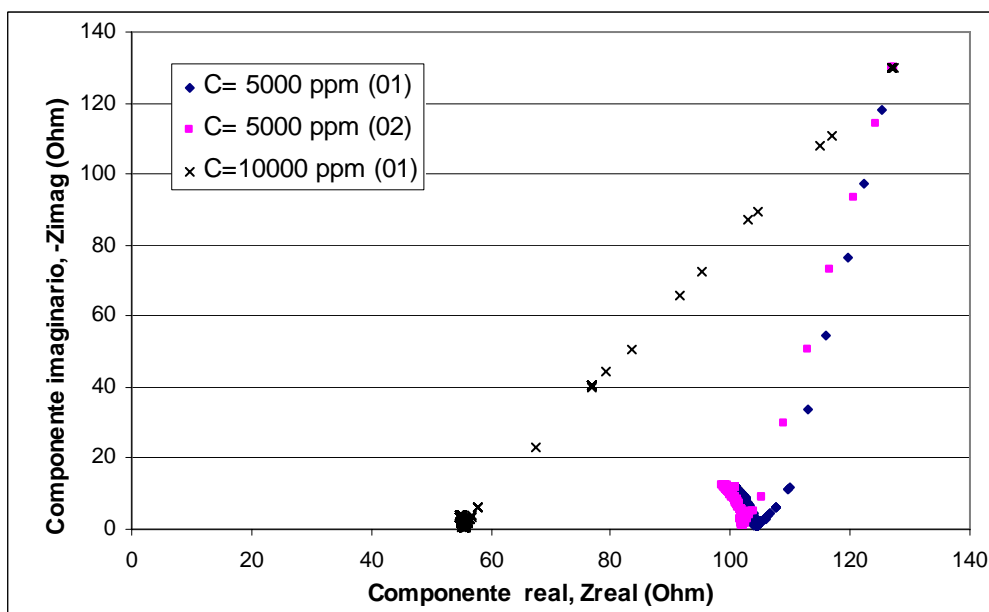


Figura N° 33: Espectros de impedancia para soluciones de Cloruro de Sodio a altas concentraciones usando la celda #3.

Nótese en las figuras anteriores cómo cambia la resistencia de la muestra con la concentración de Cloruro de Sodio, lo cual se corresponde con lo esperado ya que a

mayor cantidad de iones disueltos en la solución, la conductividad eléctrica de la misma aumentará y por lo tanto su resistencia al paso de corriente será menor.

A partir de los datos obtenidos de las figuras N° 32 y N° 33, de resistividades para estas soluciones reportadas en la bibliografía ^[38] y de la aplicación de las ecuaciones 29 y 30 (ver Apéndice C.3), se pueden determinar los valores de área equivalente para el cálculo del factor de corrección geométrico. En la Tabla N° 9, se presenta la información necesaria para el cálculo de dicho factor de corrección.

Tabla N° 9: Valores requeridos para el cálculo del factor de corrección geométrico a partir de las resistividades de soluciones de Cloruro de Sodio a diferentes concentraciones.

Barrido	Resistencia Real (Ω)	Resistividad Teórica ($\Omega\cdot m$)	Área equivalente de electrodos (m^2)	Factor Geométrico (Adim)
1000 ppm (01)	468.8	5.40	5.49×10^{-4}	7.0
1000 ppm (02)	474.6	5.40	5.42×10^{-4}	6.9
2000 ppm (01)	255.3	2.75	5.13×10^{-4}	6.5
2000 ppm (02)	247.8	2.75	5.29×10^{-4}	6.7
5000 ppm (01)	104.3	1.15	5.25×10^{-4}	6.7
5000 ppm (02)	102.3	1.15	5.36×10^{-4}	6.8
10000 ppm (01)	55.5	0.75	6.44×10^{-4}	8.2
Promedios	-----	-----	$5.49 \times 10^{-4} \pm 4.37 \times 10^{-5}$	7.0 ± 0.6

De lo anteriormente mostrado se desprende que el factor geométrico calculado por la vía de las resistividades (7.0) es aproximadamente 7 veces menor al calculado por la vía de la constante dieléctrica (47.4), lo cual es un indicativo de que la desviaciones en los valores obtenidos con la celda #3 no sólo se deben a una geometría variable sino que también a efectos de elementos parásitos presentes en este diseño. Esto permite concluir que la influencia de elementos no deseados en esta celda es muy importante, por lo cual se deben orientar los esfuerzos al intento de modelar dichos elementos parásitos o a cambiar el diseño de la mencionada celda.

En este punto, es importante recordar que los datos presentados para la celda #3 sólo corresponden a la celda, sin incluir los efectos por el sistema de calentamiento y de presurización, es por ello que en la Figura N° 34 se presentan los espectros de impedancia para el agua destilada con todo el sistema de medición montado, incluyendo el sistema de calentamiento y el de presurización.

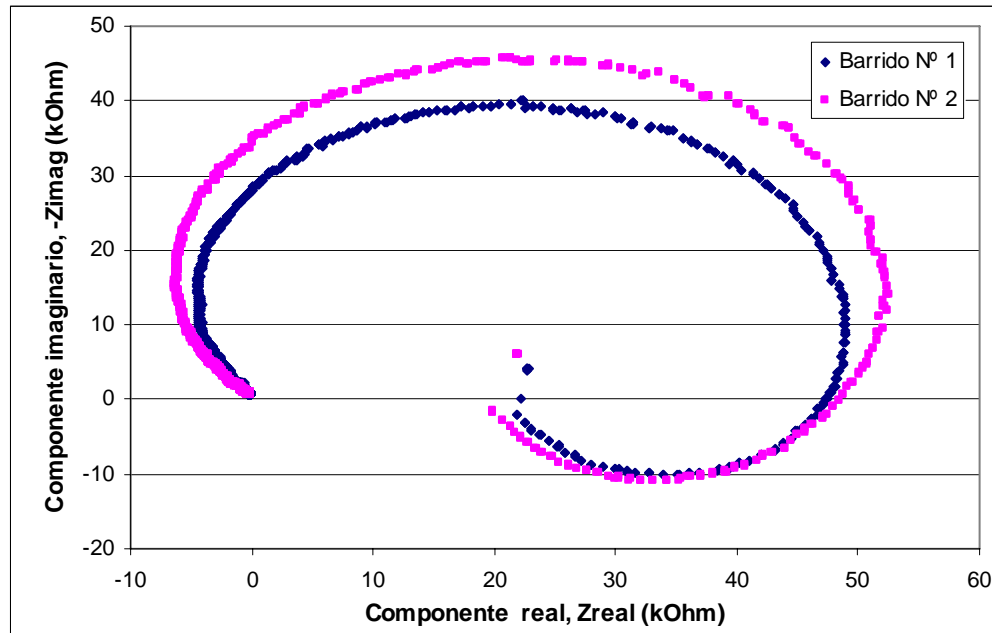


Figura N° 34: Espectros de impedancia para agua destilada usando la celda #3 con el sistema de calentamiento y de presurización montado.

Como puede observarse en la figura anteriormente mostrada, el efecto de la presencia de los componentes parásitos sobre los espectros de impedancia con todo el sistema de medición montado es muy importante. Si se compara la Figura N° 34 con la N° 31, se puede apreciar claramente la distorsión que sufren los espectros de impedancia debido a la presencia del sistema de calentamiento y del sistema de presurización, lo cual es perfectamente explicable por el hecho de que en este diseño, la muestra no está completamente aislada del cuerpo de la celda, por lo tanto, al adicionar elementos al sistema, tales como manta de calentamiento, tuberías para presurización y sensor de temperatura se aumenta la incidencia de flujos de carga sobre la muestra lo cual distorsiona la señal recibida por los electrodos.

En el caso de la figura 34 se puede apreciar la presencia de un efecto inductivo que es lo que hace que el espectro tenga valores negativos en la zona de baja frecuencia, esto se puede corroborar mediante el modelado del sistema con circuitos equivalentes. En este sentido se presenta en la Figura N° 35 un modelo de circuito equivalente cuyo comportamiento de impedancia se asemeja al de la Figura N° 34, sin embargo es importante destacar que existen muchas combinaciones de elementos de circuito que pueden dar este mismo comportamiento por lo que esta vía para cuantificar elementos parásitos puede ser muy engorrosa y poco efectiva.

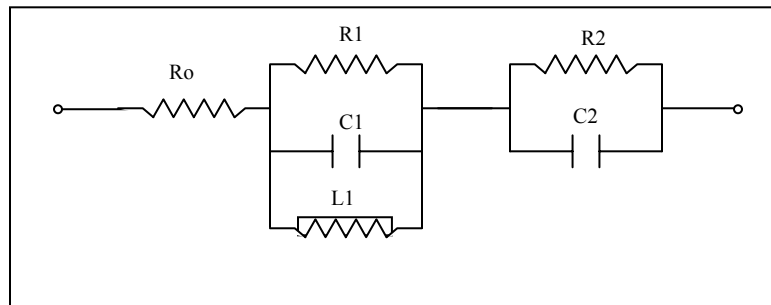


Figura N° 35: Circuito equivalente para modelar elementos parásitos presentes en el sistema de medición.

En la figura anteriormente mostrada se puede apreciar la inclusión del inductor L_1 al circuito equivalente con el cual se puede simular el efecto del sistema de calentamiento, sin embargo como se puede ver en la Figura N° 36, el mencionado circuito no se aproxima con suficiente precisión al comportamiento mostrado por la celda #3, esto es fundamentalmente a que las distorsiones no sólo se deben a la presencia de inductancias parásitas sino que hay otros elementos de circuito que influyen en las mencionadas distorsiones.

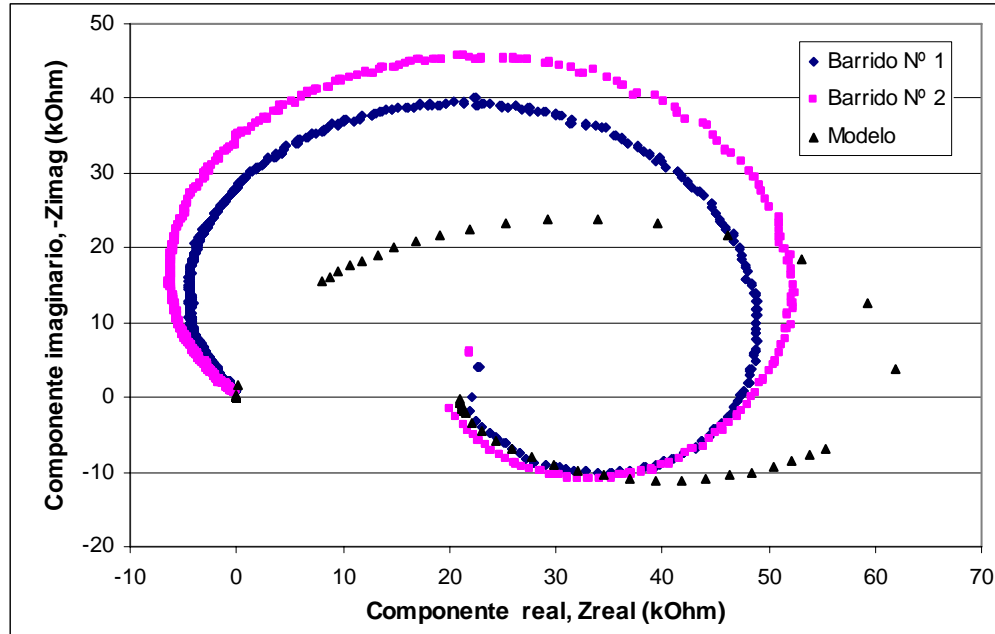


Figura N° 36: Comparación entre los espectros de impedancia para el agua destilada obtenidos mediante el sistema de medición y el circuito equivalente de la Figura N° 34

A pesar de que no se obtuvo un modelo de circuito equivalente que simulara razonablemente el comportamiento del sistema de medición como es el caso de la Figura N° 36, se continuó con las mediciones de impedancia en esta celda, usando el modelo de circuito equivalente propuesto en la revisión bibliográfica (Figura N° 18) debido a razones que se explicarán más adelante en la sección de pruebas de impedancia electroquímica.

7.2.- Preparación de los sistemas.

Para llevar a cabo la presente investigación se estudiaron 6 sistemas diferentes, de los cuales 2 son blancos, los cuales están constituidos sólo por cemento y agua, además de 4 formulaciones adicionales de dos compañías de servicio distintas. Como se mencionó en la metodología experimental, la preparación de dichos sistemas se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones prácticas API RP10B ^[13].

En la Tabla N° 10 se presenta la composición porcentual de los blancos utilizados en la presente investigación.

Tabla N° 10: Composición de los blancos utilizados en la presente investigación

Blanco	Componente	Masa (g)	Composición (% p/p)
A	Cemento clase B	772	68.5
	Agua	355	31.5
B	Cemento clase G	792	69.4
	Agua	349	30.6

En la Tabla N° 11 se presenta la composición porcentual del sistema A utilizado en la presente investigación, el cual pertenece a la compañía de servicios N° 1.

Tabla N° 11: Composición del sistema A utilizado en la presente investigación

Sistema	Componente	Masa (g)	Composición (% p/p)
A	Cemento B	615.32	58.9
	Acelerador A	3.69	0.4
	Antimigratorio A	4.92	0.5
	Dispersante A	1.85	0.2
	Control de filtrado A	4.61	0.4
	Extendedor A	24.61	2.4
	Controlador de gas A	31.63	3.0
	Antiespumante A	0.54	0.1
	Agua	357.24	34.2

De igual manera se presenta en la Tabla N° 12 las composiciones de los sistemas B, C y D pertenecientes a la compañía de servicios N° 2.

Tabla N° 12: Composición de los sistemas B, C y D utilizados en la presente investigación

Sistema	Componente	Masa (g)	Composición (% p/p)
B	Cemento B	640.48	61.3
	Antimigratorio B	85.14	8.2
	Antiespumante B	2.84	0.3
	Aditivo multifuncional	1.10	0.1
	Controlador de gas B	28.38	2.7
	Acelerador B	27.81	2.6
	Agua	258.67	24.8
C	Cemento Aditivado	523.11	66.2
	Controlador de gas C	1.31	0.2
	Aditivo trifuncional	0.42	0.1
	Antiespumante B	2.18	0.3
	Controlador de gas C	3.70	0.5
	Controlador de gas D	44.53	5.6
	Retardador A	7.07	0.9
	Agua	208.12	26.3
D	Cemento G	535.27	55.0
	Antimigratorio B	71.15	7.3
	Antiespumante B	2.37	0.2
	Controlador de gas B	23.72	2.4
	Acelerador B	26.56	2.7
	Agua	313.32	32.2

7.3.- Caracterización de los sistemas.

En la Tabla N° 13 se presentan los resultados de la caracterización física de los blancos utilizados en esta investigación.

Tabla N° 13: Propiedades físicas de los blancos utilizados en esta investigación.

Sistema	Propiedad física	Condición / Unidades	Valor
Blanco A	Densidad	lb/gal	15.9
	Fluido Libre	% p/p	0.11
	Volumen de Filtrado	mL	-----
	Tiempo de Espesamiento	Min	90
	Resistencia a la Compresión	8 h/100 °F (psi)	756
	Resistencia a la Compresión	24 h/100 °F (psi)	2926
Blanco B	Densidad	lb/gal	15.9
	Fluido Libre	% p/p	3.42
	Volumen de Filtrado	mL	-----
	Tiempo de Espesamiento	Min	100
	Resistencia a la Compresión	8 h /100°F (psi)	611
	Resistencia a la Compresión	8 h /140°F (psi)	2035

En líneas generales, tal y como se puede apreciar en la tabla anteriormente mostrada, las propiedades físicas de los blancos A y B cumplen en su totalidad con los requerimientos mínimos establecidos por la normativa API ^[13].

De igual manera, se presenta en la Tabla N° 14 los resultados de la caracterización física de los sistemas cementantes antimigratorios utilizados en la presente investigación.

Tabla N° 14: Propiedades físicas de los sistemas utilizados en esta investigación.

Sistema	Propiedad física	Condición / Unidades	Valor
Sistema A	Densidad	lb/gal	14.5
	Fluido Libre	g	0
	Volumen de Filtrado	mL	47
	Tiempo de Espesamiento	h:min	3:15
	Resistencia a la Compresión	24 h (psi)	2103
Sistema B	Densidad	lb/gal	14.5
	Fluido Libre	g	0
	Volumen de Filtrado	mL	16
	Tiempo de Espesamiento	h:min	4:00
	Resistencia a la Compresión	24 h (psi)	1308
Sistema C	Densidad	lb/gal	11.0
	Fluido Libre	g	0
	Volumen de Filtrado	mL	15
	Tiempo de Espesamiento	h:min	4:00
	Resistencia a la Compresión	6 h (psi)	500
	Resistencia a la Compresión	24 h (psi)	1422
Sistema D	Densidad	lb/gal	13.5
	Fluido Libre	g	0
	Volumen de Filtrado	mL	30
	Tiempo de Espesamiento	h:min	5:05
	Resistencia a la Compresión	24 h (psi)	2126

7.3.1.- Densidad.

Nótese para el caso de los blancos A y B que la densidad de las lechadas preparadas tienen el mismo valor (15.9), el cual se encuentra en el rango establecido por la API ^[13] (15.7 lb/gal para cemento B y 15.9 lb/gal para cemento G) para el control de calidad para este tipo de cemento. Por otro lado se puede observar que las densidades de los sistemas antimigratorios empleados son variables, lo cual es sólo función de los

requerimientos del pozo, en este caso es importante mencionar el uso del sistema C, el cual se considera de baja densidad (< 12 lb/gal), esto con la finalidad de evaluar como se comportan las pruebas de impedancia electroquímica en este tipo de sistemas cementantes.

7.3.2.- Fluido libre.

Para el caso de los blancos A (0.11 %) y B (3.42 %) se pudo constatar que se cumplió con los requerimientos mínimos establecidos por la API ^[13] (no requiere para el cemento B y menor al 5.9 % para el cemento G), de igual manera se obtuvo para los sistemas antimigratorios un valor de 0 mL, lo cual es apropiado y cumple con la normativa API.

7.3.3.- Volumen de filtrado.

Los valores de esta propiedad para el caso de los sistemas antimigratorios estudiados (menores a 50 mL) se ajustaron a las normativas API ^[13], en las cuales se toma un valor máximo de 100 mL/30 min para lechadas de cemento empleadas en pozos petroleros con problemas de migración de fluidos.

7.3.4.- Tiempo de espesamiento.

Se determinó que los blancos estudiados cumplen con los requerimientos mínimos establecidos por la API ^[13] para esta propiedad. De este modo, se obtuvo para el blanco A un tiempo de espesamiento de 90 min igual al tiempo mínimo requerido por la norma, y para el blanco B un tiempo de 100 min el cual es menor al tiempo máximo (120 min) establecido por dicha norma. En el caso de los sistemas estudiados se obtuvo que esta propiedad varía respecto a la formulación, lo cual es función de los requerimientos del pozo.

7.3.5.- Resistencia a la compresión.

Para el caso de los blancos A y B se determinó que los mismos cumplen con los requerimientos establecidos por la normativa API ^[13] para los diferentes ensayos de resistencia a la compresión que se reportan en la Tabla N° 13. Por otro lado, los sistemas cementantes antimigratorios muestran valores de resistencia a la compresión variables que dependen de la formulación del sistema y de los aditivos agregados.

7.4.- Medición de fuerza de gel estática.

Esta propiedad fue cuantificada en el MINIMACS para los diferentes sistemas utilizados en la presente investigación. Este equipo es capaz de medir dos propiedades diferentes de las lechadas de cemento, una de ellas es el tiempo de espesamiento, la cual es determinada bajo las mismas condiciones que en un consistómetro presurizado; y la otra corresponde al desarrollo de la fuerza de gel estática, la cual es cuantificada como la resistencia que ejerce la lechada a la rotación de una paleta especial que gira a 0.2 °/min, bajo una metodología descrita en el Apéndice D.1. Estas pruebas se hacen por triplicado para verificar la repetibilidad de los resultados y las gráficas comparativas de dichas repeticiones se presentan en el Apéndice E.

7.4.1.- Blanco A.

En la Figura N° 37 se presenta el desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco A estudiado en la presente investigación. Esta prueba se realizó a 77 °F y 14.7 psi y en la misma se puede observar que el tiempo de transición (tiempo que transcurre entre 100 y 500 lbf/100 pie²) fue de 45 minutos para esta muestra. De igual manera es importante destacar que el desarrollo de geles presentado por este blanco fue uniforme a lo largo del periodo de tiempo en que duró la prueba. Otro parámetro importante que se puede cuantificar con estas pruebas es el tiempo de cero gel, el cual corresponde al lapso de tiempo que transcurre entre 0 y 100 lbf/100 pie², el cual físicamente corresponde al

lapso en que la lechada permanece completamente fluida en condiciones estáticas, para el caso del blanco estudiado, este tiempo correspondió a 12 minutos.

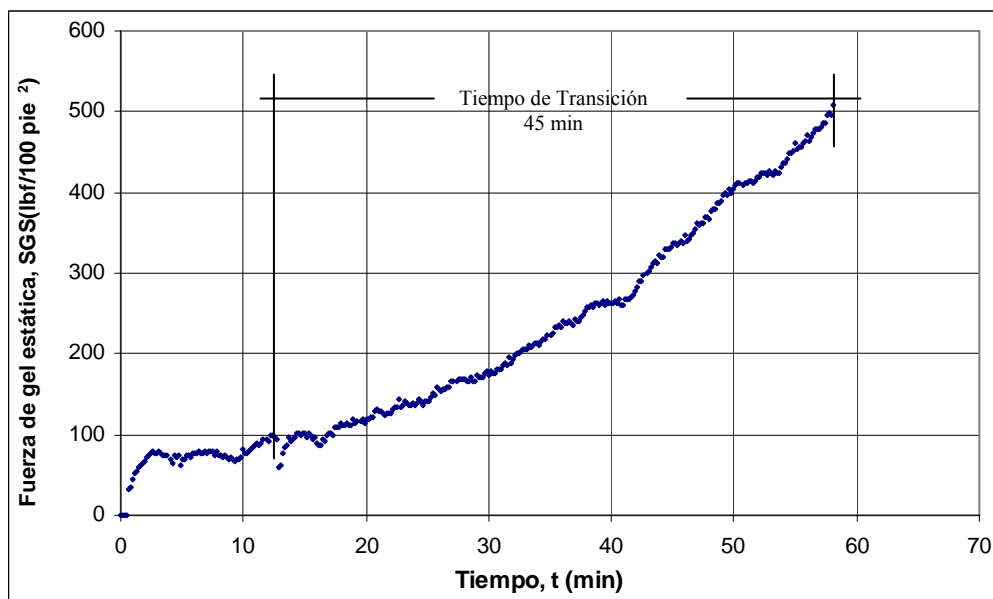


Figura N° 37: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco A (77 °F y 14.7 psi)

De igual manera se presenta en la Figura N° 38 la gráfica del desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco A, evaluado a 100 °F y 1000 psi.

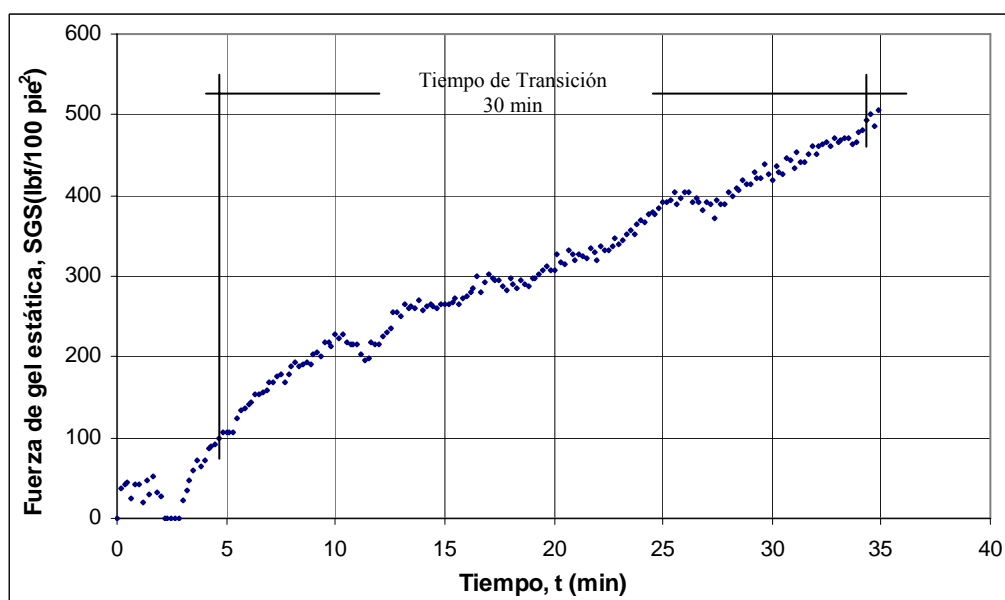


Figura N° 38: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco A (100 °F y 1000 psi)

Como puede observarse en la Figura N° 38 el tiempo de transición para el blanco A resultó ser de 30 minutos lo cual es un valor menor a los 45 minutos mostrados por el mismo blanco a menor temperatura, esto tiene su origen en que la temperatura cataliza las reacciones de hidratación que ocurren en la lechada, por lo tanto la formación de geles se acelera gracias al aumento de la temperatura ^[39]. De igual manera se tiene que el tiempo de cero gel para esta muestra fue de 4 minutos. Nótese que al igual que la Figura N° 37, el desarrollo de los geles tuvo un comportamiento uniforme a lo largo de la prueba, lo cual es un comportamiento característico de este blanco.

Por otro lado, se presenta en la Figura N° 39 el desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco A, determinado a 150 °F y 1000 psi.

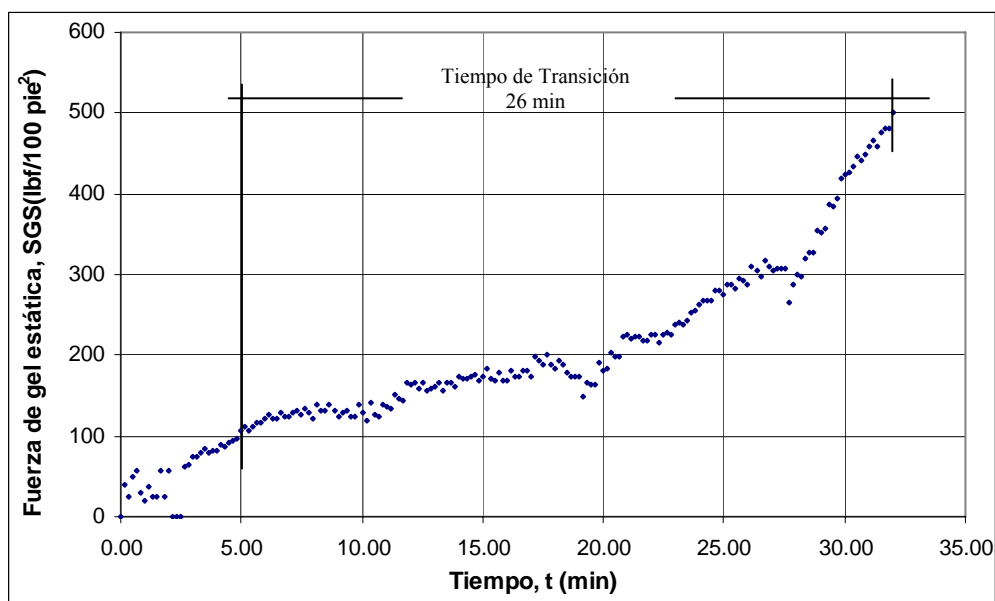


Figura N° 39: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco A (150 °F y 1000 psi)

En la figura anteriormente mostrada se puede apreciar el efecto en la temperatura en el sistema cementante, expuesto anteriormente, ya que el tiempo de transición fue de 26 minutos para las condiciones mencionadas en la Figura N° 39 y el mismo es menor que el reportado para la misma muestra a 100 °F. Por otro lado, se obtuvo que el tiempo de cero gel a estas condiciones fue de 5 minutos.

De igual manera se presenta en la Figura N° 40 el desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco A, determinado a 200 °F y 1000 psi.

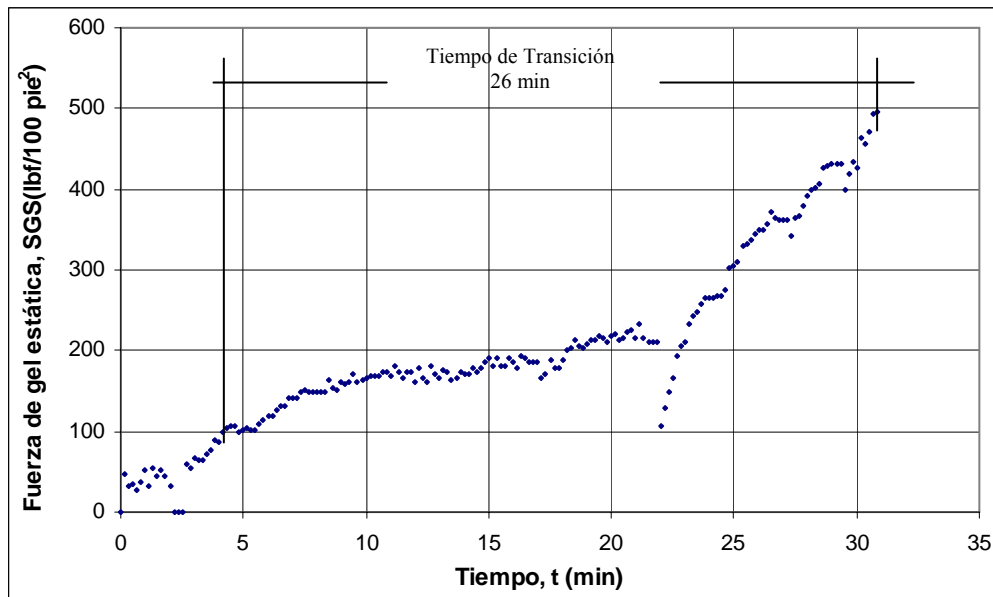


Figura N° 40: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco A (200 °F y 1000 psi)

Como se puede apreciar en la figura anteriormente mostrada, el tiempo de transición para el blanco A medido a las condiciones mencionadas fue de 26 min, con un tiempo de cero gel de 4 minutos. Es importante mencionar algunas anomalías presentes en la gráfica mostrada, en la que se puede ver algunas caídas en el valor de las mediciones de fuerza de gel, lo cual se debe a problemas de diseño del equipo ^[31,35], ya que las vibraciones producidas por el sistema de presurización provocan dichas caídas.

7.4.2.- Blanco B.

Por otro lado, se presenta en la Figura N° 41 la gráfica del desarrollo de fuerza de gel para el blanco B, determinado a 77 °F y 14.7 psi.

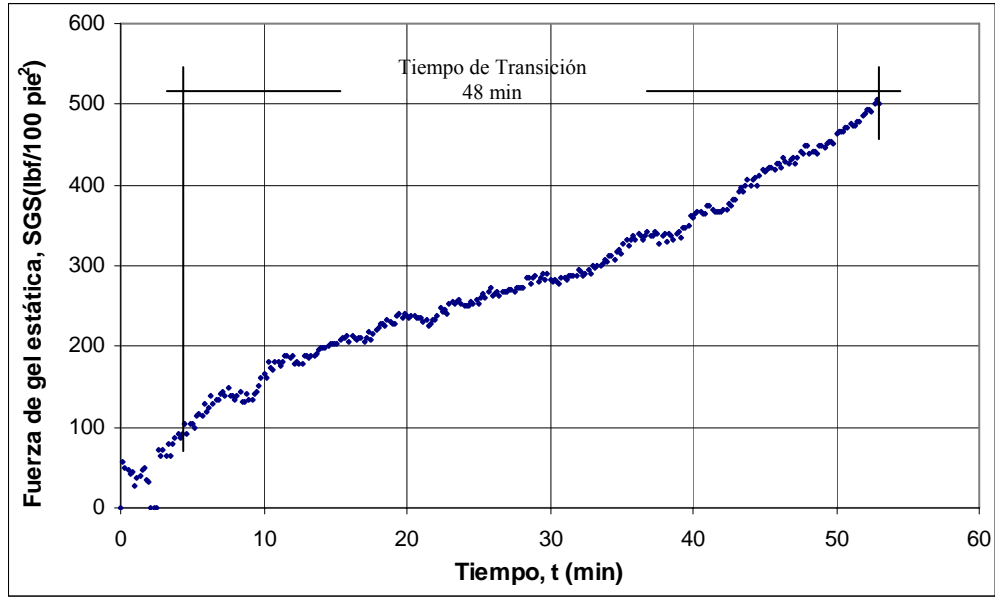


Figura N° 41: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco B (77 °F y 14.7 psi)

Al igual que el blanco A, se obtuvo para el blanco B un desarrollo de fuerza de gel uniforme a lo largo del tiempo de la prueba, lo cual parece ser un comportamiento característico de las lechadas compuestas sólo con cemento y agua. De igual manera se obtuvo que el tiempo de transición para la muestra estudiada a las condiciones mencionadas fue de 48 minutos, siendo este muy parecido al que se obtuvo para el blanco A (45 minutos) a las mismas condiciones de presión y temperatura, además de un tiempo de cero gel igual a 4 minutos.

Por otro lado, se presenta en la Figura N° 42 la gráfica del desarrollo de fuerza de gel estática para el blanco B a 150 °F y 1000 psi. Como se puede apreciar en la mencionada figura, la prueba no dio buenos resultados debido a problemas de vibraciones en el sistema de presurización, los cuales fueron mencionados anteriormente. En este caso se esperaba que el tiempo de transición fuese menor al reportado para la prueba mostrada en la Figura N° 41, sin embargo, el mismo no se logró cuantificar.

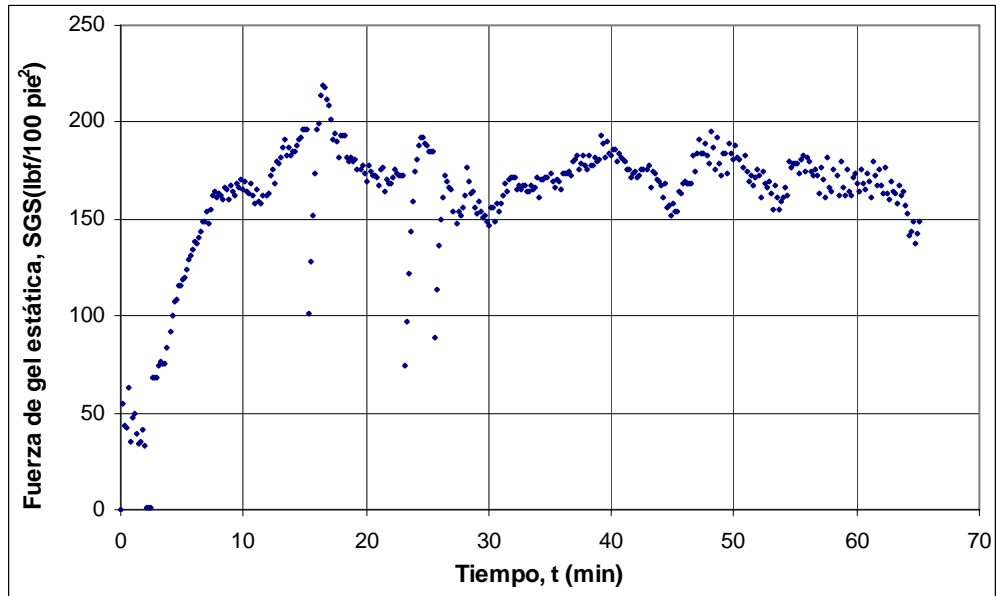


Figura N° 42: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco B (150 °F y 1000 psi)

En la Figura N° 43 se presenta el desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco B, medido a 250 °F y 1000 psi.

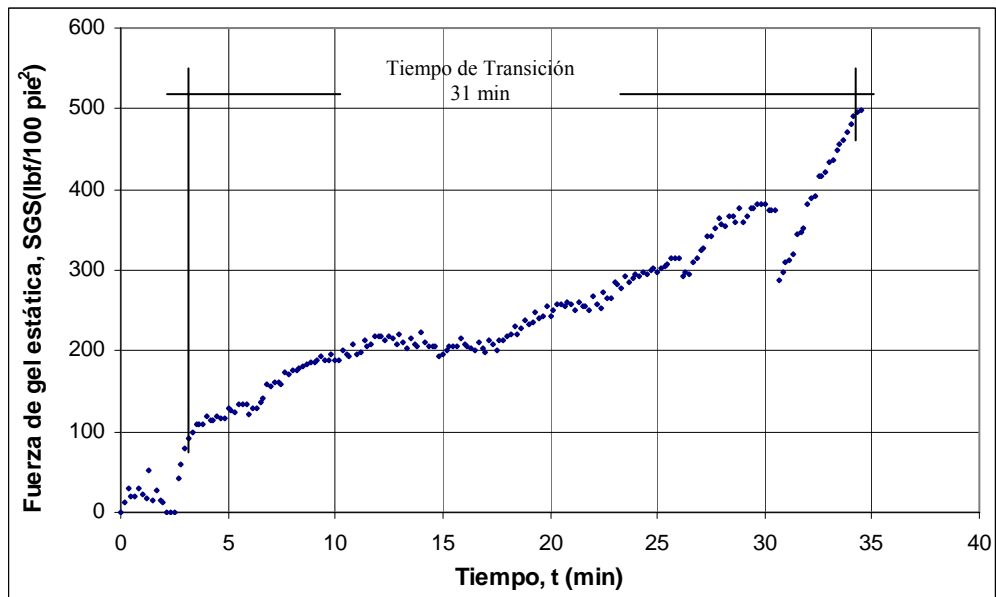


Figura N° 43: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el blanco B (250 °F y 1000 psi)

Como puede ser apreciado en la figura anteriormente mostrada, el tiempo de transición del blanco B a las condiciones mencionadas fue considerablemente menor que el obtenido para la misma muestra a 77 °F, lo cual se corresponde con lo esperado, de igual manera se obtuvo un tiempo de cero gel igual a 3 minutos.

7.4.3.- Sistema A.

En el caso del sistema A, se hizo el mismo estudio sobre el cambio en el desarrollo de la fuerza de gel estática a tres temperaturas distintas, obteniéndose un comportamiento parecido al mostrado por los blancos estudiados anteriormente.

En la Figura N° 44 se muestra una comparación de las curvas de desarrollo de la fuerza de gel estática obtenidas a 100, 140 y 200 °F, con una presión de 1000 psi para el sistema A.

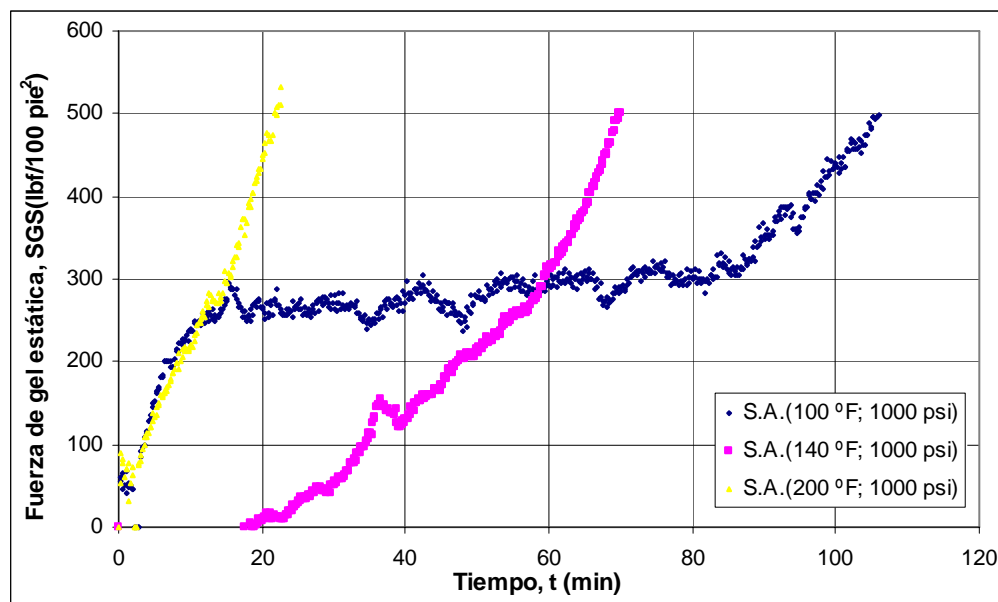


Figura N° 44: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el sistema A

En la figura antes mostrada se puede observar que el desarrollo de la fuerza de gel estática para el sistema A cumple con el comportamiento esperado, de acuerdo a lo explicado anteriormente ya que el aumento de temperatura en las pruebas disminuyó el

tiempo de transición del sistema, en este sentido, se presenta en la Tabla N° 15 un sumario de los parámetros obtenidos en las diferentes pruebas realizadas para este sistema.

Tabla N° 15: Parámetros obtenidos a partir del desarrollo de fuerza de gel estática para el sistema A, medido a diferentes temperaturas

Temperatura (°F)	Tiempo de transición (min)	Tiempo de cero gel (min)
100	102	3
140	35	35
200	18	3

Nótese el cambio notable en el tiempo de transición que presenta este sistema con el aumento de temperatura, lo cual es producto de que la velocidad de las reacciones de hidratación que se llevan a cabo en la lechada de cemento es función de la temperatura a la que se encuentra el sistema.

7.4.4.- Sistema B.

En la Figura N° 45 se presenta la curva del desarrollo de la fuerza de gel estática para el sistema B, la cual fue obtenida a 115 °F y 1000 psi. En la mencionada figura, se puede observar un tiempo de transición muy corto, el cual fue de 10 minutos, así como un tiempo de cero gel de 90 minutos, lo que se debe a los aditivos agregados a esta formulación.

Es importante notar el comportamiento de gelificación de este sistema, en el que la lechada permanece completamente fluida hasta los primeros 90 minutos, a partir de los cuales se evidencia una aparición de geles casi instantánea y que continúa hasta que se alcanza el máximo valor para la determinación del tiempo de transición.

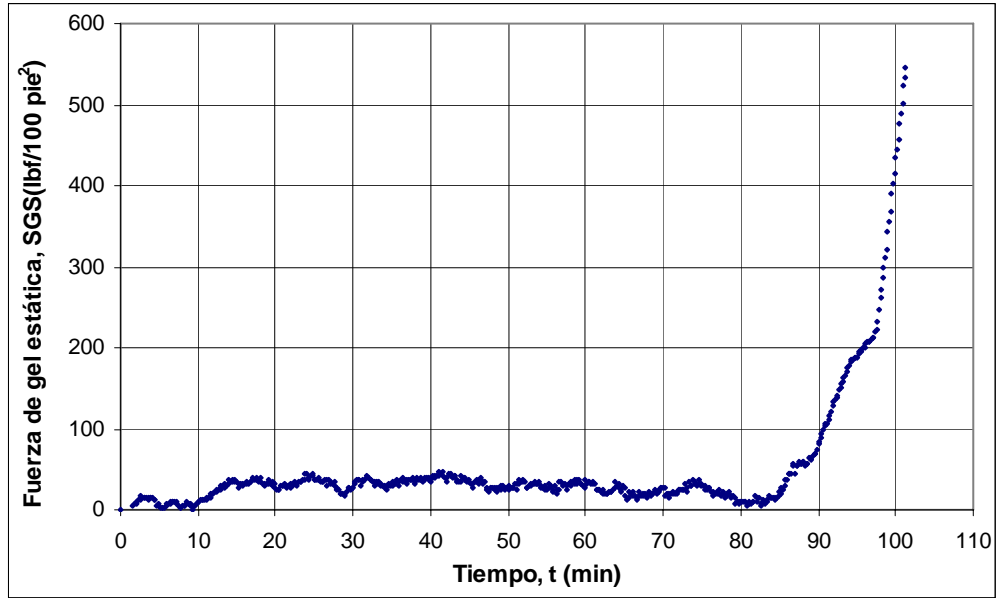


Figura N° 45: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el sistema B

7.4.5.- Sistema C.

En la Figura N° 46 se presenta la curva del desarrollo de la fuerza de gel estática para el sistema C, la cual fue obtenida a 270 °F y 1000 psi.

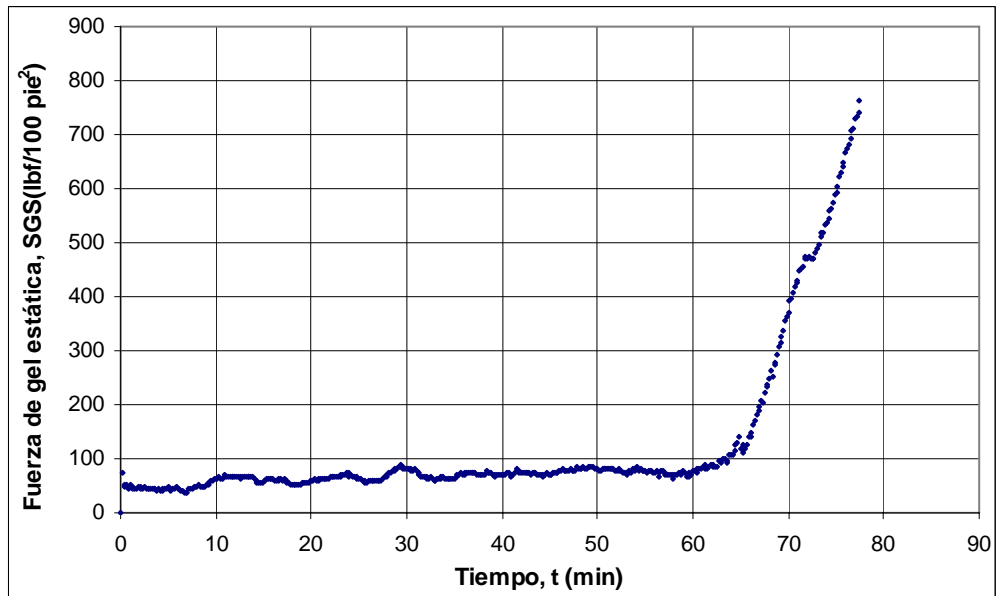


Figura N° 46: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el sistema C

Al igual que para el sistema B, en la mencionada figura, se puede observar un tiempo de transición muy corto, el cual fue de 10 minutos, así como un tiempo de cero gel de 63 minutos. Este sistema presenta el mismo comportamiento de gelificación descrito anteriormente para el sistema B, en el que la lechada permanece completamente fluida hasta los primeros 63 minutos, a partir de los cuales se evidencia una aparición de geles casi instantánea.

7.4.6.- Sistema D.

De igual manera, se presenta en la Figura N° 47 la curva de desarrollo de fuerza de gel estática para el sistema D, la cual fue obtenida a 150 °F y 1000 psi. El cual, al igual que los sistemas estudiados anteriormente tiene un comportamiento de gelificación en el que la lechada permanece fluida hasta los primeros 245 minutos y posteriormente desarrolla una estructura de geles casi instantánea. El tiempo de transición para esta muestra fue de 231 minutos, con un tiempo de cero gel de 21 minutos.

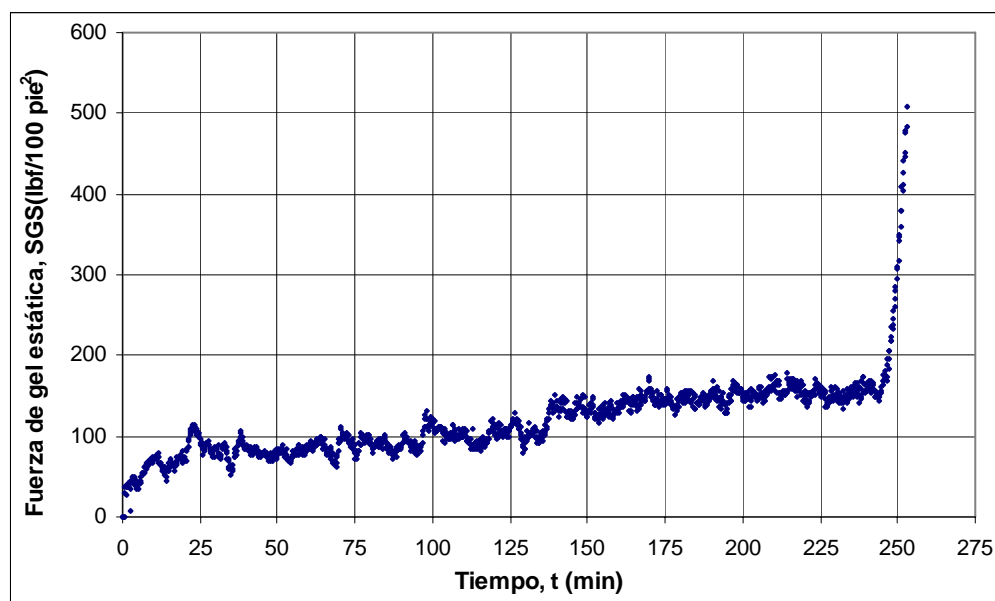


Figura N° 47: Desarrollo de la fuerza de gel estática para el sistema D

7.5.- Pruebas de impedancia electroquímica.

Antes de iniciar la discusión de las pruebas de impedancia para los diferentes sistemas estudiados en esta investigación, es necesario retomar el tema de la presencia de errores en la celda #3 debido a elementos parásitos, el cual se dejó inconcluso la sección 7.1.2 del presente trabajo.

En vista de lo discutido anteriormente en la sección señalada, y ya que no se encontró un modelo de circuito equivalente que fuese capaz de simular y restar la influencia de los elementos parásitos presentes en la celda #3, se decidió hacer pruebas con cemento clase B a fin de verificar qué tan afectados se verían los espectros de impedancia electroquímica debido a la presencia de estos efectos indeseados. Para ello se hizo un conjunto de pruebas de impedancia usando sólo la celda, sin sistema de calentamiento ni presurización, lo cual se hizo porque ya se demostró que la celda bajo estas condiciones es capaz de reproducir el comportamiento de impedancia esperado para el agua destilada.

En la Figura N° 48 se presenta el comportamiento del espectro de impedancia para muestras de 150 mL de lechada de cemento clase B y agua (Blanco A), medidos a condiciones de 77 °F y 14.7 psi. En la mencionada figura se puede observar que el espectro tiene la forma esperada de acuerdo al comportamiento reportado en la bibliografía para sistemas cementantes ^[25,30,32-34, 40-46].

De acuerdo al modelo de circuito equivalente planteado en la Figura N° 18, la estructura del espectro esta conformada por dos zonas bien definidas: la zona de baja frecuencia, la cual representa la respuesta de impedancia de la interfase electrodo-material, y que se encuentra a la derecha del punto mínimo de la curva (intersección), y la zona de alta frecuencia, la cual representa la respuesta de impedancia de la matriz del cemento.

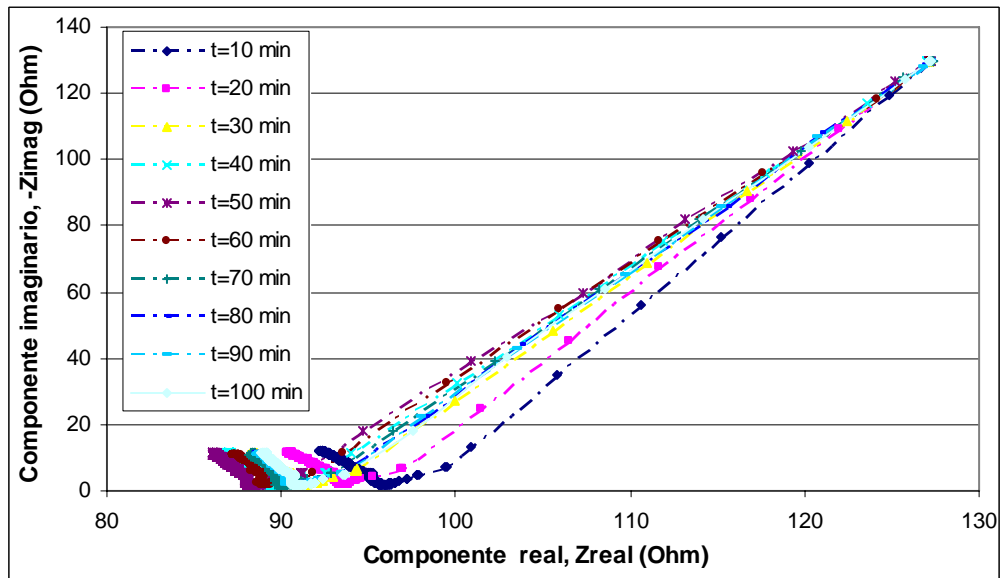


Figura N° 48: Espectros de impedancia para el Blanco A, usando la celda #3 sin sistemas de calentamiento y presurización, cuantificados a 77 °F y 14.7 psi

De igual manera se presenta en la Figura N° 49, otra serie de pruebas realizadas a las mismas condiciones que las mencionadas anteriormente, y que se hicieron con la finalidad de evaluar la repetibilidad en el comportamiento reportado en la Figura N°48.

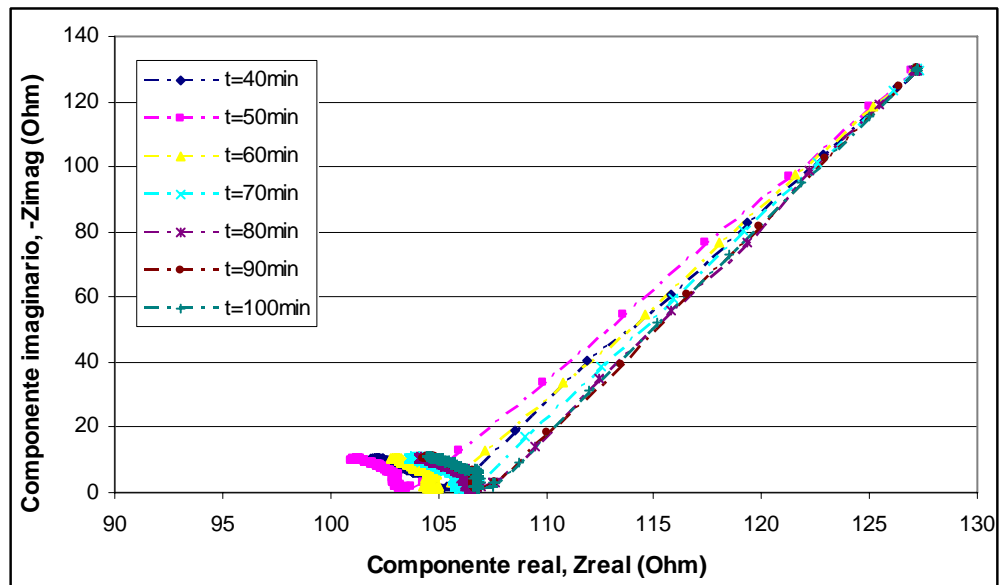


Figura N° 49: Repetición de espectros de impedancia para el Blanco A, usando la celda #3 sin sistemas de calentamiento y presurización, cuantificados a 77 °F y 14.7 psi

Tal y como puede observarse en las figuras N° 48 y 49, los espectros de impedancia del blanco A tienen el comportamiento esperado, en donde sólo se observa una pequeña sección de la zona de baja frecuencia correspondiente al comportamiento de la interfase, lo cual es debido a que, según simulaciones reportadas en la bibliografía [25, 33, 34], esta zona presenta un arco capacitivo mucho más amplio que el mostrado por el sistema cementante que se está estudiando.

De igual manera, se puede apreciar un movimiento de los espectros de impedancia a lo largo del eje real del diagrama de Nyquist, lo cual se traduce en cambios en la resistencia real del blanco estudiado, nótese cómo los barridos se mueven inicialmente hacia la izquierda del eje real y posteriormente hacia la derecha del mismo, lo cual implica que la resistencia real del sistema disminuye en las primeras etapas de la hidratación para posteriormente aumentar a medida de que avanza el tiempo. Esto se puede apreciar mejor en la Figura N° 50, en la que presenta el monitoreo de la resistencia real del sistema en función del tiempo para los espectros mostrados en la Figura N° 48.

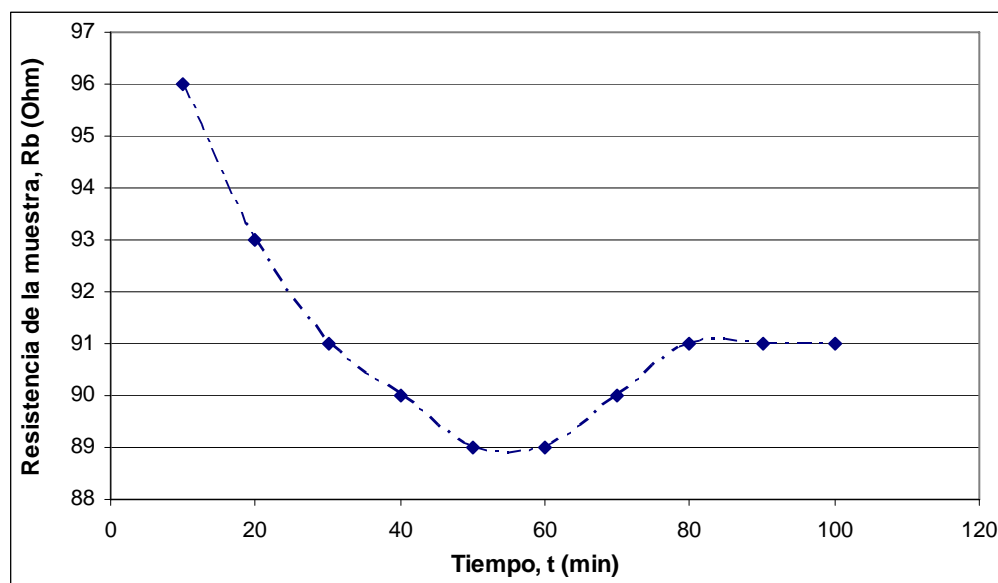


Figura N° 50: Resistencia del blanco A en función del tiempo, usando la celda #3 sin sistemas de calentamiento y presurización, cuantificada a 77 °F y 14.7 psi.

Es importante notar que, efectivamente el valor de la resistencia del sistema disminuye en los primeros minutos de la hidratación, para aumentar posteriormente luego de 50 minutos de iniciada la medición, este comportamiento tiene asidero en el proceso físico producto del avance de las reacciones de hidratación que se llevan a cabo en la lechada de cemento.

Para explicar lo anterior, es necesario hacer un breve resumen del proceso de hidratación del cemento Portland, el cual consiste en una serie de reacciones entre los minerales que conforman el clinker, el sulfato de calcio y el agua de mezcla, las cuales ocurren simultánea y/o sucesivamente a velocidades diferentes e influenciadas unas con otras ^[47]. Dos importantes eventos mecánicos ocurren durante la hidratación del cemento, el primero corresponde a la gelificación de la lechada, debido a la alta resistencia iónica de la fase acuosa, lo cual se inicia casi inmediatamente luego del mezclado del cemento y el agua. La estructura coagulada tiene una pobre resistencia mecánica y la misma puede ser destruida con la aplicación de energía de mezclado a la muestra. El segundo y más importante evento es el fraguado, el cual comienza algunas horas después de la coagulación^[48].

A condiciones ambientales, este proceso se puede dividir en varias etapas, la primera corresponde al periodo de pre-inducción, la cual se desarrolla en los primeros minutos luego del mezclado, en la que ocurre una rápida disolución de las especies iónicas en la fase líquida, lo cual se traduce en un incremento en la conductividad eléctrica de esta fase, además aparecen los primeros productos de reacción (ver Apéndice F). Posteriormente, se inicia el periodo de inducción, en el cual disminuye significativamente la velocidad de hidratación durante algunas horas. Luego, se pasa al periodo de aceleración, en el que la velocidad de hidratación aumenta nuevamente y todo el proceso pasa a ser controlado por la nucleación y el crecimiento de los productos de hidratación. Finalmente, se alcanza el periodo de post-aceleración, en el cual la velocidad de reacción decrece gradualmente, a medida de que la cantidad de material que no ha reaccionado aún disminuye, en este punto la velocidad de reacción pasa a ser

controlada por el proceso de difusión del agua y los iones disueltos a través del material hidratado ya formado ^[47].

En función de lo explicado anteriormente, se puede concluir que la disminución de la resistencia de la muestra en los primeros minutos de la hidratación, es producto de la disolución temprana de diferentes iones (K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , OH^-) y la aparición de un hidrato conocido como C-S-H (Silicato cálcico hidratado, C= CaO, S=SiO₂, H=H₂O)^[25,47], lo cuales provocan que la conductividad de la fase acuosa aumente. Es importante mencionar que el C-S-H a pesar de que precipita sobre las partículas el cemento, también es conductor, debido a que sus poros están llenos con una solución conductora ^[25].

Luego de transcurridos los 50 primeros minutos se puede observar un aumento gradual de la resistencia de la muestra, lo cual es motivado al posterior avance de las reacciones de hidratación, ya que además del C-S-H, los productos de las reacciones de las otras fases del clinker son aislantes y como el total de estos productos tienen un volumen específico mayor que los reactantes ^[25,47,48], se provoca que el espacio que contenía a la solución conductora vaya disminuyendo, aumentando esto la tortuosidad de los caminos conductores, lo cual se traduce en un aumento de la resistencia del material.

De igual manera, se puede concluir que la celda #3, sin incluir los sistemas de calentamiento y presurización, reproduce el comportamiento esperado para la muestra estudiada, sin embargo, en vista de que se necesitó suministrar presión y temperatura al sistema, se llevó a cabo una prueba para evaluar el comportamiento del espectro con todo el sistema montado.

De esta manera, se presenta en la Figura N° 51 el espectro de impedancia para el blanco A, medido a 77 °F y 14.7 psi, usando la celda #3 con todo el sistema conectado.

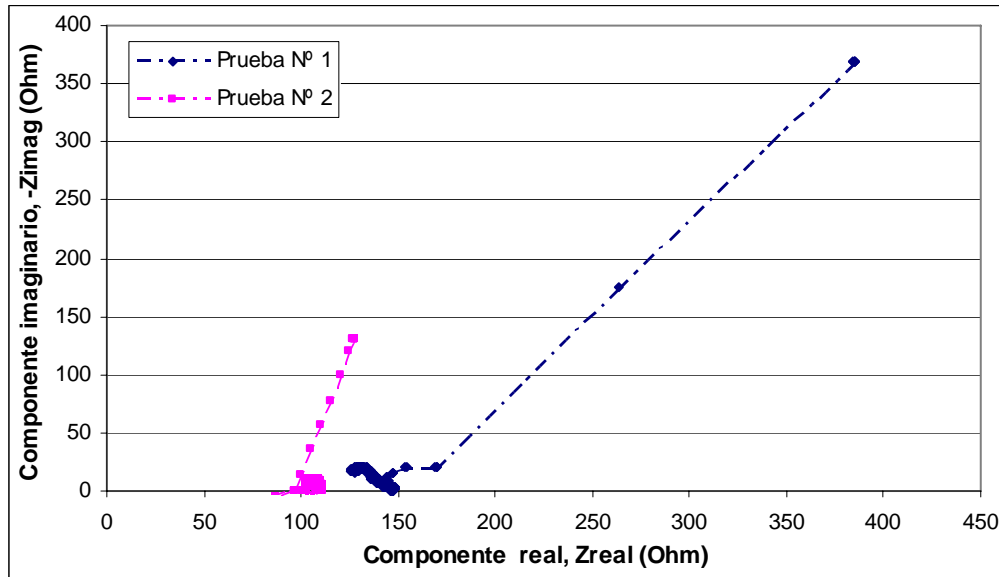


Figura N° 51: Espectros de impedancia para el blanco A, usando la celda #3 con sistemas de calentamiento y presurización, cuantificado a 77 °F y 14.7 psi.

Como puede ser apreciado en la figura anteriormente mostrada, el espectro de impedancia se ve claramente afectado por la inclusión de los sistemas de calentamiento y presurización en las mediciones. Es importante destacar que las diferencias que se muestran entre las pruebas N° 1 y N° 2 se deben al montaje del sensor de temperatura, ya que para la primera se colocó el sensor sin conexión a tierra y para la segunda se colocó el sensor aterrado.

Sin embargo, lo importante a indicar en la mencionada gráfica es el hecho de que para todo el rango de frecuencia los puntos del espectro se encuentran cerca del intercepto, por lo tanto, en vista de la perturbación en el espectro debido a la presencia de los componentes parásitos y partiendo de la premisa de que los errores son sólo inherentes a la celda, por lo que los mismos deben ser constantes a lo largo del tiempo, se propuso la idea de hacer las pruebas de impedancia a una sola frecuencia y cuantificar el valor de la resistencia en el tiempo, a fin de verificar si la misma tiene el comportamiento esperado en base a lo presentado en la Figura N° 50.

En vista de que es necesario elegir la frecuencia a la que se va a monitorear la resistencia de la muestra, y partiendo de la premisa de que según el circuito equivalente que modela el sistema, la respuesta de la muestra se obtiene a alta frecuencia, se presenta en la Figura N° 52 el monitoreo de la frecuencia de los interceptos de los espectros presentados en la Figura N° 48, a fin de identificar los rangos en los que se encuentran las zonas de alta y baja frecuencia para el sistema estudiado.

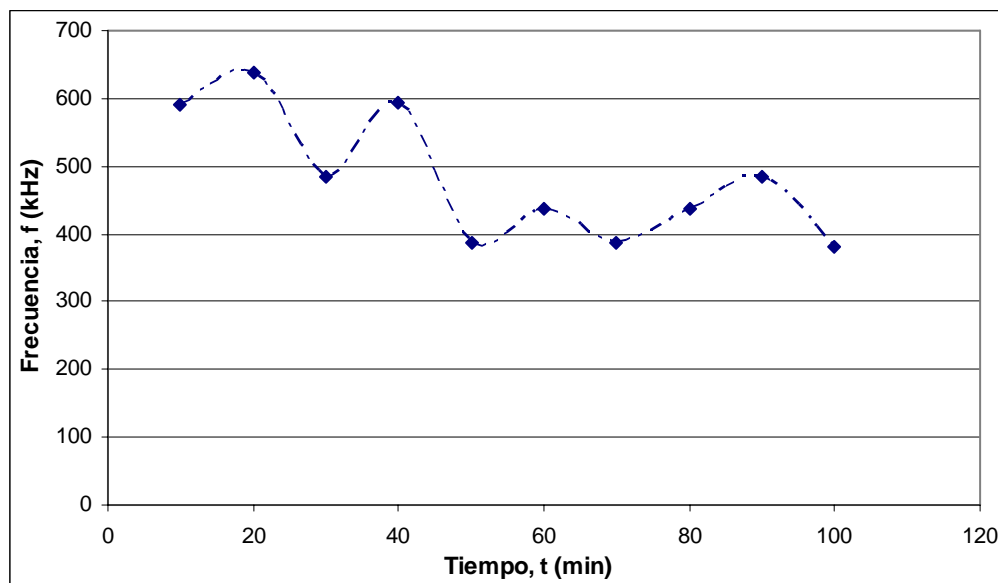


Figura N° 52: Evolución de la frecuencia del intercepto en el tiempo para el blanco A

Como puede observarse en la figura antes mostrada, la frecuencia del intercepto disminuye en función del tiempo para la muestra estudiada, lo cual se corresponde con lo esperado teóricamente ^[33], entonces, es importante definir para este sistema estudiado que la zona de baja frecuencia se encuentra entre 5 Hz y 600 kHz, de la misma manera se puede definir la zona de alta frecuencia entre 600 kHz y 13 MHz. En función de los resultados obtenidos, y en vista de que la frecuencia del intercepto presenta este comportamiento descendente en función del tiempo, se estableció que las pruebas de impedancia a frecuencia simple se harían a 5 MHz, con lo cual se asegura que la prueba siempre se encontrará en la zona de alta frecuencia.

En conclusión, se puede decir que a pesar de que los errores debido a la presencia de componentes parásitos en la celda #3 son muy importantes y distorsionan los

espectros de impedancia obtenidos, en vista de que esta influencia es constante a lo largo del tiempo y de que la misma no pudo ser modelada eficazmente, se decidió hacer las pruebas de impedancia a frecuencia simple (5 MHz) según la metodología que se explica en el Apéndice D.2, lo cual dio resultados satisfactorios, los cuales son mostrados en las secciones siguientes para cada uno de los blancos y sistemas estudiados.

Para el caso de los diferentes sistemas estudiados, se determinó la variación de la resistencia de la muestra en el tiempo, para ello se cuantificó los valores de los componentes real e imaginario de la impedancia en función del tiempo y posteriormente se determinaron los valores de la resistencia (R_b) y la capacitancia (C_b) de la muestra a partir del circuito equivalente propuesto para modelar el sistema.

7.5.1.- Blanco A.

En la Figura N° 53 se presenta la curva de variación de la resistencia de la muestra en el tiempo cuantificada a 77 °F y 14.7 psi, esta curva corresponde al promedio de tres pruebas realizadas a fin de evaluar la repetibilidad de las mediciones (ver Apéndice G). Es importante destacar que se cuantifica sólo la variación de la resistencia de la muestra en el tiempo y no la capacitancia porque ya se demostró en una investigación anterior ^[35] que era precisamente este parámetro el que brindaba información útil sobre los cambios físicos que ocurren el sistema, sin embargo en el Apéndice H se puede apreciar la curva de variación de la capacitancia en función del tiempo para el blanco A, en la que se puede verificar que este parámetro no brinda ningún tipo de información de interés sobre el cambio de las propiedades físicas de la muestra.

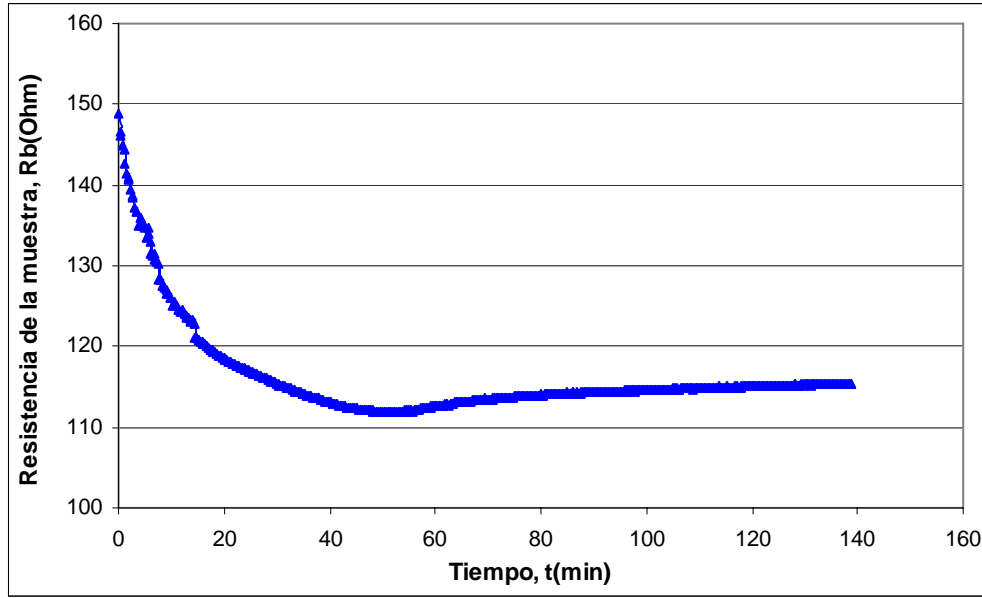


Figura N° 53: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco A (77 °F y 14.7 psi)

Como puede apreciarse en la figura anteriormente mostrada, la metodología planteada dio resultados satisfactorios, ya que se puede observar el comportamiento esperado según lo visto en la figuras N° 48 y N° 49, en donde la resistencia del blanco A disminuye durante los primeros 50 minutos y posteriormente se incrementa gradualmente. La razón de este comportamiento ya fue suficientemente explicado anteriormente.

De la misma manera, se presenta en la Figura N° 54 la comparación entre la curva de resistencia de la muestra cuantificada con la metodología de impedancia y de fuerza de gel estática en función del tiempo determinada con el MINIMACS. Nótese en la figura, que para el caso de la muestra estudiada a estas condiciones se obtuvo que los 500 lbf/100 pie² se alcanzaron luego de que los valores de la curva de resistencia comenzaron a aumentar, lo cual es congruente con lo esperado, ya que durante la hidratación, aunque la conductividad de la muestra este aumentando por efecto de la disolución de iones en la fase acuosa, también se están formando productos de reacción los cuales son los que proveen la estructura de geles a la muestra.

Por lo tanto, es de esperar que este aumento mostrado en la curva de resistencia sea un indicativo de que ya no hay más dilución de iones o que la formación de productos de hidratación dieléctricos comienza a dificultar la conductividad eléctrica a través de la muestra, lo cual implica que la formación de geles en este punto ya está bastante avanzada.

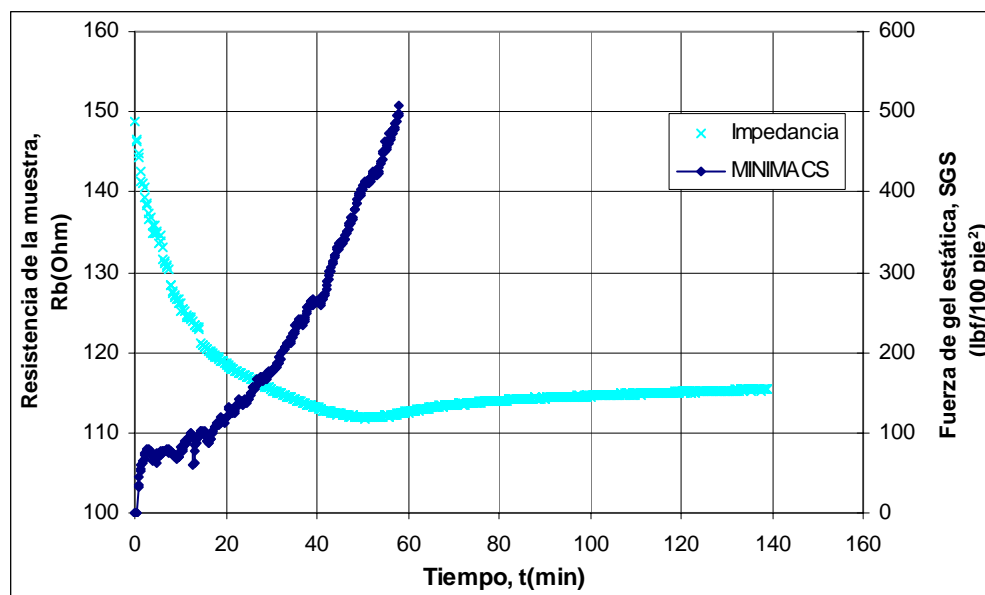


Figura N° 54: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco A (77 °F y 14.7 psi)

Además de las curvas antes mostradas, también se estudió la variación de la primera derivada de la resistencia de la muestra en función del tiempo (ver Apéndice G), la cual no dio indicios de servir como una alternativa para comparar las medidas de impedancia con el desarrollo de la fuerza de gel para esta muestra.

De igual manera se presenta en la Figura N° 55 la curva de variación de la resistencia de la muestra en función del tiempo para el blanco A, medida a 100 °F y 1000 psi. En este caso, se presenta un efecto que es importante mencionar y se trata de la influencia del calentamiento en las mediciones de impedancia electroquímica, ya que dichas mediciones son dependientes de la temperatura, lo cual implica que se debe tener un patrón de calentamiento bien definido para poder realizar las pruebas e identificar

hasta donde llega el efecto de la temperatura y donde comienza el efecto de la hidratación.

Como ya fue discutido anteriormente, el aumento de la temperatura acelera las reacciones de hidratación, pero al mismo tiempo disminuye la resistencia del material, por lo tanto ocurre un solapamiento en los primeros minutos de la hidratación, ya que la resistencia de la muestra disminuye por la disolución de los iones y por el aumento de la temperatura. En el caso de la figura mostrada a continuación, la temperatura se alcanzó en 30 minutos.

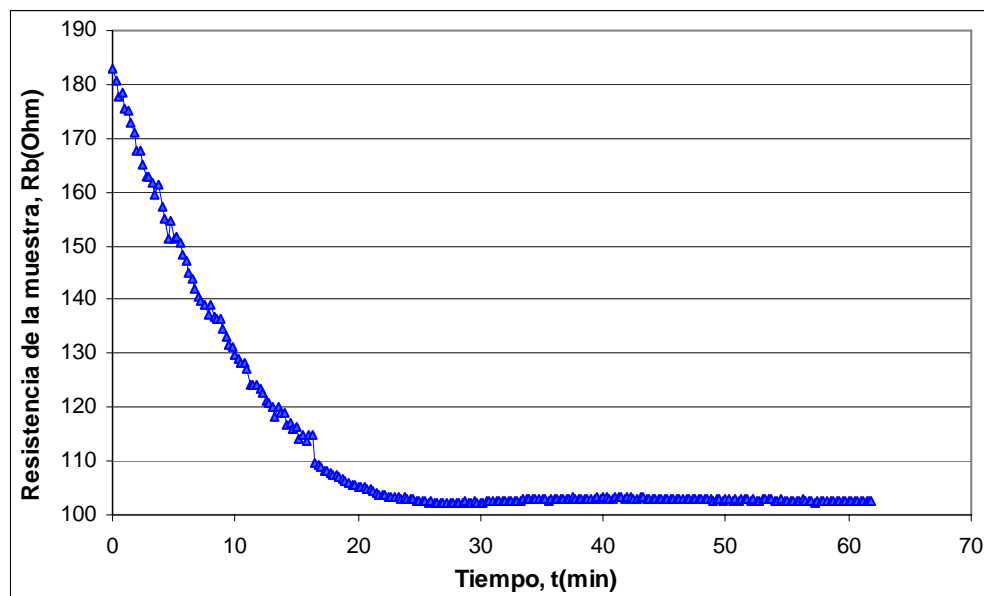


Figura N° 55: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco A (100 °F y 1000 psi)

Como puede observarse en la figura antes mostrada, la resistencia de la muestra disminuyó hasta los 100 Ohm aproximadamente, lo cual es un valor menor que el mínimo mostrado por la prueba con la misma muestra a condiciones ambientales (110 Ohm), esto se debe precisamente al hecho de que la temperatura aumentó en 23 °F.

De igual forma se presenta en la Figura N° 56 la comparación entre la curva de resistencia de la muestra cuantificada con la metodología de impedancia y de fuerza de gel estática en función del tiempo determinada con el MINIMACS.

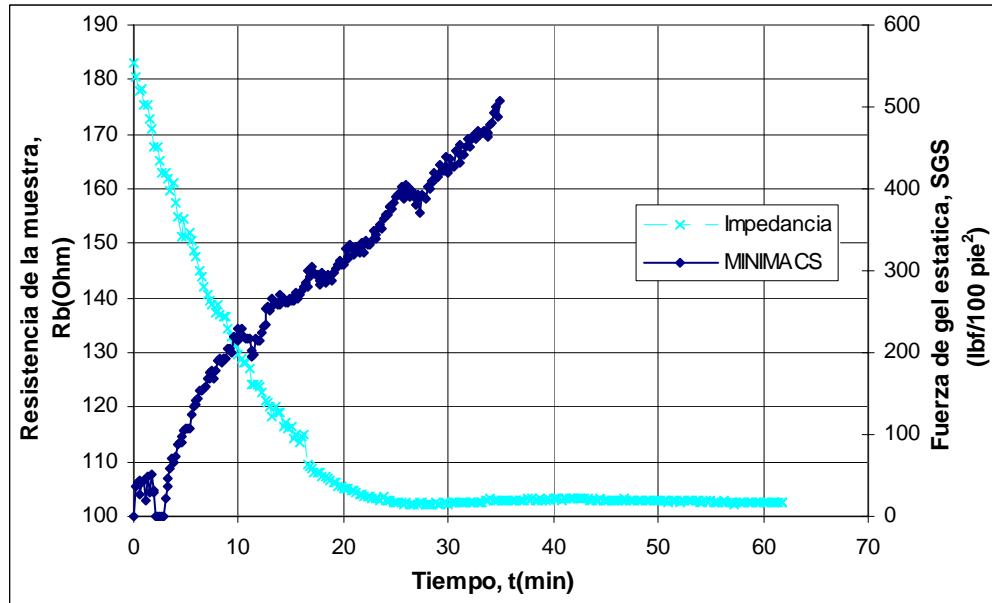


Figura N° 56: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco A (100 °F y 1000 psi)

Nótese en la curva antes mostrada que el comportamiento es parecido al discutido para esta muestra a condiciones ambientales (77 °F y 14.7 psi), sólo que se debe tomar en cuenta que gracias al aumento de temperatura la curva de resistencia alcanzó un mínimo cercano a los 100 Ohm. Es importante destacar que estas curvas son comparables gracias a que se verificó que el patrón de calentamiento en ambas pruebas fuese el mismo. Sin embargo, se puede ver que el aumento de la resistencia luego del mínimo fue bastante bajo, lo cual se debe al hecho de que las pruebas de impedancia se vieron afectadas por la inestabilidad del sistema del calentamiento, lo cual provocó una nueva disminución de la resistencia de la muestra en los puntos cercanos a los 40 minutos.

Se presenta en la Figura N° 57 la variación de la curva de resistencia de la muestra en función del tiempo para el blanco A medida a 150 °F y 1000 psi, en la cual se presenta una situación análoga a la discutida en el caso anterior. En este caso el calentamiento se llevó a cabo durante 30 minutos.

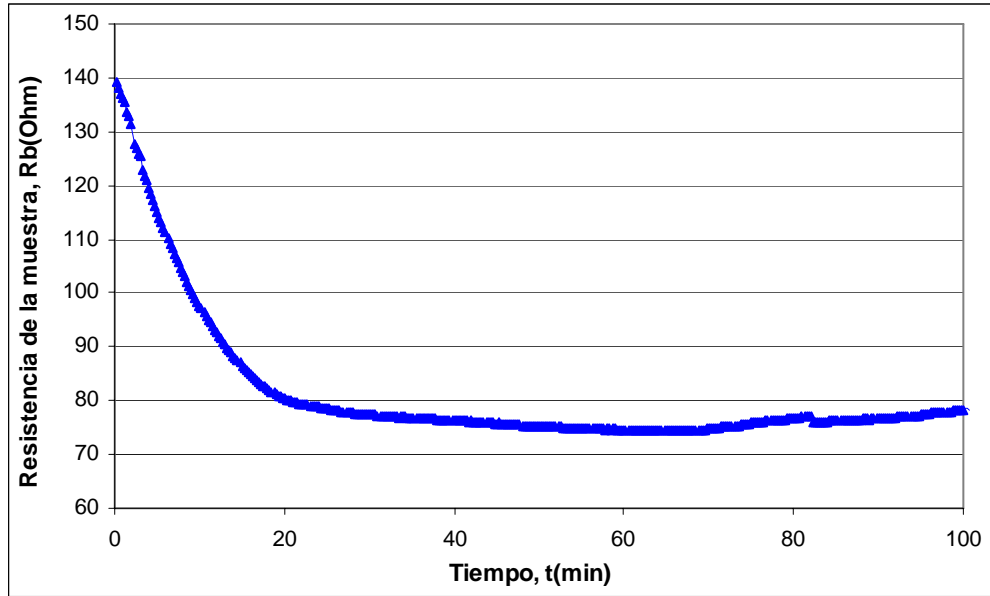


Figura N° 57: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco A (150 °F y 1000 psi)

Por otro lado, se presenta en la Figura N° 58 la comparación entre la curva de resistencia de la muestra cuantificada con la metodología de impedancia y de fuerza de gel estática en función del tiempo determinada con el MINIMACS.

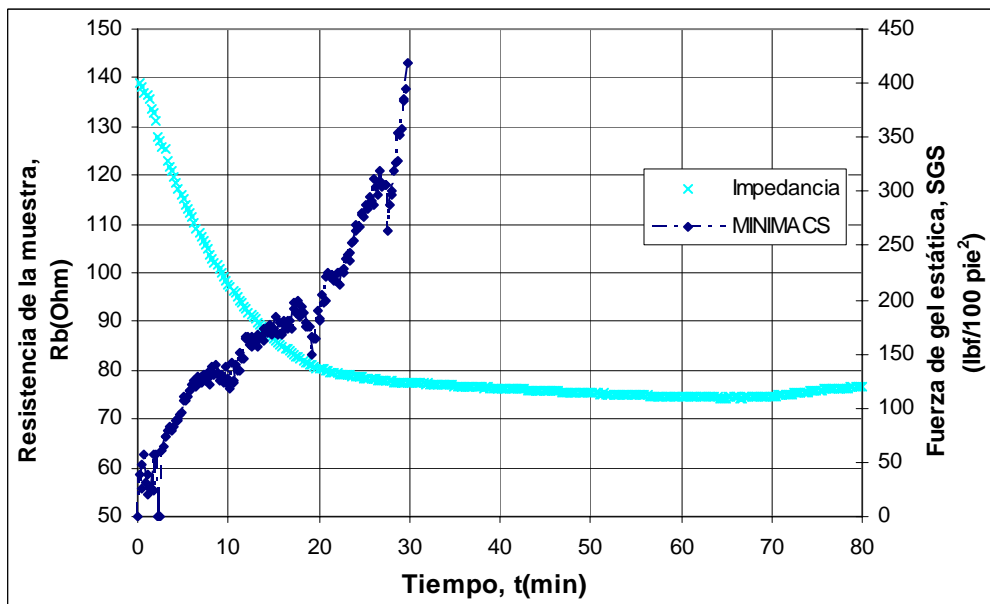


Figura N° 58: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco A (150 °F y 1000 psi)

De igual manera, se presenta en la Figura N° 59 la variación de la curva de resistencia de la muestra en función del tiempo para el blanco A medida a 200 °F y 1000 psi, en la cual se presenta la misma situación que la discutida en los casos anteriores. En este caso el calentamiento se llevó a cabo durante 45 minutos.

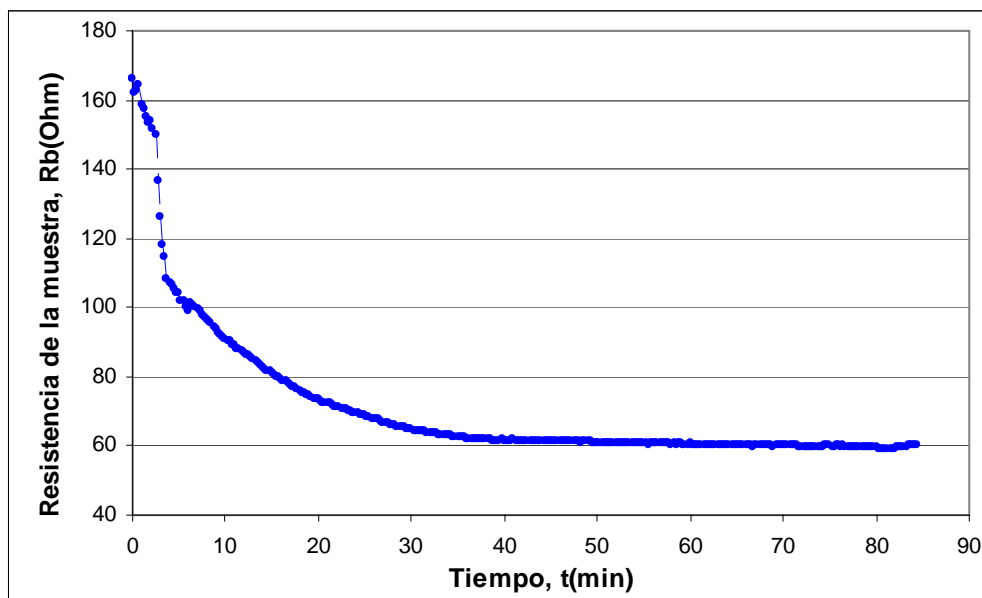


Figura N° 59: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco A (200 °F y 1000 psi)

Al igual que los casos anteriores, se observa en la figura anterior que la resistencia del sistema disminuyó hasta 60 Ohm, lo cual es 50 Ohm menor que el mínimo alcanzado en las pruebas con esta misma muestra a condiciones ambientales, lo que evidentemente es producto del efecto del calentamiento del sistema, el cual se puede notar entre el inicio de la prueba y los 40 minutos aproximadamente.

Se presenta en la Figura N° 60 la comparación entre la curva de resistencia de la muestra cuantificada con la metodología de impedancia y de fuerza de gel estática en función del tiempo determinada con el MINIMACS.

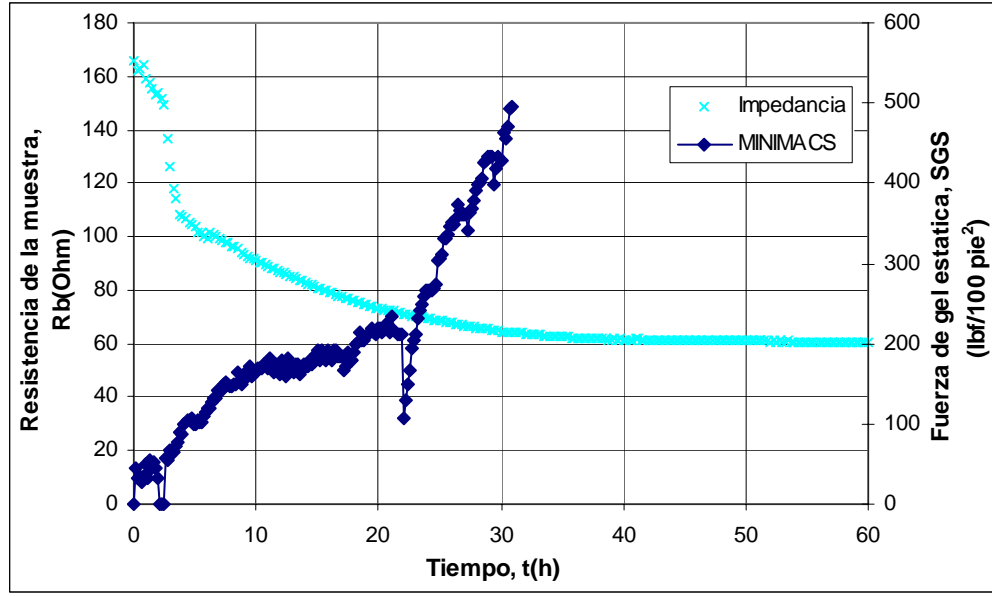


Figura N° 60: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco A (200 °F y 1000 psi)

7.5.2.- Blanco B.

Inicialmente se presenta en la Figura N° 61, la curva de variación de la resistencia de la muestra en el tiempo cuantificada a 77 °F y 14.7 psi, en la cual se pueden apreciar algunas diferencias con respecto a la curva mostrada para el blanco A bajo las mismas condiciones, entre ellas se encuentra que la resistencia de inicio del sistema (200 Ohm aprox.) es mayor que la determinada para el blanco A (150 Ohm aprox.), lo cual es un indicativo de que inicialmente esta mezcla no contiene tantos iones disueltos como el sistema anteriormente estudiado.

De igual forma, se puede observar que el tiempo en que alcanza el mínimo de la curva así como la diferencia entre los valores máximos y mínimos de la misma, es mucho más corto que el observado para el blanco A, lo cual se debe sólo a la composición del material. Es importante mencionar que la alta dispersión mostrada en los datos experimentales obtenidos es producto de la escala en la que mide el analizador de impedancia.

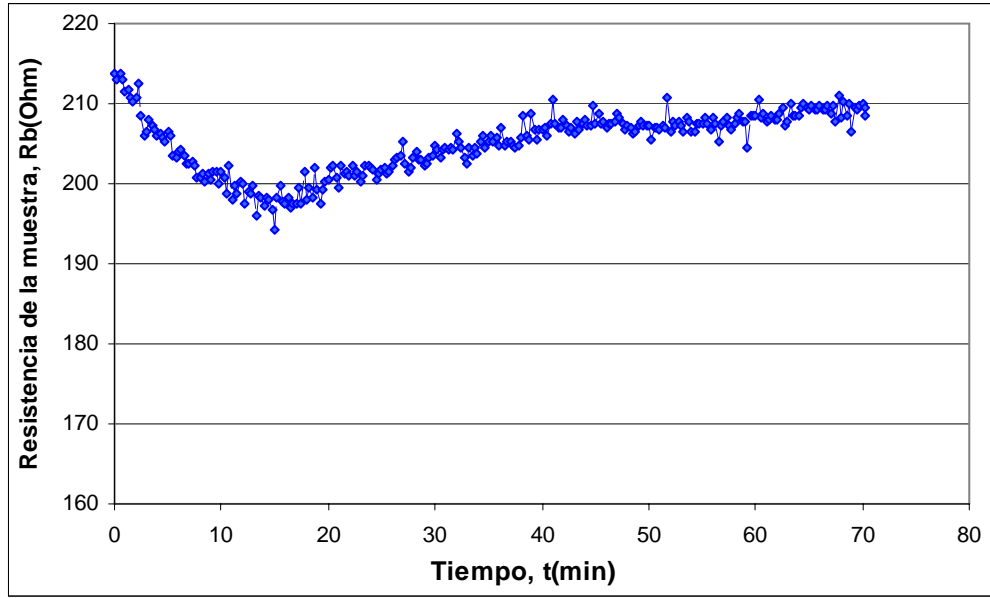


Figura N° 61: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco B (77 °F y 14.7 psi)

En la Figura N° 62 se presenta la comparación entre la curva de resistencia de la muestra cuantificada con la metodología de impedancia y de fuerza de gel estática en función del tiempo determinada con el MINIMACS para esta muestra.

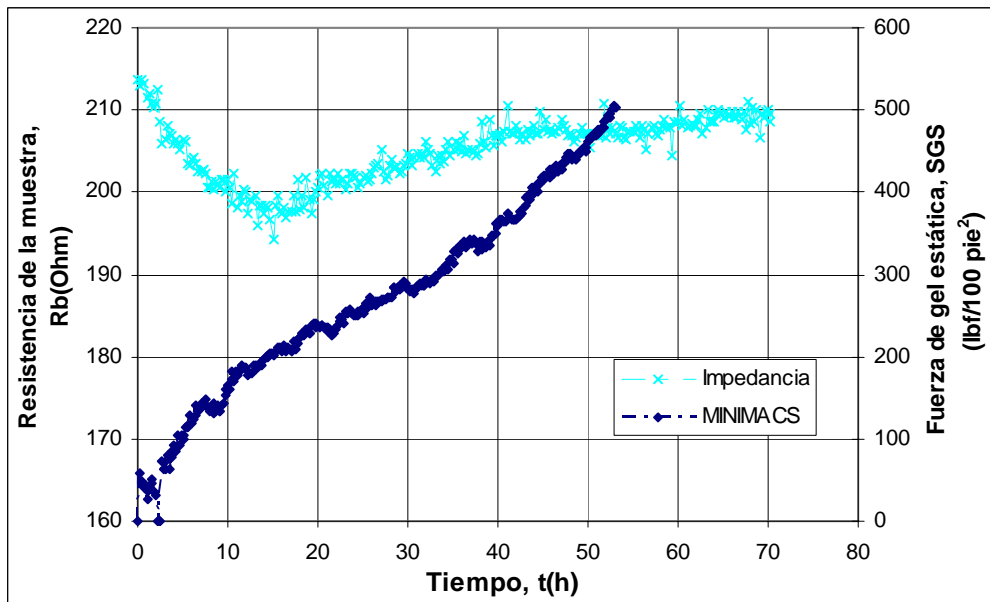


Figura N° 62: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco B (77 °F y 14.7 psi)

De igual manera se presenta en la Figura N° 63, la curva de variación de la resistencia de la muestra en el tiempo cuantificada a 150 °F y 1000 psi. El tiempo de calentamiento para esta muestra fue de 30 minutos.

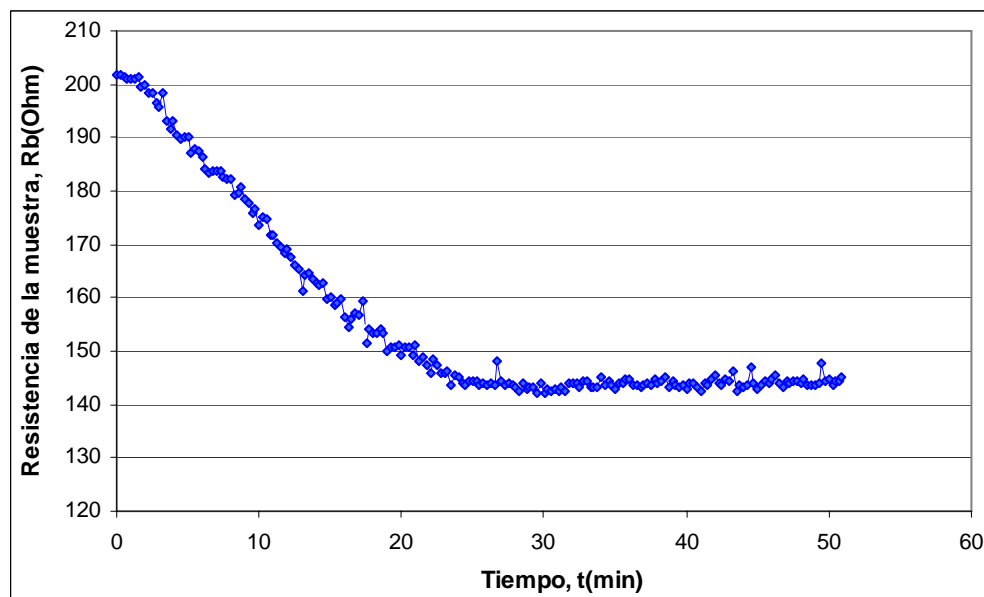


Figura N° 63: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco B (150 °F y 1000 psi)

Es importante destacar que en esta muestra, se ve sólo el efecto de la temperatura durante la primera media hora de prueba, ya que si se observa la figura anteriormente mostrada se podrá notar que la disminución de la resistencia de la muestra se evidenció durante este lapso de tiempo. Este comportamiento es congruente con lo mostrado en la Figura N° 61, ya que la etapa de disminución de resistencia de la muestra debido a disolución de iones sólo duró 15 minutos a condiciones ambientales

Por otro lado, se presenta la comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco B, cuantificada a 150 °F y 1000 psi, la cual no dio resultados satisfactorios ya que la gráfica correspondiente al MINIMACS no se pudo analizar debido a que la misma presenta diferentes anomalías debido a fallas en el sistema de presurización del equipo.

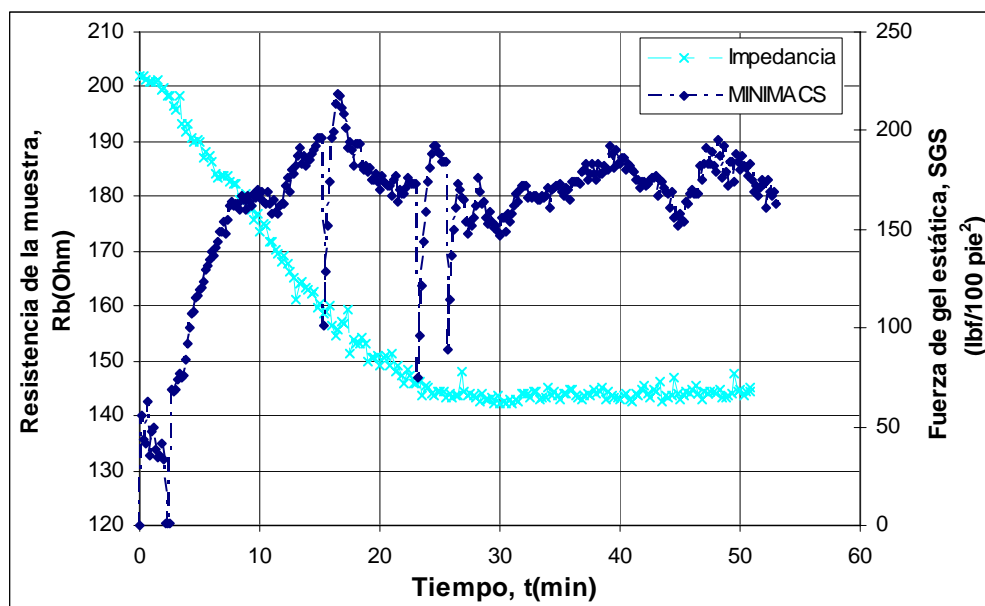


Figura N° 64: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco B (150 °F y 1000 psi)

De igual manera se presenta en la Figura N° 65 la curva de variación de la resistencia de la muestra en función del tiempo para el blanco B, cuantificada a 250 °F y 1000 psi. En este caso, el periodo de calentamiento fue de 1 hora.

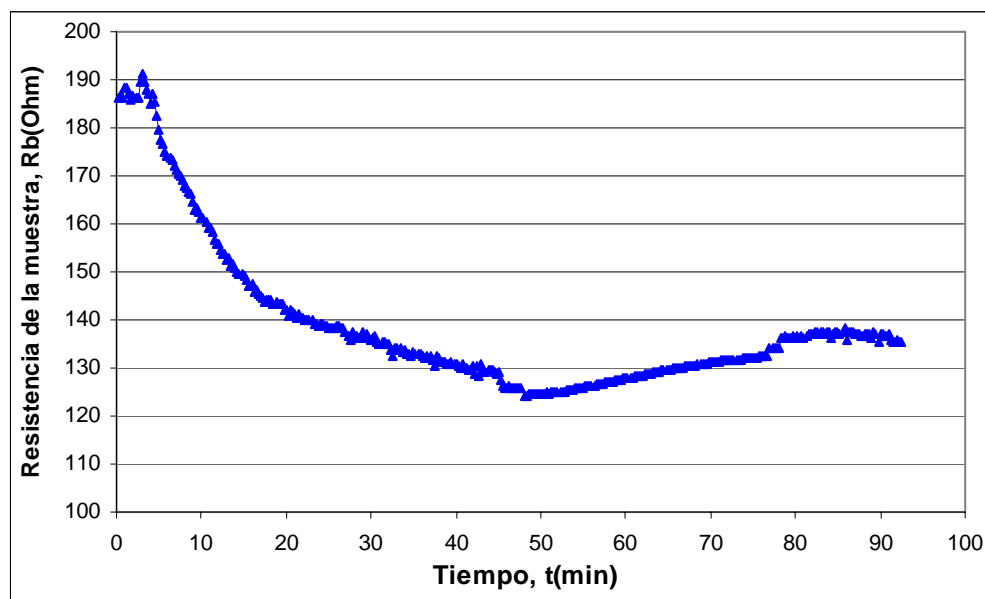


Figura N° 65: Variación de la resistencia de la muestra para el blanco B (250 °F y 1000 psi)

Se presenta en la Figura N° 66 la comparación entre la curva de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco B, cuantificadas a las condiciones de presión y temperatura descritas anteriormente. Nótese que la curva correspondiente al MINIMACS presenta las anomalías descritas anteriormente y que se deben a la influencia del sistema de presurización de este equipo. De igual manera es importante mencionar que los 500 SGS se alcanzaron en el periodo de tiempo en que la muestra continuaba disminuyendo sus resistividad, lo cual como fue mencionado anteriormente corresponde a un efecto del calentamiento al que es sometida la muestra.

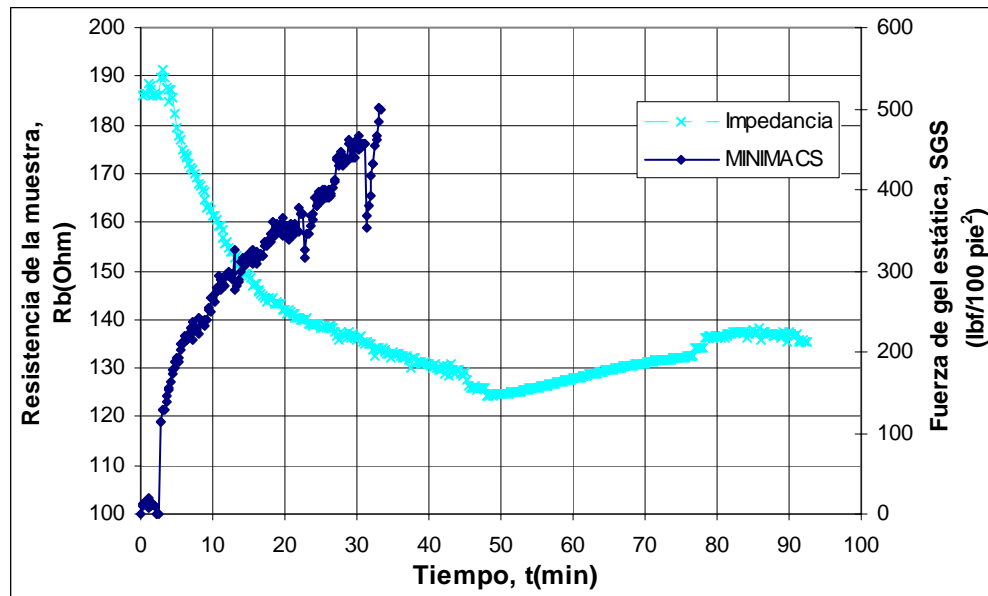


Figura N° 66: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el blanco B (250 °F y 1000 psi)

7.5.3.- Sistema A.

Para este sistema se hizo el mismo estudio de los cambios de la curva de resistencia en el tiempo a diferentes temperaturas, que se realizó para los blancos descritos anteriormente, en tal sentido, se presenta en la Figura N° 67 la curva de variación de la resistencia de la muestra en función del tiempo, cuantificada a 100 °F y 1000 psi. El periodo de calentamiento para esta muestra fue de 30 minutos.

De igual manera es importante mencionar que para este sistema se hizo un acondicionamiento previo a la muestra antes de realizar las pruebas de impedancia, dicho acondicionamiento consistió en someter la muestra a agitación continua a una temperatura de 80 °F durante una hora, en el consistómetro atmosférico, luego de mezclada la misma. Esto se hizo con la finalidad de simular las operaciones realizadas en el pozo.

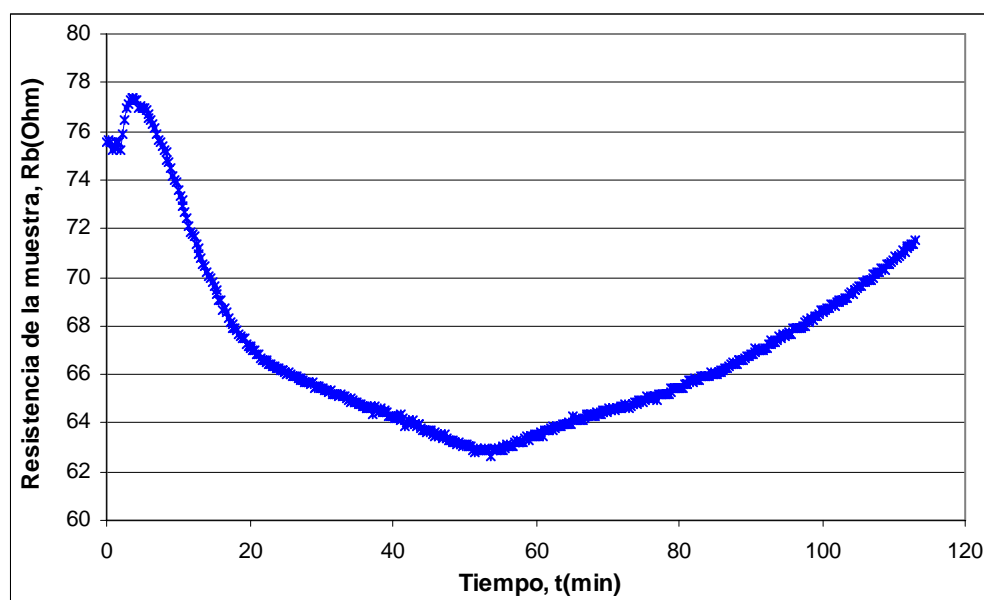


Figura N° 67: Variación de la resistencia de la muestra para el sistema A (100 °F y 1000 psi)

Para el caso de la figura antes mostrada, se debe tomar en cuenta que la muestra ya tenía una hora reaccionando (durante el acondicionamiento) antes de iniciar las medidas de impedancia electroquímica, en tal sentido, es necesario identificar algunos comportamientos de la curva, como por ejemplo el sobrepico mostrado en los primeros minutos, lo cual se debe a la disminución de la temperatura en el lapso de tiempo en que la muestra se pasaba del recipiente del consistómetro atmosférico a la celda de impedancia, seguida de una disminución importante en el valor de la resistencia de la muestra debido al aumento de la temperatura, lo cual se puede evidenciar en los primeros 25 minutos y finalmente se puede apreciar el comportamiento discutido

anteriormente, el cual corresponde a los cambios en la resistencia debido a las reacciones de hidratación de la muestra.

Por otro lado, se presenta en la Figura N° 68 la comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema en estudio a las condiciones definidas anteriormente.

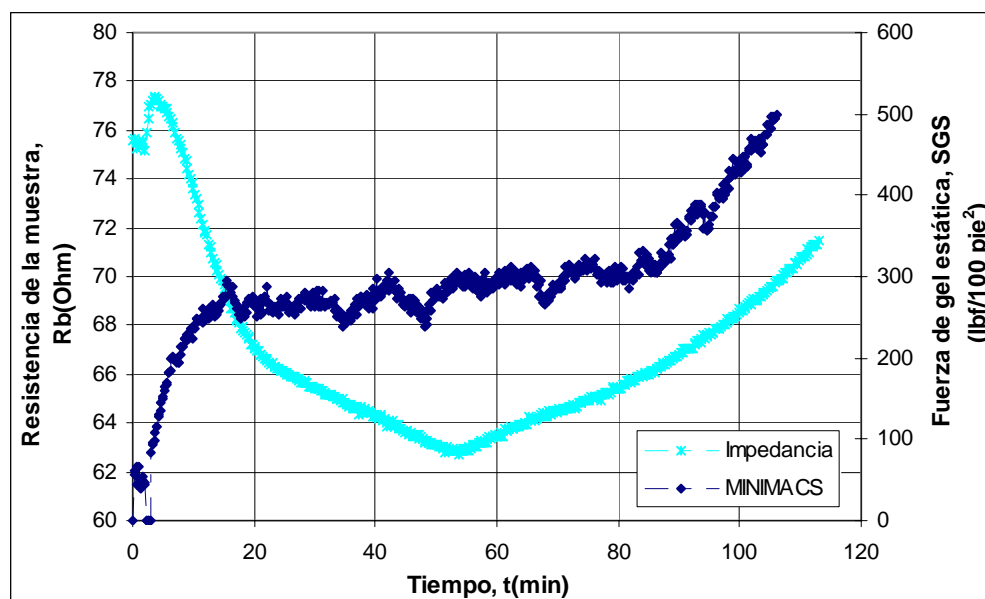


Figura N° 68: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema A (100 °F y 1000 psi)

Se presenta en la Figura N° 69 la curva de variación de la resistencia de la muestra en función del tiempo para el sistema A, cuantificada a 140 °F y 1000 psi. El tiempo de calentamiento para esta muestra fue de 30 minutos y al igual que en el caso anterior se obtuvo el mismo patrón de comportamiento discutido para la misma muestra a 100 °F. Es importante destacar que el valor del mínimo alcanzado por esta curva es aproximadamente 15 Ohm menor que el obtenido en el caso anteriormente discutido, lo cual evidentemente es motivado por el aumento de la temperatura de la prueba.

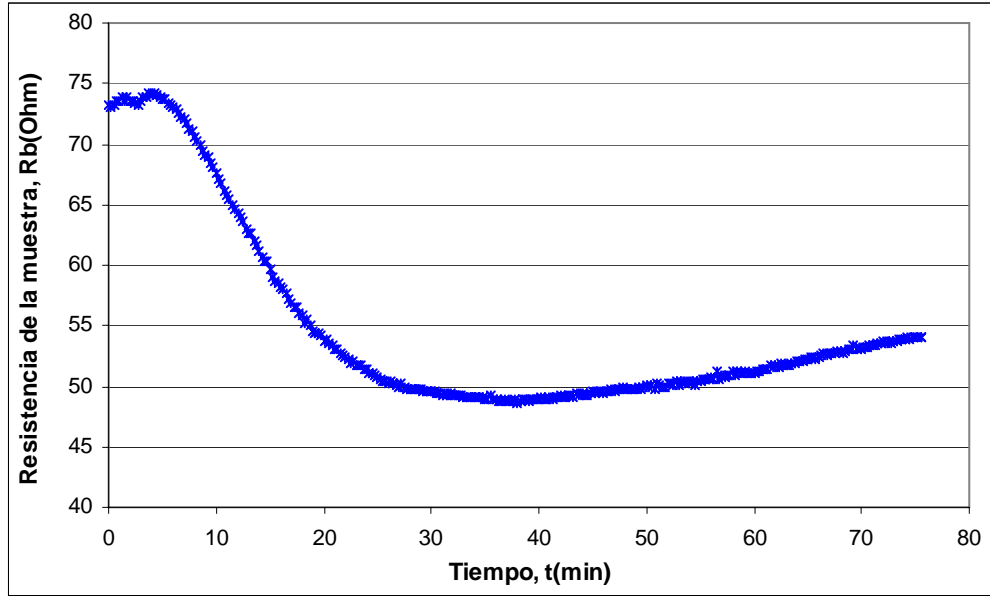


Figura N° 69: Variación de la resistencia de la muestra para el sistema A (140 °F y 1000 psi)

De igual manera, se presenta en la Figura N° 70 la comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema A, medidas a las condiciones mencionadas anteriormente.

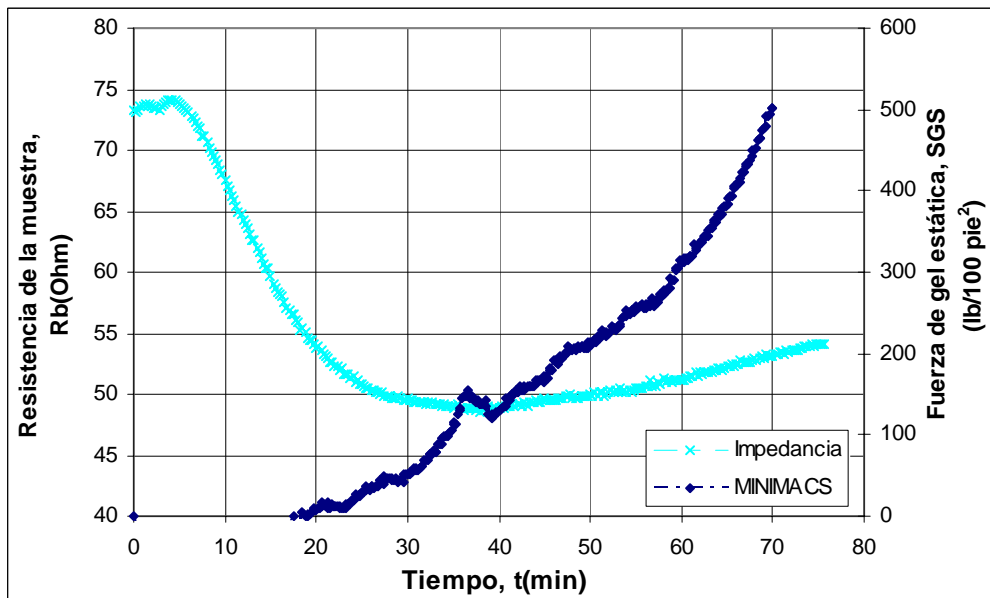


Figura N° 70: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema A (140 °F y 1000 psi)

Por otro lado, se presenta en la Figura N° 71 la curva de variación de la resistencia de la muestra en función del tiempo para el sistema A, cuantificada a 200 °F y 1000 psi. El tiempo de calentamiento para esta prueba fue de 40 minutos y se obtuvo el mismo comportamiento discutido anteriormente.

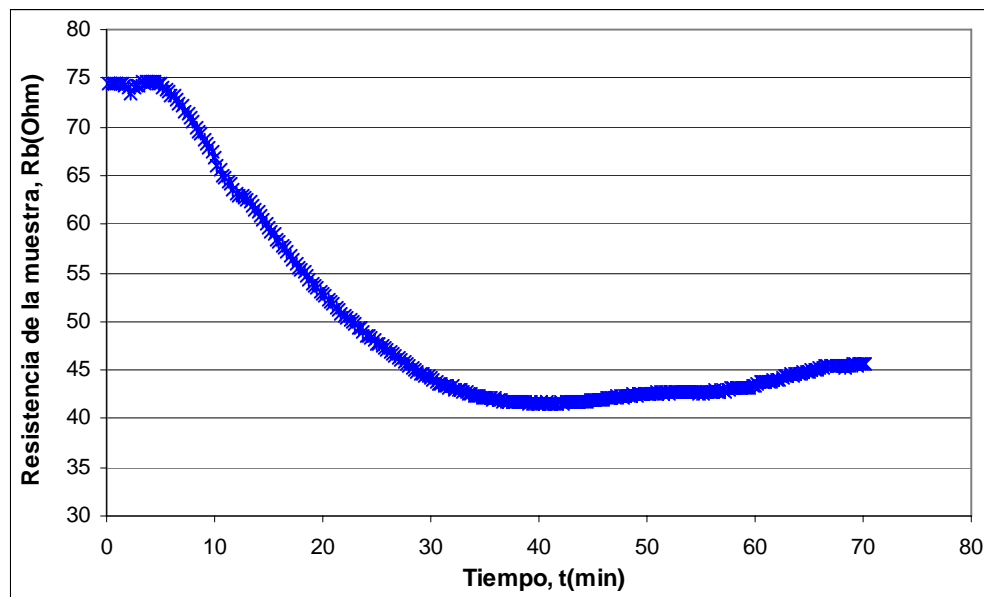


Figura N° 71: Variación de la resistencia de la muestra para el sistema A (200 °F y 1000 psi)

Se presenta en la Figura N° 72 la comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema A, medidas a las condiciones mencionadas anteriormente y en la que se observa que los 500 SGS se alcanzaron cuando aún se estaba efectuando el calentamiento, lo cual puede representar un problema a la hora de determinar la correlación para esta muestra, ya que en esta prueba sólo se vio el efecto del calentamiento y no de la hidratación como tal.

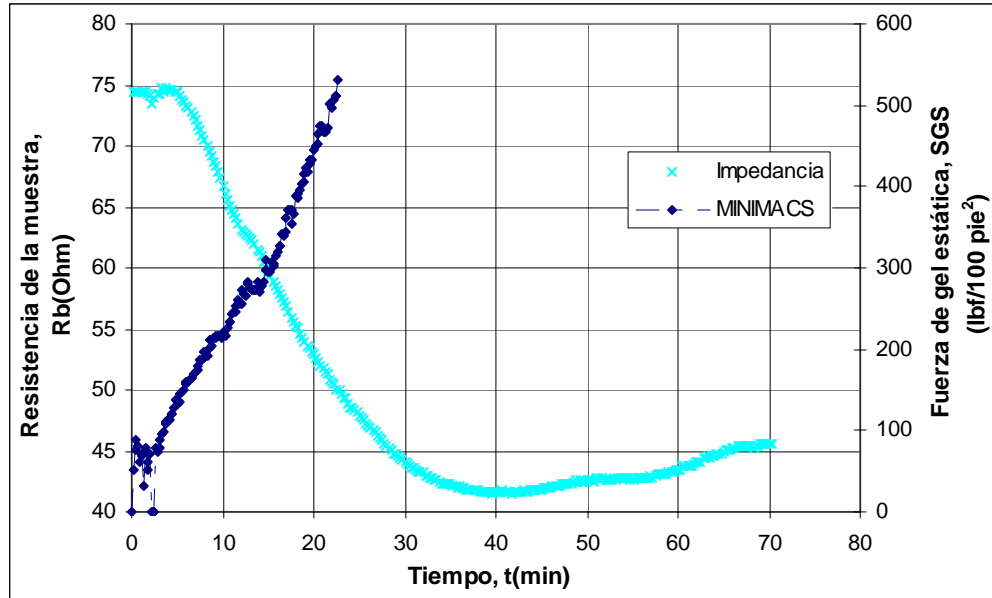


Figura N° 72: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema A (200 °F y 1000 psi)

7.5.4.- Sistema B.

En el caso de este sistema sólo se estudió el comportamiento de la muestra a 115 °F y 1000 psi, lo cual se hizo de esta manera para evaluar el desempeño de las pruebas de impedancia en lechadas que presentan un comportamiento de gelificación como el mostrado por dicho sistema. Al igual que el sistema A, la muestra fue acondicionada durante 1 hora a 80 °F en el consistómetro atmosférico, motivo por el cual se presenta en la curva de resistencia de la muestra en función del tiempo (ver Figura N° 73) un comportamiento parecido al obtenido para el sistema anteriormente estudiado, en donde se evidencia el sobrepico inicial debido al cambio de condiciones que sufre la muestra durante el montaje de la prueba, la caída posterior de la resistencia de la muestra debido al calentamiento de la misma y finalmente el incremento de dicha resistencia debido a los cambios sufridos por la muestra a causa de las reacciones de hidratación.

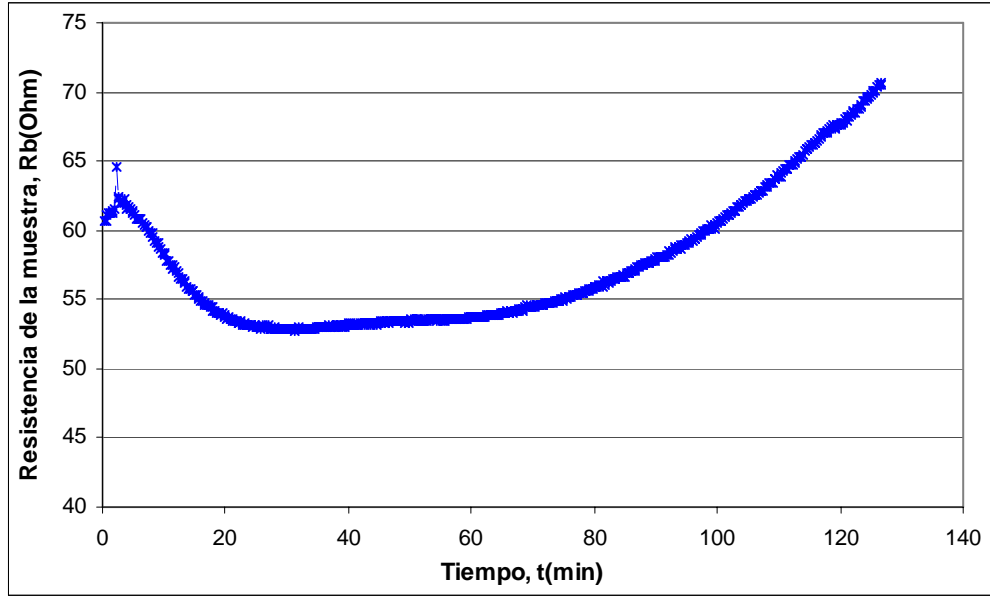


Figura N° 73: Variación de la resistencia de la muestra para el sistema B (115 °F y 1000 psi)

De igual forma, se presenta en la Figura N° 74 la comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema B, medidas a las condiciones mencionadas anteriormente.

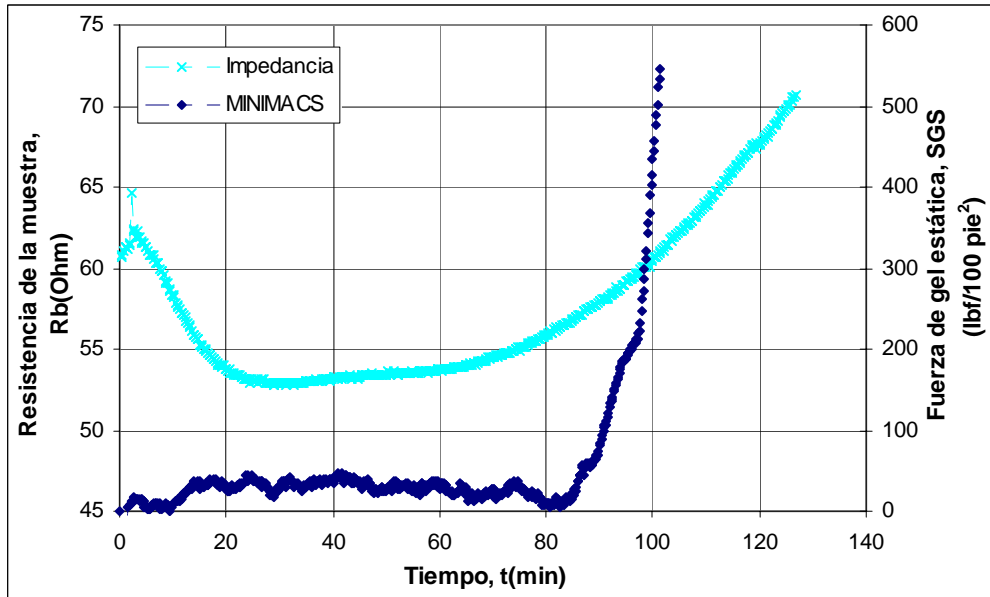


Figura N° 74: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema B (115 °F y 1000 psi)

7.5.5.- Sistema C.

En el caso de este sistema sólo se estudió el comportamiento de la muestra a 270 °F y 1000 psi, lo cual, al igual que para el sistema B, se hizo para evaluar el desempeño de las pruebas de impedancia en lechadas que presentan un comportamiento de gelificación como el mostrado por dicho sistema. Esta muestra no fue acondicionada, sin embargo se presenta en la Figura N° 75 la curva de resistencia de la muestra en función del tiempo, la cual tuvo comportamiento parecido al obtenido para los sistemas anteriormente estudiados. Es importante destacar que debido a limitaciones en el sistema de calentamiento, no se obtuvo un patrón uniforme para esta lechada por lo que el aumento de temperatura se logró en más de 90 minutos, lo cual provocó que la curva estuviese en continuo descenso durante toda la prueba.

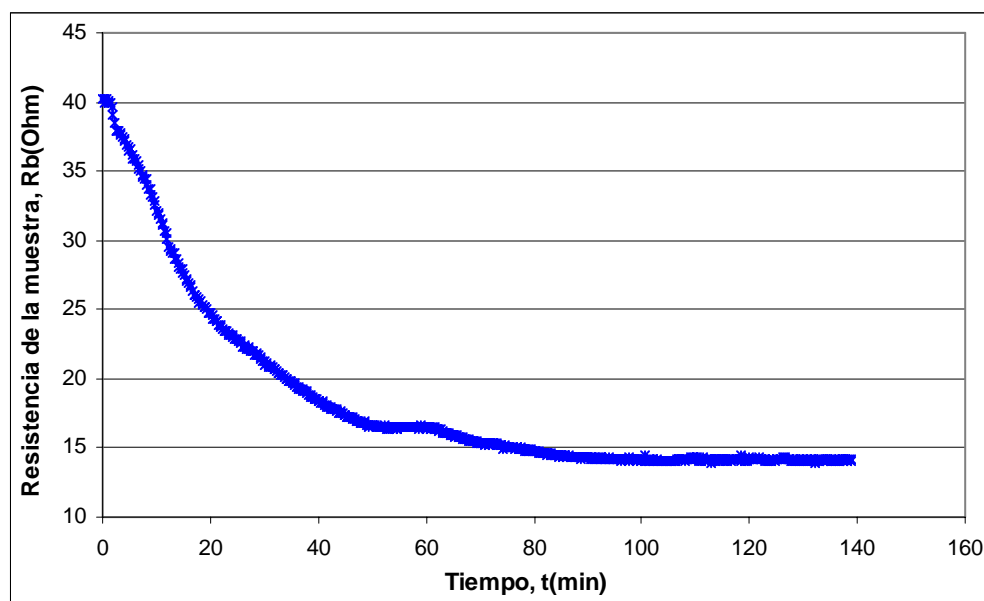


Figura N° 75: Variación de la resistencia de la muestra para el sistema C (270 °F y 1000 psi)

Por otro lado, se presenta en la Figura N° 76 la comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema C, medidas a 270 °F y 1000 psi.

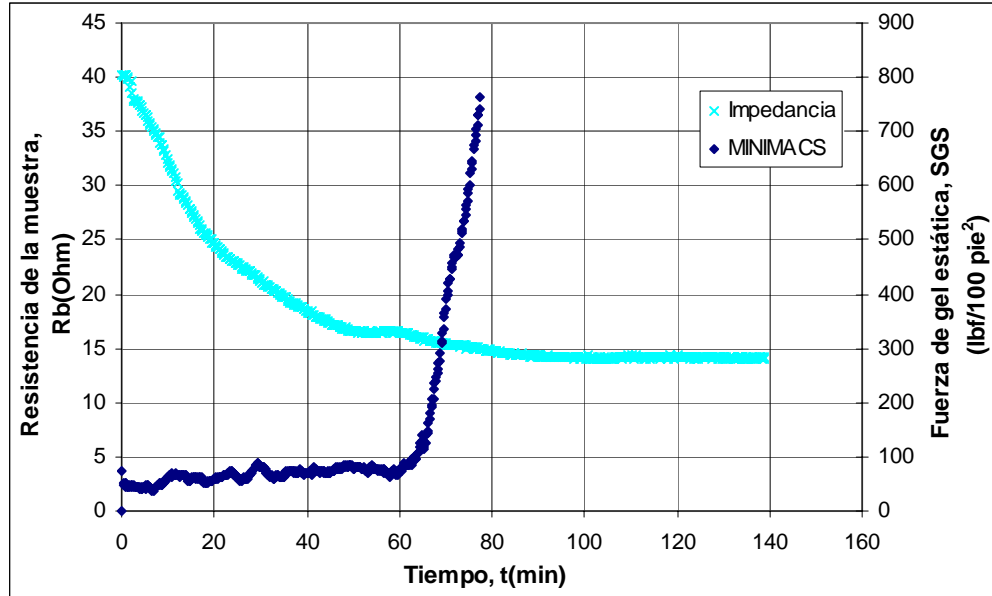


Figura N° 76: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema C (270 °F y 1000 psi)

7.5.6.- Sistema D.

Para este sistema sólo se estudió el comportamiento de la muestra a 150 °F y 1000 psi, lo cual, al igual que para los sistemas anteriores, se hizo para evaluar el desempeño de las pruebas de impedancia en lechadas que presentan un comportamiento de gelificación como el mostrado por dicho sistema. Esta muestra se acondicionó durante 1 hora, por lo que se presenta en la Figura N° 77 la curva de resistencia de la muestra en función del tiempo, la cual tuvo comportamiento parecido al obtenido para los sistemas anteriormente estudiados. Es importante destacar que el calentamiento de la muestra se llevó a cabo durante 30 minutos, tiempo en que sólo se observa disminución de la resistencia de la muestra según lo mostrado en la figura antes mencionada, posteriormente se puede ver un aumento gradual en la resistencia, lo cual se debe solamente al efecto de las reacciones de hidratación que se llevan a cabo en la muestra.

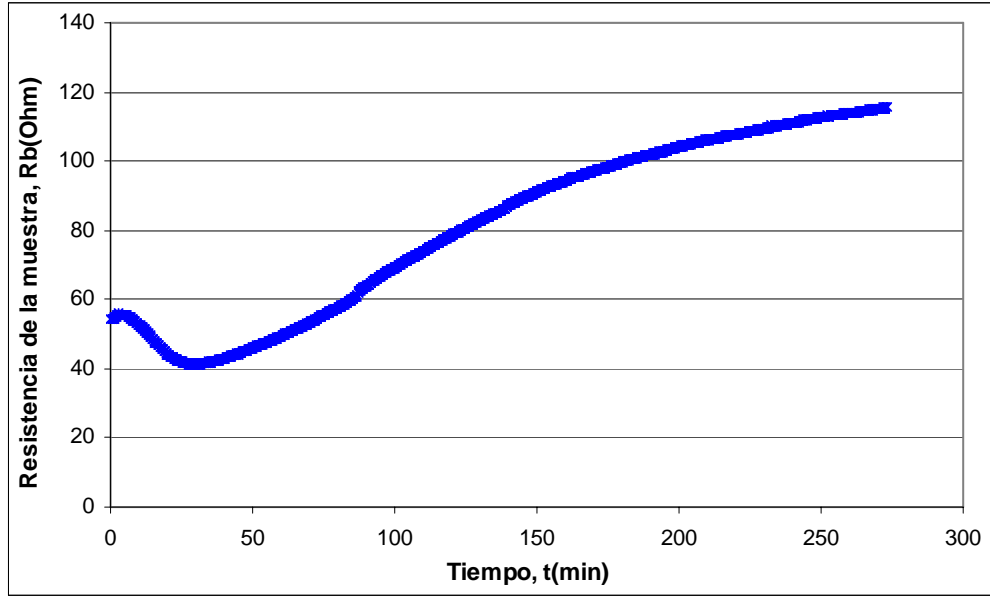


Figura N° 77: Variación de la resistencia de la muestra para el sistema D (150 °F y 1000 psi)

Por otro lado, se presenta en la Figura N° 78 la comparación entre las curvas de resistencia y fuerza de gel estática para el sistema D, cuantificadas a 150 °F y 1000 psi.

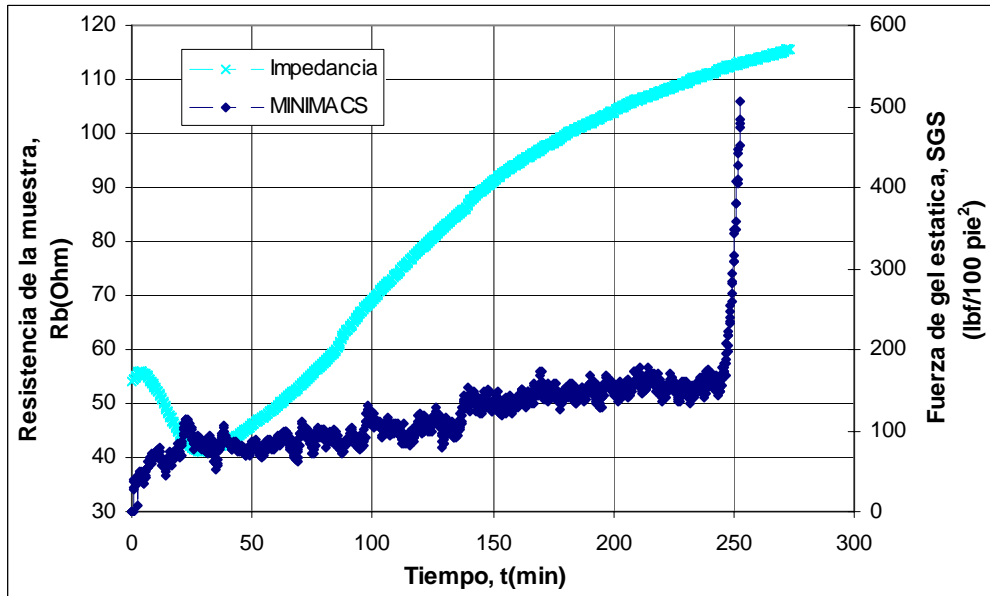


Figura N° 78: Comparación entre las curvas de resistencia de la muestra y de fuerza de gel estática para el sistema D (150 °F y 1000 psi)

Nótese que la principal diferencia entre la forma de la variación de la resistencia en el tiempo para el sistema D con respecto a los sistemas B y C es el tiempo en que la lechada alcanza los 500 SGS, el cual es mucho mayor para el sistema estudiado que para los discutidos anteriormente, lo cual permitió que la curva se desarrollara mucho más allá del final del periodo del calentamiento. Esto permitió observar un comportamiento de estabilización de la resistencia luego de los 250 minutos, lo cual permite deducir que el cambio de líquido a sólido para esta muestra es tan rápido que hace que la resistencia del sistema tienda a un valor constante una vez que se ha gelificado la muestra.

7.6.- Determinación de correlaciones.

Para la etapa de determinación de las correlaciones entre la resistencia y la fuerza de gel estática, se procedió a la normalización de cada curva obtenida para todos los sistemas, posteriormente se graficó la curva fuerza de gel estática en función a la resistencia de la muestra y se hizo un ajuste no lineal de la misma mediante el uso del software XLSTAT® Pro, el cual permite usar regresiones no lineales para ajustar los datos experimentales a modelos de funciones preestablecidas.

Es necesario destacar que se empleó este procedimiento porque no fue posible linealizar las curvas de fuerza de gel estática en función de la resistencia. De igual manera es importante precisar que se probó con todas las funciones predeterminadas en el software y que el mejor ajuste encontrado es el mostrado en la presente investigación. Esta selección se basó en el análisis del coeficiente de correlación y de la evolución de los residuales (ver Apéndice I). Específicamente se seleccionaron aquellos ajustes en los que el coeficiente de correlación fuese más cercano a 1 y cuya gráfica de residuales estuviese más distribuida alrededor del cero.

7.6.1.- Blanco A.

Para el caso del blanco A se presenta en la Figura N° 79, una gráfica comparativa de las curvas normalizadas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la

muestra, en la cual se puede apreciar el comportamiento de dichas curvas con los cambios de temperatura. Es importante mencionar que no se usaron los datos de la prueba realizada a 100 °F, debido a que no se disponía de datos de fuerza de gel confiables, ya que el equipo había presentado algunas fallas durante la realización de dicha prueba.

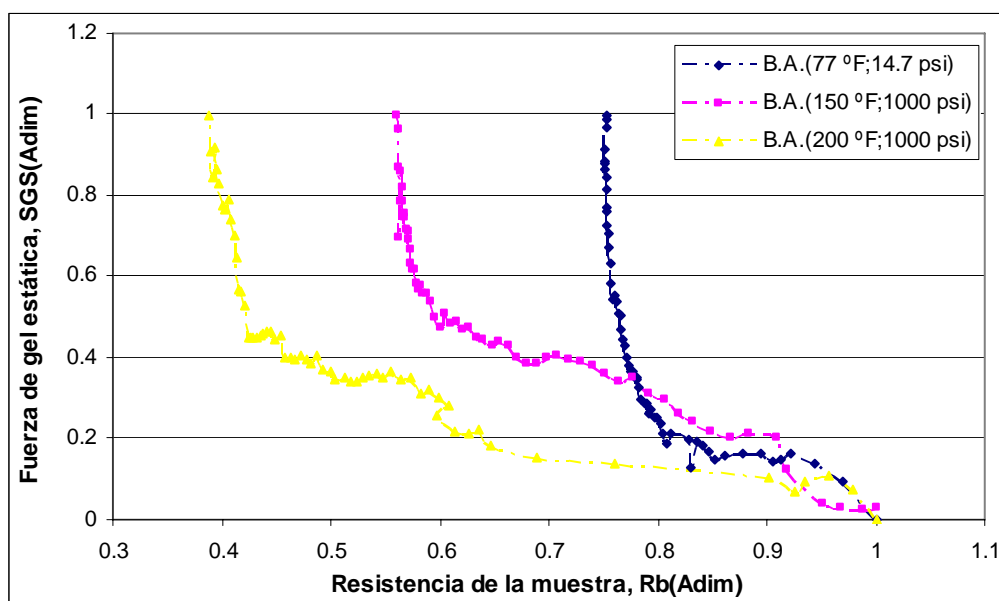


Figura N° 79: Curvas normalizadas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el blanco A.

Como puede apreciarse en la gráfica anteriormente mostrada, las curvas se mueven gradualmente hacia la izquierda de la figura, como una función del aumento de la temperatura, en tal sentido, luego de diferentes intentos de ajustar las curvas a un modelo no lineal, se determinó que el modelo que mejor simula los datos presentados en la Figura N° 49 es de la siguiente forma (ver Apéndice I):

$$SGS = 500 * \frac{Pr1 * Rb}{Pr2 + Rb} \quad (31)$$

Donde:

SGS : Fuerza de gel estática, (lbf/100 pie²)

Rb : Resistencia de la muestra, (Adim)

Pr1: Parámetro N° 1, (Adim)

Pr2: Parámetro N° 2, (Adim)

Para verificar lo anteriormente presentado, se muestra en la Tabla N° 16 el resumen de los ajustes realizados a las curvas de la Figura N° 79, sin embargo la información suplementaria respecto a los ajustes realizados se encuentra en el Apéndice I.

Tabla N° 16: Ajustes realizados a las curvas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el blanco A

Temperatura (°F)	Pr1 (Adim)	Pr2 (Adim)	Coefficiente de correlación (Adim)
77	1.8899×10^{-2}	-7.3589×10^{-1}	0.981
150	9.2999×10^{-2}	-4.9774×10^{-1}	0.947
200	1.0244×10^{-1}	-3.4734×10^{-1}	0.969

A fin de evaluar cual es el efecto de la temperatura sobre los parámetros del modelo, se presenta en la Figura N° 80 la variación de dichos parámetros en función de la temperatura, con el objetivo de identificar cómo está involucrada la misma en el modelo propuesto.

En ese sentido, tal y como puede apreciarse en la mencionada figura, si existe una relación entre la temperatura de la prueba y el valor de los parámetros involucrados en el modelo. En el caso del parámetro 1, la variación se representa perfectamente mediante un polinomio de 2^{do} orden, en cambio, para el parámetro 2 esta dependencia es función lineal de la temperatura.

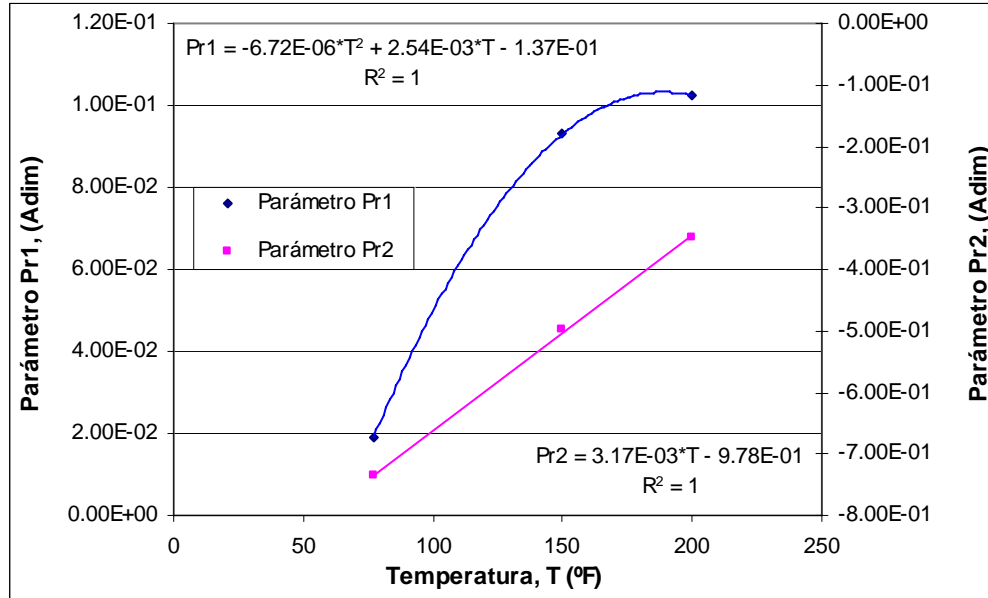


Figura N° 80: Efecto de la temperatura sobre el valor de los parámetros del modelo estudiado para el blanco A.

En función de lo antes mostrado, se puede concluir que se obtuvo un modelo que es capaz de simular el comportamiento de gelificación del blanco A, a partir de los datos normalizados de la curva de variación de resistencia eléctrica de la muestra en función del tiempo, en un rango de temperaturas que van desde 77 °F hasta 200 °F. Para ello es necesario determinar primero los parámetros del modelo, los cuales son función de la temperatura mediante el uso de la Figura N° 80 y luego sustituir los datos obtenidos mediante las pruebas de impedancia en la ecuación 31.

7.6.2.- Blanco B.

Para el blanco B se presenta en la Figura N° 81, una gráfica comparativa de las curvas normalizadas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra, en la cual se puede apreciar el comportamiento de dichas curvas con los cambios de temperatura. Es importante mencionar que no se usaron los datos de la prueba realizada a 150 °F, debido a que no se disponía de datos de fuerza de gel, ya que el equipo había presentado algunas fallas durante la realización de dichas pruebas.

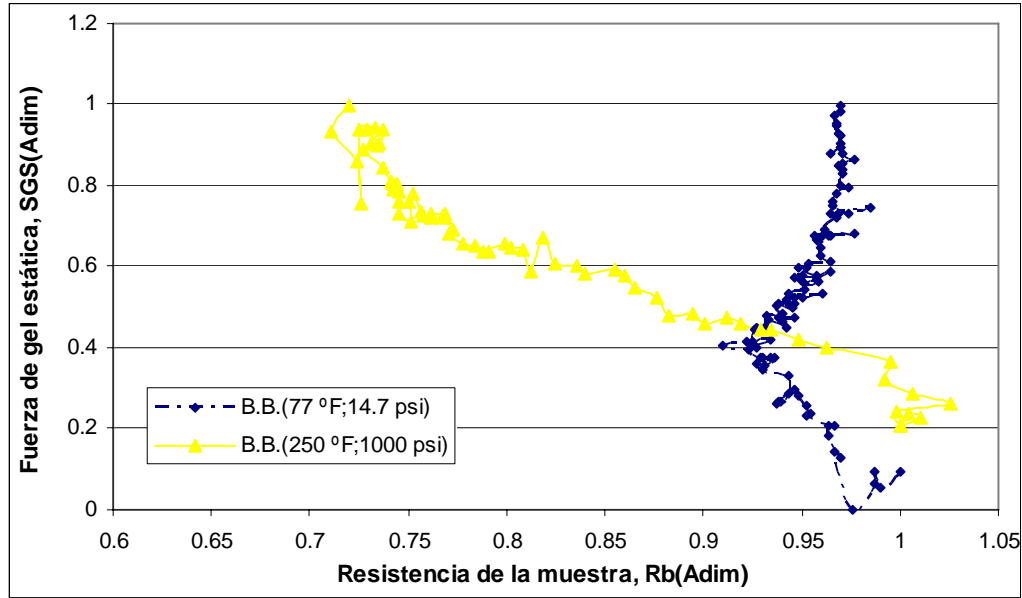


Figura N° 81: Curvas normalizadas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el blanco B.

Nótese el comportamiento de la curva correspondiente a las pruebas a 77 ° F, la cual muestra una forma que no se ajustó a ningún modelo, sin embargo, la curva generada a 250 °F se ajustó bastante bien al modelo planteado en la ecuación 31, en tal sentido, se presenta en la Tabla N° 17 un sumario de los ajustes realizados a este blanco con respecto al modelo de la ecuación 31, en el que se puede observar que el coeficiente de correlación de la curva a 77 °F no dio resultados satisfactorios.

Tabla N° 17: Ajustes realizados a las curvas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el blanco B

Temperatura (°F)	Pr1 (Adim)	Pr2 (Adim)	Coefficiente de correlación (Adim)
77	6.4351×10^{-1}	1.1353×10^{-1}	0.316
250	1.4299×10^{-1}	-6.1205×10^{-1}	0.957

El hecho de que la curva a 77 °F no se haya podido ajustar al modelo propuesto para los blancos se puede justificar en el comportamiento de la resistencia que para esta prueba presentó una alta variabilidad, por lo que se requiere llevar a cabo más

experimentos tanto de impedancia como del MINIMACS a fin de caracterizar mejor este sistema.

En vista de lo presentado anteriormente, ya que el modelo de la ecuación 31 se ajustó bastante bien a las curvas presentadas para el blanco A y además pudo simular exitosamente el comportamiento de la curva correspondiente a 250 °F para el blanco B, se puede suponer que dicho modelo es capaz de correlacionar los datos de resistencia eléctrica obtenidos mediante las pruebas de impedancia con los datos de fuerza de gel estática obtenidos a partir del MINIMACS para las lechadas de cemento sin aditivos.

7.6.3.- Sistema A.

Al igual que para los blancos presentados anteriormente, se realizó un estudio del cambio de las curvas normalizadas de fuerza de gel estática en función de la resistencia eléctrica del sistema A. En tal sentido se presenta en la Figura N° 82 las curvas antes mencionadas para el sistema en estudio.

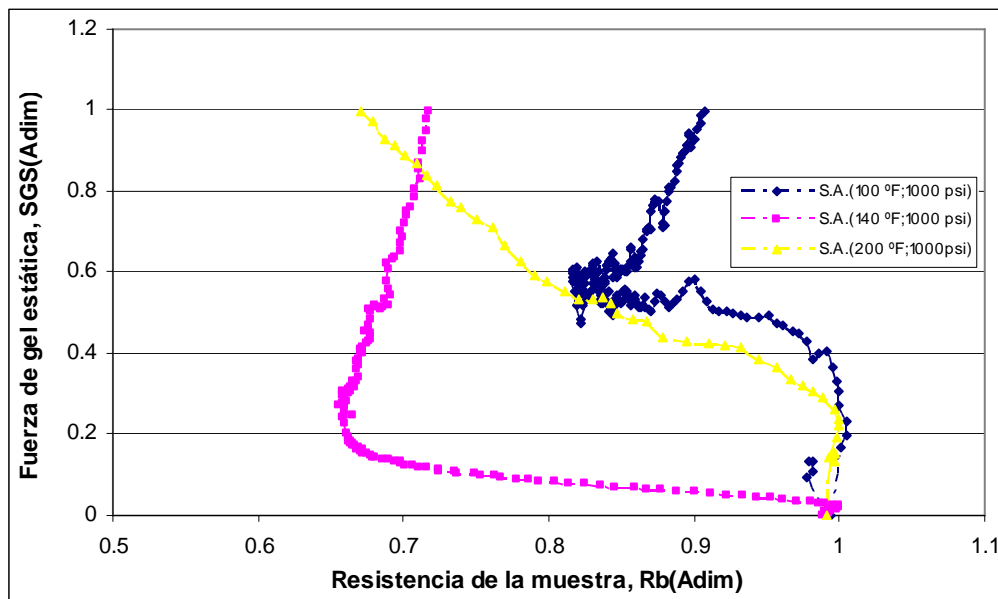


Figura N° 82: Curvas normalizadas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el sistema A.

Para las curvas mostradas en la Figura N° 82 se efectuó el procedimiento de ajuste a diferentes modelos, sin embargo no se encontró un ajuste satisfactorio para las curvas correspondientes a 100 °F y 140 °F, lo cual se debió fundamentalmente al comportamiento de las gráficas mencionadas, por otro lado se pudo ajustar la curva correspondiente a 200 °F al modelo planteado en la ecuación 31 (ver Apéndice I), de esta manera, se presenta en la Tabla N° 18 un sumario de los ajustes realizados a las curvas mostradas en la figura anterior con respecto al modelo planteado en la ecuación 31. Nótese que los coeficientes de correlación obtenidos no fueron satisfactorios para el caso de las curvas a 100 °F y 140 °F.

Tabla N° 18: Ajustes realizados a las curvas de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el sistema A

Temperatura (°F)	Pr1 (Adim)	Pr2 (Adim)	Coefficiente de correlación (Adim)
100	2.6066×10^{-1}	-4.7676×10^{-1}	0.266
140	8.0431×10^{-2}	-5.2523×10^{-1}	0.411
200	1.3396×10^{-1}	-5.9227×10^{-1}	0.926

7.6.4.- Sistema B.

Se presenta en la Figura N° 83 la curva normalizada de fuerza de gel estática en función de la resistencia eléctrica para este sistema, cuantificada a 115 °F y 1000 psi, en la que se puede observar que esta formulación no presentó ningún tipo de correlación ya que la forma de la curva no lo permitió. Para este caso se intentó ajustar dicho comportamiento a los diferentes modelos preestablecidos en el software utilizado, pero ninguno se correlacionó satisfactoriamente, por lo que no se pudo presentar un modelo que simulara el comportamiento de esta lechada.

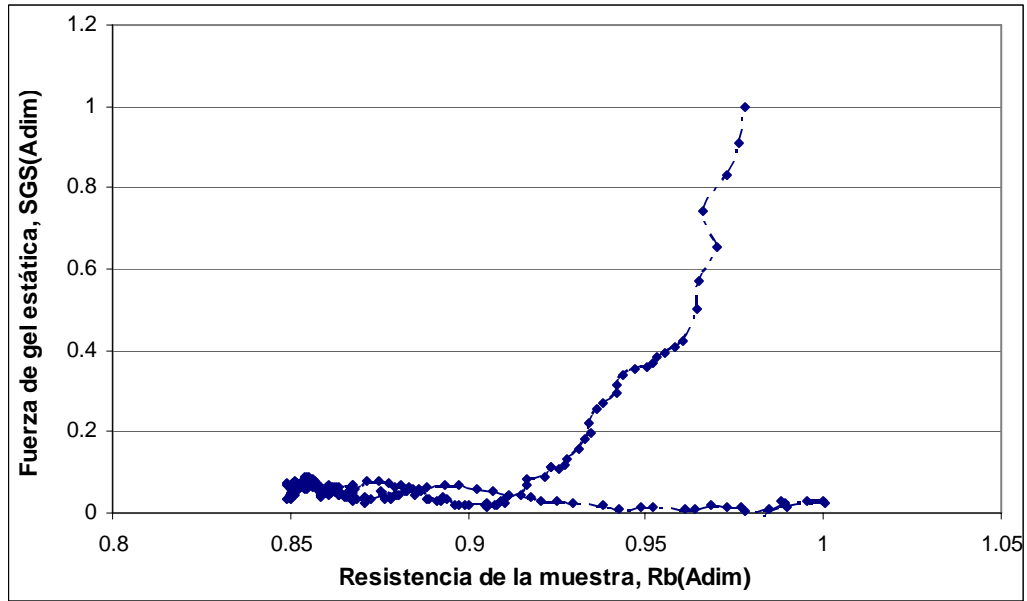


Figura N° 83: Curva normalizada de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el sistema B (115 °F y 1000 psi).

7.6.5.- Sistema C.

En el caso de este sistema, si se encontró un modelo que ajusta los datos experimentales obtenidos, en tal sentido se presenta en la Figura N° 84 la curva normalizada de fuerza de gel estática en función de la resistencia eléctrica de la muestra, cuantificada a 270 °F y 1000 psi. La mencionada curva se correlacionó muy bien con un modelo mucho más complicado que el presentado en la ecuación 31, dicho modelo consta de 6 parámetros y sólo se ajusta bien a los datos de esta lechada en específico y a las condiciones de presión y temperatura mencionadas anteriormente (ver Apéndice I). La forma matemática del modelo encontrado se presenta a continuación, y el mismo alcanzó un coeficiente de correlación de 0.987:

$$SGS = 500 * \left[\frac{Exp(Pr1 + Rb * Pr2)}{(Rb + 1)^{Pr3}} + \frac{Exp(Pr4 + Rb * Pr5)}{(Rb + 1)^{Pr6}} \right] \quad (32)$$

Donde:

SGS : Fuerza de gel estática, (lbf/100 pie²)

Rb : Resistencia de la muestra, (Adim)

Pr1 : Parámetro N° 1, (-21.415)

Pr2 : Parámetro N° 2, (-855.733)

Pr3 : Parámetro N° 3, (-1074.000)

Pr4 : Parámetro N° 4, (-5.214)

Pr5 : Parámetro N° 5, (-17.782)

Pr6 : Parámetro N° 6, (-28.663)

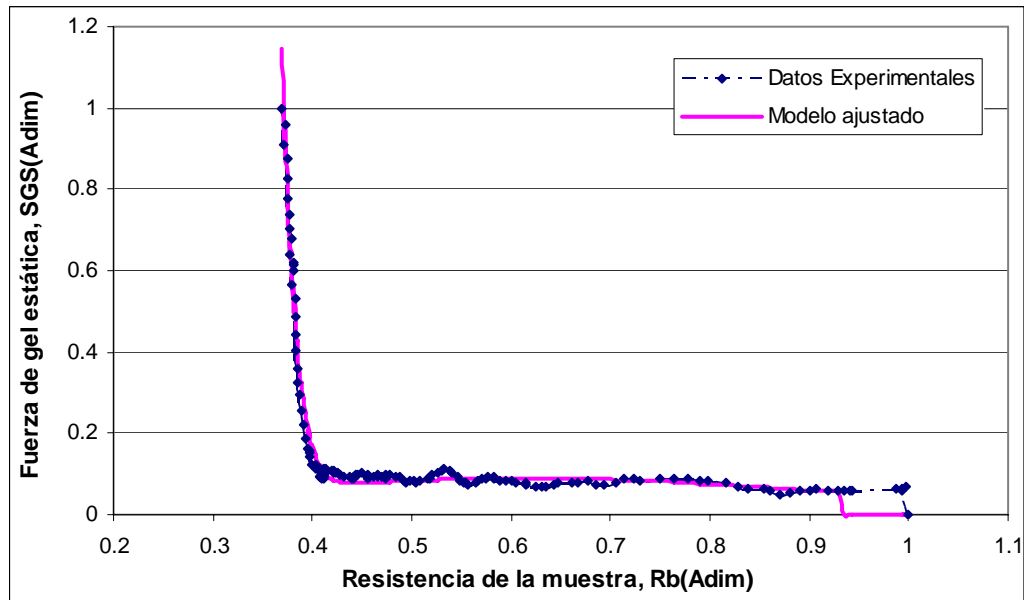


Figura N° 84: Curva normalizada de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el sistema C (270 °F y 1000 psi).

Es importante destacar que esta lechada tiene una gran cantidad de aditivos, los cuales son los que permiten que la misma presente el comportamiento de gelificación planteado en secciones anteriores, es por ello que se propone el modelo de la ecuación 32, ya que el mismo es capaz de adaptarse a diferentes tipos de curvas debido a la gran cantidad de parámetros con los que cuenta.

7.6.6.- Sistema D.

Para este sistema, al igual que en el caso anterior, se encontró un modelo que ajusta los datos experimentales obtenidos, en tal sentido se presenta en la Figura N° 85 la curva normalizada de fuerza de gel estática en función de la resistencia eléctrica de la muestra, cuantificada a 150 °F y 1000 psi. Se determinó que el mejor ajuste para los datos de la mencionada figura corresponde al modelo presentado en la ecuación 32 (ver Apéndice I), con el que se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.951.

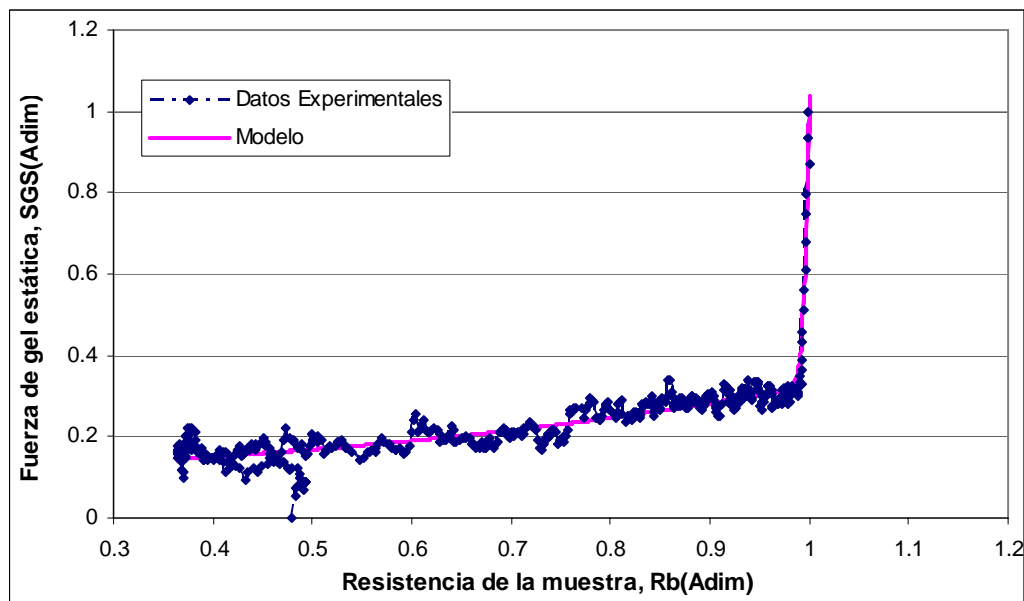


Figura N° 85: Curva normalizada de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el sistema D (150 °F y 1000 psi).

De igual forma se presentan en la Tabla N° 19 los valores de los parámetros de la ecuación 32 que correlacionan la curva mostrada en la Figura N° 85.

Tabla N° 19: Ajuste realizado a la curva de fuerza de gel estática en función de la resistencia de la muestra para el sistema D

Parámetro	Valor
Pr1	-458.399
Pr2	-276.086
Pr3	-1059.130
Pr4	-2.205
Pr5	2.477
Pr6	2.008

En este punto, es importante hacer algunas consideraciones respecto a lo discutido anteriormente para los diferentes blancos y sistemas estudiados. En resumen se puede decir que se encontraron dos modelos de correlación para los datos de fuerza de gel estática y de resistencia eléctrica de la muestra, el primero de ellos consta de dos parámetros y se ajustó satisfactoriamente a todas las curvas del blanco A y a las curvas de alta temperatura en el blanco B y el sistema A respectivamente. El segundo corresponde a un modelo de seis parámetros, el cual es mucho más complejo y se adaptó a los sistemas cementantes C y D, los cuales presentaron un comportamiento de gelificación especial.

En cuanto a las curvas que no proporcionaron ningún tipo de información respecto a la correlación entre los datos, se puede decir que una de las principales causas de que las mismas tuviesen ese comportamiento fue el hecho de que los patrones de calentamiento en la celda de impedancia electroquímica aún no se encuentran completamente caracterizados, lo cual afecta en gran medida la toma de dichos datos, de igual manera es importante hacer énfasis en la necesidad de tener curvas de fuerza de gel estática lo más confiables posible, ya que de ellas depende la capacidad de esta metodología para obtener buenas correlaciones.

En tal sentido, a pesar de que se encontraron diversas formas de correlacionar los datos experimentales, es necesario acotar que se requieren más estudios de este tipo,

tanto para cementos puros como para diferentes sistemas cementantes, antes de asegurar que los modelos propuestos son los definitivos para simular el comportamiento del sistema. De igual forma se recomienda hacer estudios tendientes a identificar comportamientos específicos de las curvas de resistencia eléctrica de la muestra que permitan determinar parámetros tales como el inicio y el fin del tiempo de transición directamente sobre las curvas de impedancia sin necesidad de hacer una correlación para calcular fuerza de gel estática.

8.- CONCLUSIONES

- ◆ El uso de mediciones de impedancia electroquímica, ya sea a frecuencia simple o haciendo barridos de frecuencia tiene una gran potencialidad como técnica para correlacionar la fuerza de gel estática en lechadas de cemento antimigratorias para pozos petroleros.
- ◆ Las propiedades físicas de los diferentes sistemas estudiados se encuentran enmarcadas dentro de los rangos establecidos por la normativa API.
- ◆ Los resultados de las pruebas de impedancia arrojados por el sistema de medición empleando las celdas #1 y #2 son confiables, ya que se pudo reproducir resultados reportados en la bibliografía.
- ◆ El diseño de los electrodos de las diferentes celdas incide en gran medida en la disminución de la influencia de elementos parásitos que distorsionan las mediciones.
- ◆ Todas las celdas empleadas en la presente investigación presentan influencias de elementos parásitos, especialmente la celda #3, en donde las mencionadas distorsiones son mayores debido a problemas en el diseño de la misma.
- ◆ Se pudo evaluar el desarrollo de la fuerza de gel estática para las diferentes formulaciones estudiadas en la presente investigación, notándose distintos comportamientos como función de los aditivos agregados a cada muestra.
- ◆ La metodología de impedancia electroquímica desarrollada durante la presente investigación para la caracterización de lechadas de cemento en condiciones de alta temperatura arrojó buenos resultados ya que el sistema fue capaz de reproducir el comportamiento teórico esperado para estos sistemas.
- ◆ Se pudo identificar diversas etapas de la reacción de hidratación a partir de los datos de impedancia obtenidos para el blanco A, lo cual es un buen indicativo de que este tipo de mediciones es capaz de ayudar en los estudios referentes a la química del cemento.

-
-
- ◆ El control de la temperatura es un factor crucial a tomar en cuenta cuando se efectúan pruebas de impedancia, ya que las mismas se ven altamente afectadas por el calentamiento de la muestra.
 - ◆ Las curvas de fuerza de gel estática en función de la resistencia eléctrica de la muestra no son linealizables, lo cual obliga al uso de regresiones no lineales para poder tratar estos datos.
 - ◆ En lechadas de cemento puras se pueden correlacionar los valores de resistencia eléctrica del material y de fuerza de gel estática como una función de dos parámetros, los cuales se pueden ajustar a fin de corregir las curvas por efectos de temperatura.
 - ◆ De los sistemas antimigratorios estudiados sólo se pudieron correlacionar los sistemas A, C y D, el primero a un modelo de dos parámetros y los dos últimos con una función de seis parámetros, la cual es mucho más robusta y más versátil a la hora de modelar los datos experimentales, sin embargo no se puede asegurar que la misma funciona para otras formulaciones antimigratorias.

9.- RECOMENDACIONES

- ◆ Realizar estudios con la finalidad de caracterizar la geometría de la celda que se empleó en la presente investigación (celda #3), partiendo del hecho de que el área de flujo de cargas eléctricas no es constante entre los dos electrodos.
- ◆ Llevar a cabo un estudio de caracterización de los elementos de circuito parásitos presentes en la celda #3.
- ◆ Rediseñar completamente el sistema de calentamiento del equipo, ya que durante la realización de las pruebas de impedancia se evidenció la necesidad de un control robusto de temperatura a fin de evitar alteraciones en las mediciones.
- ◆ Rediseñar la celda #3, orientando los esfuerzos a hacer que la misma sea más fácil de operar y ergonómica ya que la masa de dicha celda vacía es muy alta (16.5 kg).
- ◆ Evaluar la posibilidad del uso de las medidas de impedancia electroquímica para la determinación de otras propiedades físicas de lechadas de cemento tales como resistencia a la compresión.
- ◆ Evaluar la posibilidad del uso de medidas de impedancia electroquímica como una herramienta para llevar a cabo diversos tipos de estudios sobre la química del cemento.
- ◆ Elaborar un banco de pruebas de impedancia electroquímica más amplio, que abarque gran cantidad de sistemas cementantes con la finalidad de hallar una correlación para cementos aditivados que satisfaga todos los posibles casos.
- ◆ Hacer estudios tendientes a identificar comportamientos específicos de las curvas de resistencia eléctrica de la muestra en función del tiempo que permitan determinar parámetros como el inicio y el fin del tiempo de transición sin necesidad de correlacionar los mismos a partir de los datos obtenidos con el MINIMACS.

10.-BIBLIOGRAFÍA

- [1].- M-I L.L.C. *“Drilling Fluids Engineering Manual”*. 2001.
- [2].- BARBERII, Efraín. *“La industria venezolana de los hidrocarburos”*. Ediciones del CEPET, Caracas, Venezuela. 1989.
- [3].- BARBERII, Efraín. *“El Pozo Ilustrado”*. Centro Internacional de Investigación y Desarrollo (CIED), PDVSA. Caracas, Venezuela. 1998.
- [4].- ESPER, Julio. *“El Petróleo II”*. [Documento disponible en línea]. www.monografias.com, consultado: Junio de 2005.
- [5].- PRIETO O., Alí. *“Tecnología aplicada a los Fluidos de Perforación”*. Centro Internacional de Investigación y Desarrollo (CIED), PDVSA. Caracas, Venezuela 1997.
- [6].- TOVAR, José G., *“Diseño de Lodos, Control de Sólidos y Preservación de Propiedades de Rocas Recipientes, para Hoyos No Productores y Para Hoyos Productores”*. PDVSA- INTEVEP. Caracas, Venezuela.
- [7].- MAVERICK ENERGY, Inc. *“Fundamentals of Finding & Producing Oil & Gas in the Illinois Basin ”*. [Documento disponible en línea]. www.maverickenergy.com, consultado: Julio 2005.
- [8].- MOORE, W. *“Fundamentals of rotary drilling: the rotary drilling system, a professional and practical training guide to its equipment, procedures and technology”*. Texas, EE.UU. 1981.
- [9].- NELSON, Erik. *“Well Cementing ”*. Schlumberger Dowell. Sugar Land, Texas, EE.UU. 1990.
- [10].- GOODWIN, K. J. *“Principles of Squeeze Cementing”*. SPE, N° 12603. 1984.
- [11].- BROOKS, F. A. y HAUT, R.C. *“Técnicas de Cementación”*. EXXON Production Research Company. EE.UU., 1978.
- [12].- CULVER, Gene. *“Drilling And Well Construction”*. Geothermal Direct-Use Engineering and Desing Guidebook, 3^{ra} Edición. www.geoheat.oit.edu, Julio 2005.
- [13].- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *“Recommended Practice Testing Well Cements 10B”*. Edición 12. EE.UU. 1997.

-
-
- [14].- SMITH, Dwight. ***“Cementing”***. Monograph Volume 4, SPE. EE.UU. 1990.
- [15].- VÁZQUEZ, Gonzalo; BLANCO, Aiskely; COLINA, Alicia. ***“A methodology to evaluate the gas migration in cement slurries”***. SPE, N° 94901, 2005.
- [16].- STEIN, David y GRIFFIN, Tom. ***“Cement Pulsation Reduces Remedial Cementing Cost”***. Gas Tips. Winter 2003, pg 22.
- [17].- SABINS, Fred; TINSLEY, John; SUTTON, David. ***“Transition Time of Cement Slurries Between the Fluid and Set States”***. SPE, N° 9285, 1982.
- [18].- CHEUNG, P.R.; BEIRUTE, Robert. ***“Gas Flow in Cements”***. SPE, N° 11207, 1985.
- [19].- PORNPOCH, Tiraputra; PATTANAPONG, Thiravutpinyo; SUNCHAI, Pongoraping. ***“Overcoming Shallow-Gas Drilling Difficulties in the Gulf of Thailand”***. SPE, N° 87179, 2004.
- [20].- SABINS, Fred; WIGGINS, M.L. ***“Parametric Study of Gas Entry Into Cemented Wellbores”***. SPE, N° 28472, 1997.
- [21].- ECONOMIDES, M; WATTER, L y DUNN-NORMAN, S. ***“Petroleum well construction”***. John wiley & sons, Inglaterra, 1988.
- [22].- MURRAY, Rogers; DILLENBECK, Robert; RAMY, Eid. ***“Transition Time in Cement Slurries, Definitions and Misconceptions, Related to Annular Fluid Migration”***. SPE, N° 90829, 2004.
- [23].- MACDONALD, J. Ross. ***“Impedance Spectroscopy – Theory, Experiment, and Applications”***. Second Edition. Wiley-Interscience, New York, EE.UU. 2005.
- [24].- GAMRY INSTRUMENTS. ***“Electrochemical Impedance Spectroscopy Primer”***. [Documento disponible en línea].www.gamry.com, consultado: Julio, 2005.
- [25].- COVERDALE, R.T. et al. ***“Interpretation of impedance spectroscopy of cement paste via computer modeling - Part I: Bulk conductivity and offset resistance”***. Journal of Materials Science, Vol. 30, 1995, pgs 712-719.
- [26].- FITZGERALD, A.E. et al. ***“Fundamentos de Ingeniería Eléctrica”***. Cuarta Edición. McGraw-Hill. México, 1976.
- [27].- VLADIKOVA, Daria. ***“The Technique of the Differential Impedance Analysis – Part I: Basics of the Impedance Spectroscopy”***. International Workshop for
-
-

-
-
- Energy Sources: Investigation and Testing. [Documento disponible en línea].
www.bas.bd/cleps/workshop, consultado: Agosto, 2005.
- [28].- GABRIELLI, Claude. *“Use and Application of Electrochemical Impedance Techniques”*. Solartron Instruments. Reporte Técnico N° 24. París, 1997.
- [29].- GABRIELLI, Claude. *“Identification of Electrochemical Processes by Frequency Response Analysis”*. Solartron Instruments. Reporte Técnico N° 004/83. París, 1998.
- [30].- MCCARTER, W.J. *“The Application of Impedance Spectroscopy to cementitious Systems”*. Solartron Instruments. Reporte Técnico N° 29. Edimburgo, 1999.
- [31].- MARQUEZ, Geilhy. *“Evaluación de materiales cementantes para pozos de petróleo y/o gas con propiedades antimigratorias de gas”*. Trabajo Especial de Grado presentado ante la UCV para optar al título de Ingeniero Químico. Caracas, Venezuela, Octubre 2002.
- [32].- SCUDERI, C.; MASON, T.; JENNINGS, M. *“Impedance spectra of hydrating cement pastes”*. Journal of Materials Science, N° 26. 1991, pg 349-353.
- [33].- CRISTENSEN, Bruce et al. *“Impedance Spectroscopy of Hydrating Cement-Based Materials: Measurement, Interpretation, and Application”*. Journal of the American Ceramic Society. Volumen 77. N° 11. 1994.
- [34].- GUANGLING, Song. *“Equivalent circuit model for AC electrochemical impedance spectroscopy of concrete”*. Cement and Concrete Research, N° 30, 2000, pg 1723-1730.
- [35].- VÁZQUEZ, Gonzalo. *“Uso de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica en la Caracterización de Lechadas de Cemento con Propiedades Antimigratorias de Gas Utilizadas en Construcción de Pozos Petroleros”*. Trabajo Especial de Grado presentado ante la UCV para optar al título de Ingeniero Químico. Caracas, Venezuela, Diciembre 2002.
- [36].- HALLIBURTON. *“Manual del Mini Multiple Analyzer Cement Slurry (MINIMACS)”*. Duncan, 1997.
- [37].- **Dielectric Constants of Common Materials**. [Documento disponible en línea].
www.blazelabs.com/dielectric_chart.pdf , Consultado: Octubre, 2005.
-
-

-
-
- [38].- **Resistivity of NaCl Solutions**. [Documento disponible en línea].
www.Content.slb.com/Docs/connect/reference/Chartbook/pdf, Consultado:
Noviembre, 2005.
- [39].- BACKE, K.R.; LILE, O.B.; LYOMV, S.K. “*Characterizing Curing Cement Slurries by Electrical Conductivity*”. SPE, N° 74694, 2001.
- [40].- CABEZA, M. et al. “*Impedance spectroscopy study of hardened Portland cement paste*”. Cement and Concrete Research, N° 32, 2002, pg 881-891.
- [41].- COVERDALE, R.T. et al. “*Interpretation of impedance spectroscopy of cement paste via computer modeling - Part II: Dielectric response*”. Journal of Materials Science, Vol. 29, 1994, pgs 4984-4992.
- [42].- DOTELLI, G.; MARI, C.M. “*The evolution of cement paste hydration process by impedance spectroscopy*”. Materials Science and Engineering, A303, 2001, pg 54-59.
- [43].- KIM, Young-Min, et al. “Study of alinite cement hydration by impedance spectroscopy”. Cement and Concrete Research, N° 33, 2003, pg 299-304.
- [44].- COVERDALE, R.T. et al. “*Electrode configurations and impedance spectra of cement pastes*”. Journal of Materials Science, Vol. 30, 1995, pgs 1217-1224.
- [45].- CRISTENSEN, Bruce et al. “*Microstructural Analysis of Young Cement Pastes Using Impedance Spectroscopy During Pore Solution Exchange*”. Science and Technology Center for Advanced Cement-Based Materials. 1996, 4, 68-75.
- [46].- PING, Gu, et al. “*A.C. IMPEDANCE SPECTROSCOPY (I): A New Equivalent Circuit Model for Hydrated Portland Cement Paste*”. Cement and Concrete Research, N° 22, 1992, pg 833-840.
- [47].- HEWLETT, Peter C. “*LEA’S CHEMISTRY OF CEMENT AND CONCRETE*”. Fourth Edition. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998.
- [48].- LOOTENS, D. et al. “*Gelation, Shear-Thinning and Shear-Thickening in Cement Slurries*”. Oil & Gas Science and Technology, Vol 59, 2004, pg 31-40.

11.-APÉNDICES

APÉNDICE A.

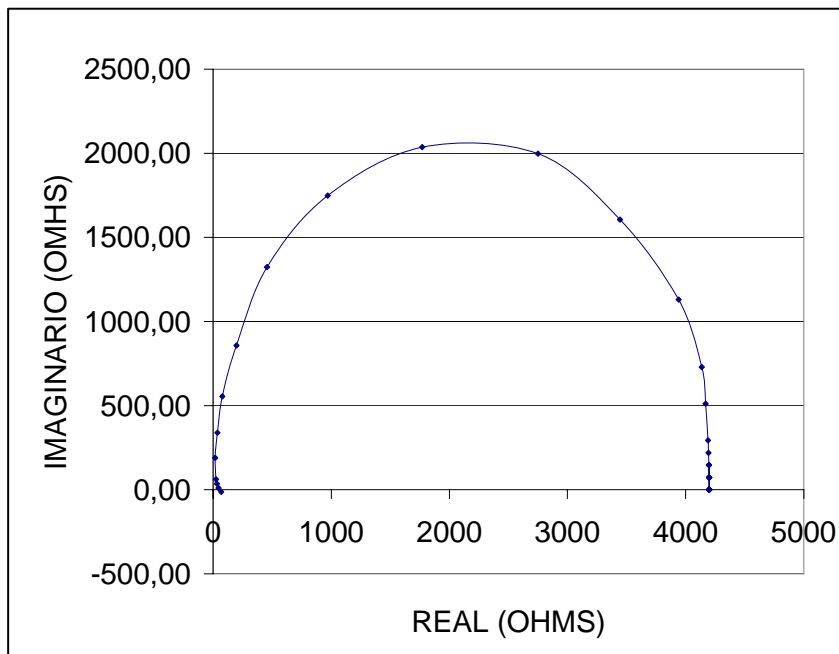


Figura A.1: Diagrama de Nyquist para el agua destilada reportado en la bibliografía. ^[35]

APÉNDICE B

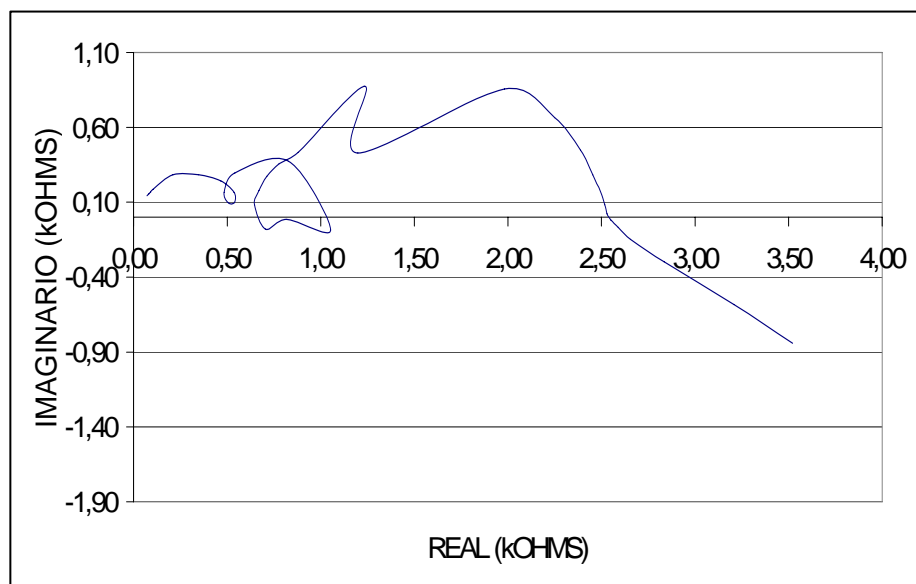


Figura B.1: Diagrama de Nyquist para el agua destilada reportado en la bibliografía, usando la celda #1 con los electrodos sin lijar. ^[35]

APÉNDICE C

APÉNDICE C.1. Cálculo de la constante dieléctrica para el agua destilada.

Recordando la forma de la ecuación 28 se tiene:

$$\varepsilon = \left(2 \cdot \pi \cdot v_{top}\right)^{\left(\frac{2\theta}{\pi}-1\right)} \cdot \left(\frac{L}{R \cdot A \cdot \varepsilon_o}\right) \quad (28)$$

Luego, a partir de la Tabla N° 4 y de la figura N° 25 se obtienen los siguientes datos para el cálculo de la constante dieléctrica del agua destilada usando la celda #1 y el espectro de impedancia presentado en la figura N° 25.

$$v_{top} : 130000 \text{ Hz.}$$

$$\theta : 0 \text{ rad.}$$

$$L : 1.0 \times 10^{-1} \text{ m.}$$

$$R : 315000 \Omega .$$

$$A : 5.332 \times 10^{-4} \text{ m}^2 .$$

$$\varepsilon_o : 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m.}$$

Sustituyendo en la ecuación 28 se tiene:

$$\varepsilon = \left(2 \cdot 3.14 \cdot 130000 \text{ Hz}\right)^{\left(\frac{2 \cdot 0}{3.14}-1\right)} \cdot \left(\frac{1.0 \times 10^{-1} \text{ m}}{315000 \Omega \cdot 5.332 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}}\right)$$
$$\varepsilon = 82.3$$

APÉNDICE C.2. Cálculo del Factor de corrección para la celda #3.

Recordando la forma de la ecuación 29 se tiene:

$$A_{equivalente} = F * A_{real} \quad (29)$$

Luego, a partir de la Tabla N° 8 se obtienen los siguientes datos para el cálculo del factor de corrección geométrico para la celda #3.

$$A_{equivalente} : \quad 3.72 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

$$A_{real} : \quad 7.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2.$$

Sustituyendo en la ecuación 29 y despejando se tiene:

$$F = \frac{A_{equivalente}}{A_{real}} = \frac{3.72 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{7.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2}$$
$$F = 47.4$$

APÉNDICE C.3. Cálculo del factor geométrico a partir de la ecuación de resistividad

Sustituyendo la ecuación 30 en la ecuación 29 se obtiene:

$$F = \frac{L \cdot Rv}{Rb \cdot A_{real}} \quad (33)$$

Posteriormente, a partir de las Tablas N° 4 y 9 se pueden determinar los datos para el cálculo del factor geométrico a partir de la resistividad de soluciones de Cloruro de Sodio usando la celda #3. En este caso se tomaron los datos para el barrido 01

efectuado a la solución de 1000 ppm de Cloruro de Sodio, los cuales se muestran a continuación:

$$L: 4.765 \times 10^{-2} \text{ m.}$$

$$A_{real}: 7.854 \times 10^{-5} \text{ m}^2.$$

$$R_v: 5.40 \text{ } \Omega\text{-m.}$$

$$R_b: 468.8 \text{ } \Omega.$$

Finalmente, sustituyendo en la ecuación 33 se tiene:

$$F = \frac{4.765 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot 5.40 \Omega \cdot \text{m}}{468.8 \Omega \cdot 7.854 \times 10^{-5} \text{ m}^2}$$
$$F = 7.0$$

APÉNDICE D

APENDICE D.1. Metodología para la operación del MINIMACS.

- 1) Armar la celda del equipo.
- 2) Colocar la lechada de cemento a acondicionarse en el consistómetro atmosférico a la temperatura requerida durante 60 minutos.
- 3) Programar el plan de trabajo en el equipo durante ese tiempo.
- 4) Luego de finalizado el tiempo de acondicionamiento, colocar la lechada de cemento en la celda hasta llenarla completamente.
- 5) Cerrar la celda y colocarla dentro de la cámara del equipo.
- 6) Cerrar la cámara del equipo y colocar la termocupla sin fijarla completamente.
- 7) Abrir el paso del agua y aire al equipo.
- 8) Fijar la termocupla cuando se llene completamente la cámara del equipo.
- 9) Colocar en el panel de control el menú start y presionar OK.

APÉNDICE D.2. Metodología para pruebas de impedancia electroquímica.

- 1) Engrasar y armar la celda a usar.
- 2) Programar el analizador de impedancia HP-4192A para la prueba a realizar.
- 3) Inicializar el software de adquisición de datos.
- 4) Colocar recubrimiento a los electrodos e instalar los mismos en la celda.
- 5) Si la muestra requiere acondicionamiento se debe iniciar el mismo con suficiente antelación.
- 6) Efectuar el procedimiento “Open” al equipo HP-4192A.
- 7) Colocar los conectores coaxiales a la celda.
- 8) Colocar la termocupla a la celda e instalar el sistema de calentamiento.
- 9) Efectuar el procedimiento “Short” al sistema.
- 10) Colocar la muestra en la celda.
- 11) Ensamblar todo el sistema.
- 12) Iniciar la adquisición de datos 5 minutos después de agregada la muestra a la celda.
- 13) Iniciar el calentamiento 6 minutos después de agregada la muestra a la celda.
- 14) Iniciar la presurización 6.5 minutos después de agregada la muestra a la celda.
- 15) Una vez finalizada la prueba, se debe detener la adquisición de datos.
- 16) Liberar la presión del sistema.
- 17) Desinstalar el sistema de calentamiento.
- 18) Desarmar el sistema y retirar la muestra de la celda.
- 19) Lavar la celda.

APÉNDICE E

Pruebas de repetibilidad elaboradas con el MINIMACS.

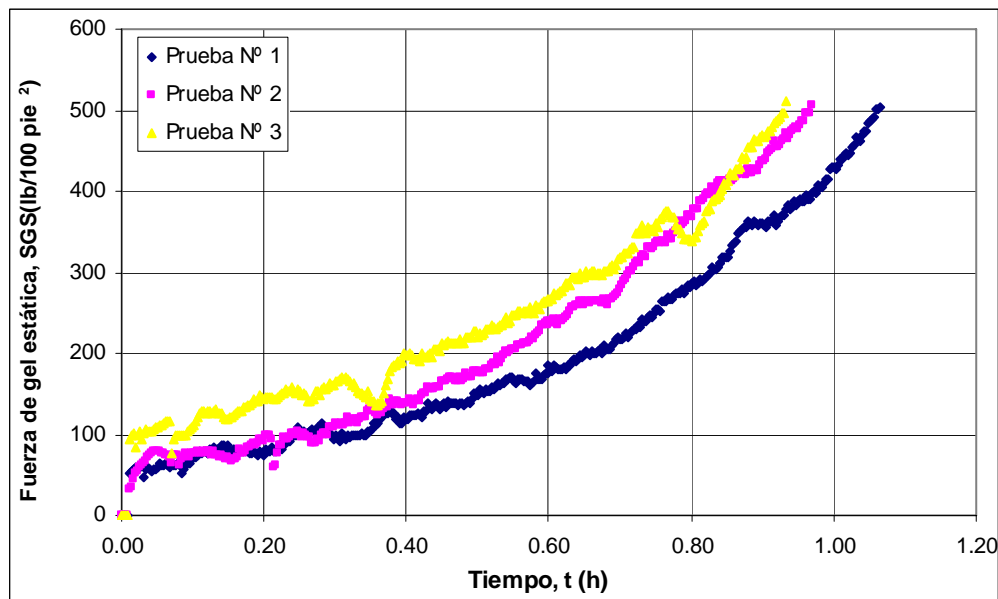


Figura E.1: Pruebas de repetibilidad de desarrollo de fuerza de gel estática elaboradas con el MINIMACS para el Blanco A (77 °F y 14.7 psi)

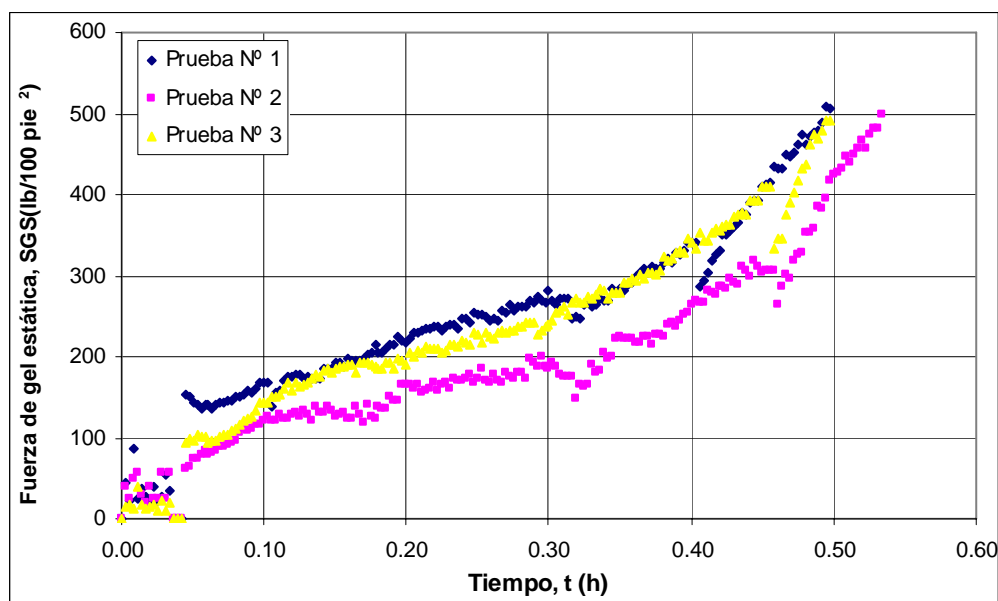


Figura E.2: Pruebas de repetibilidad de desarrollo de fuerza de gel estática elaboradas con el MINIMACS para el Blanco A (150 °F y 1000 psi)

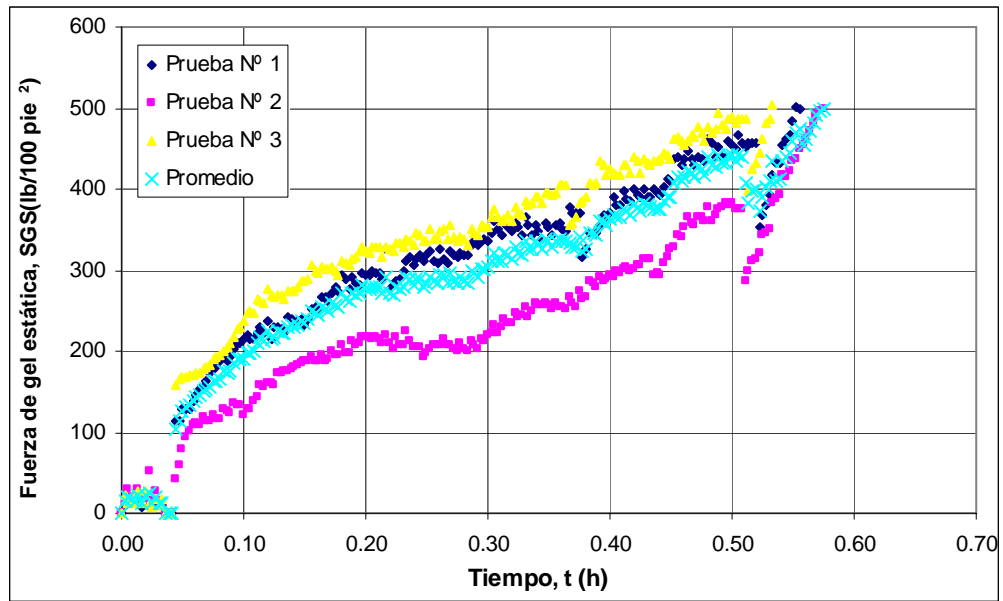


Figura E.3: Pruebas de repetibilidad de desarrollo de fuerza de gel estática elaboradas con el MINIMACS para el Blanco B (250 °F y 1000 psi)

APÉNDICE F

Química del cemento Portland.

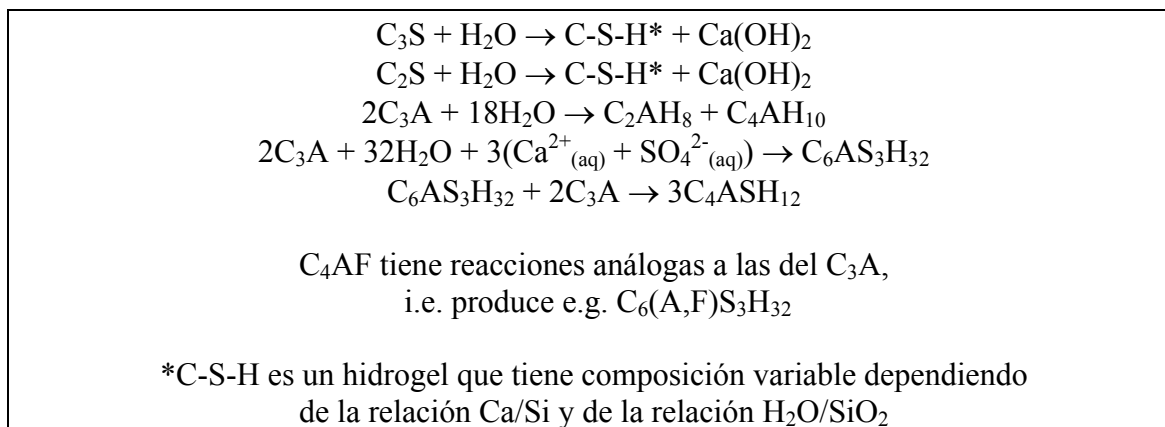


Figura F.1: Principales reacciones de las fases del cemento Portland

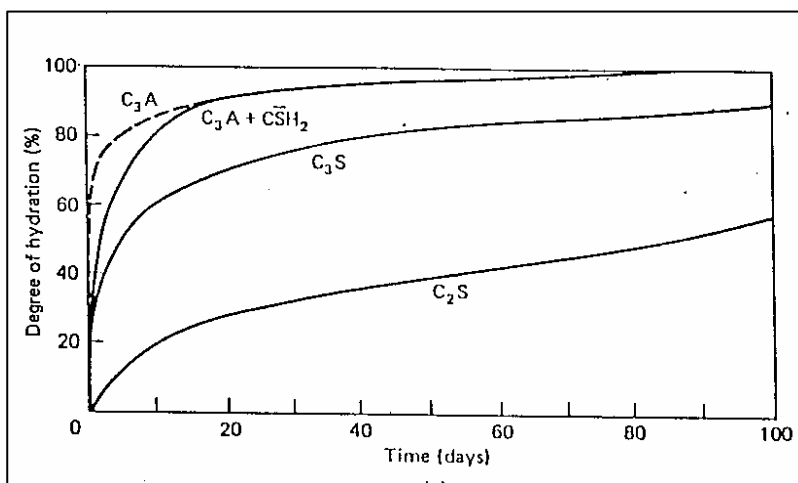


Figura F.2: Velocidades de hidratación de las fases individuales del cemento Portland

APÉNDICE G

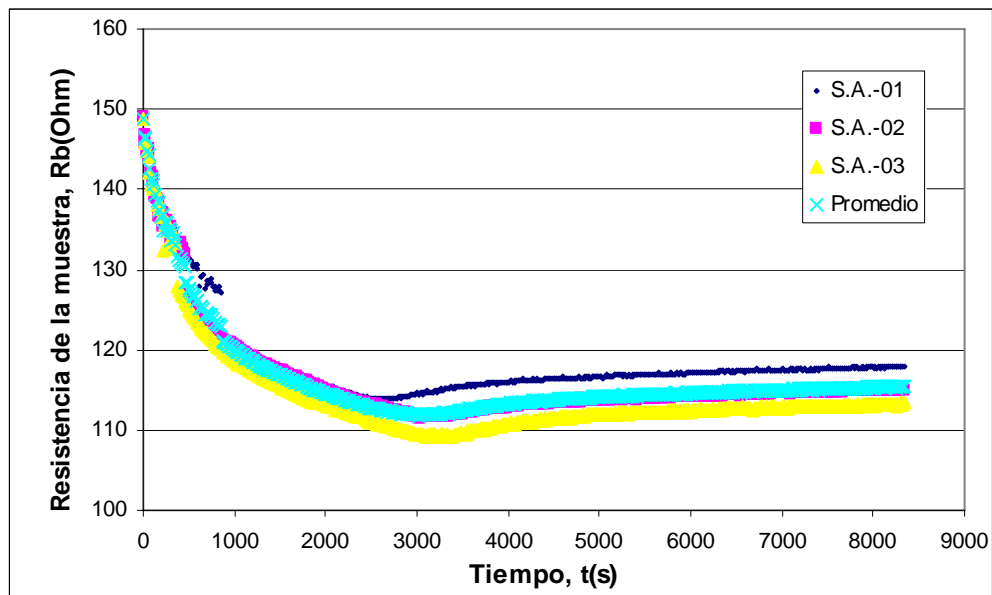


Figura G.1: Pruebas de repetibilidad para el Blanco A (77 °F y 14.7 psi) obtenidas mediante la aplicación de las experiencias de impedancia electroquímica.

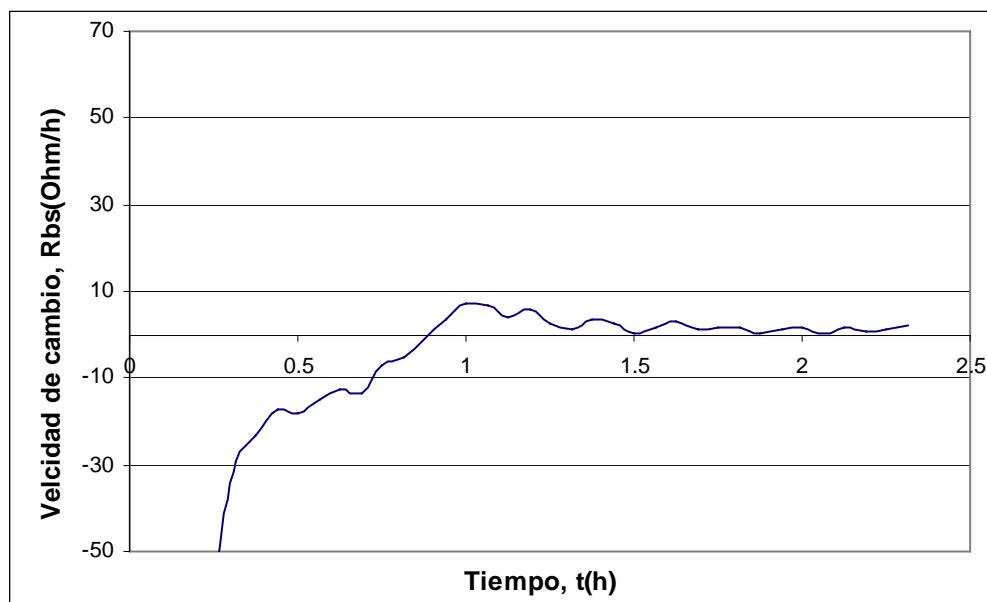


Figura G.1: Curva de la primera derivada de la resistencia eléctrica en función del tiempo para el Blanco A (77 °F y 14.7 psi)

APÉNDICE H

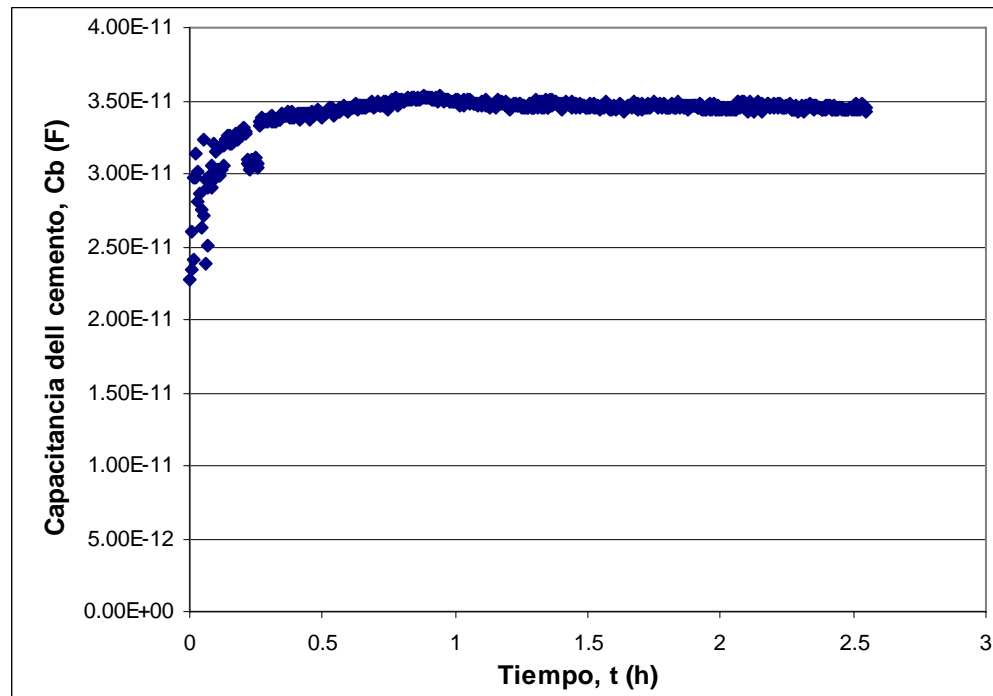


Figura H.1: Variación de la capacitancia del cemento en función del tiempo para el Blanco A (77 °F y 14.7 psi)

APÉNDICE I

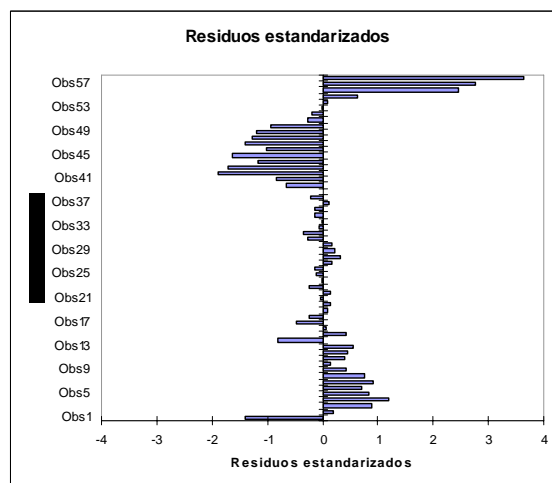
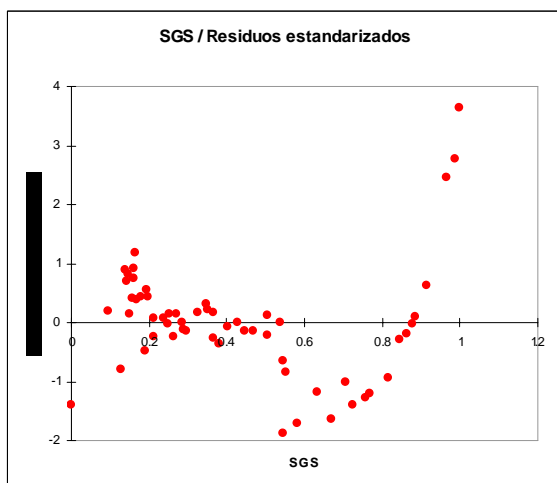
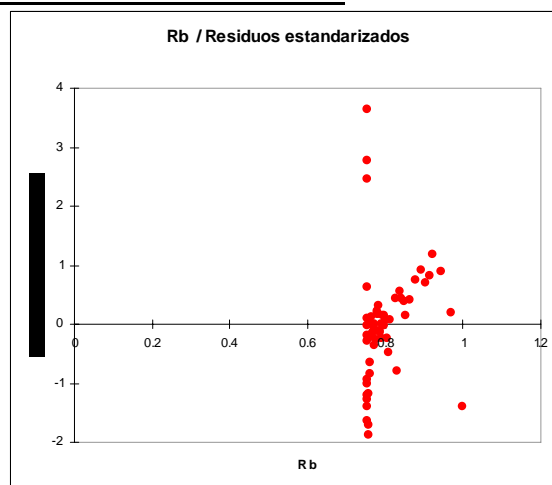
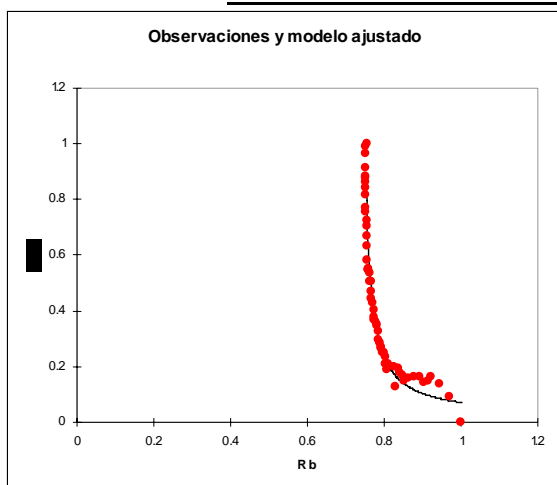
Gráficas de los ajustes para todos los sistemas obtenidas con XLSTAT®.

APÉNDICE I.1. Blanco A (77 °F y 14.7 psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$0.018899179224436 * X1 / (-0.73589403441463 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.981
R ² (coeficiente de determinación)	0.962
SCR	0.166

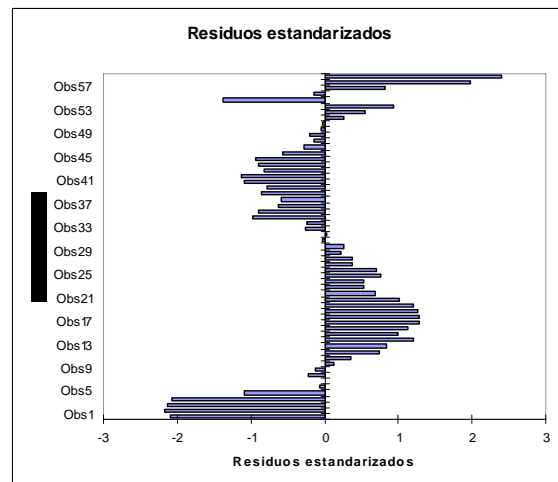
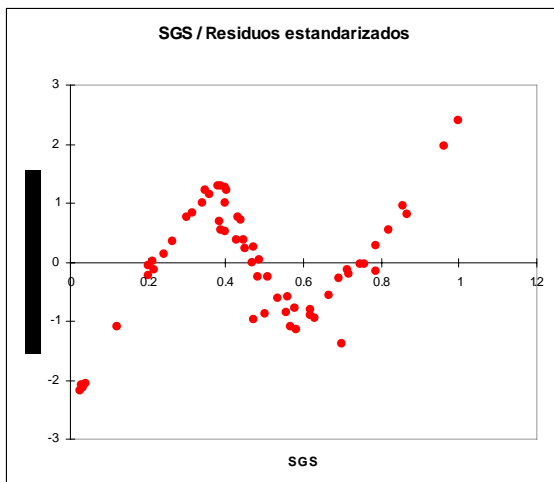
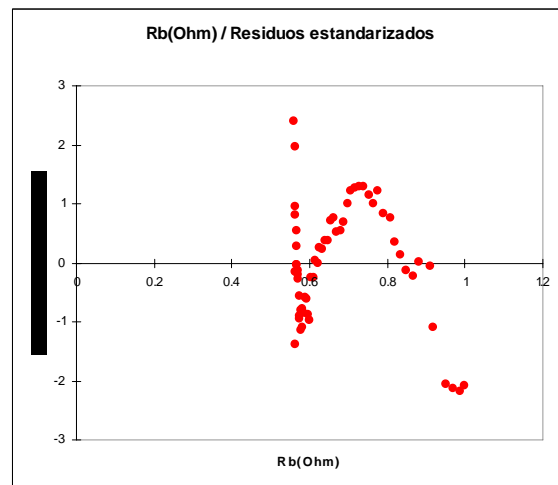
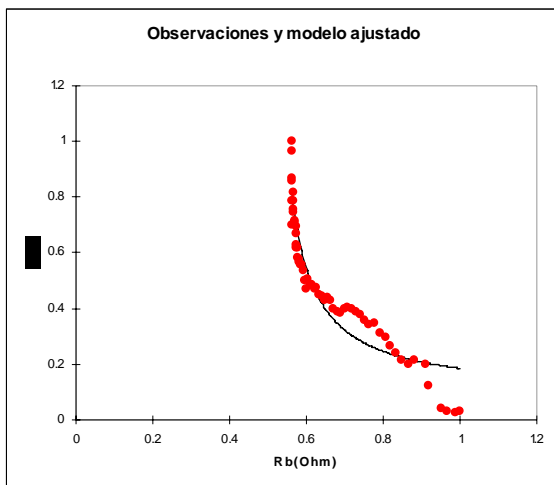


APÉNDICE I.2. Blanco A (150 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$9.29985852171421E-02 * X1 / (-0.497744267242815 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.947
R ² (coeficiente de determinación)	0.897
SCR	0.320

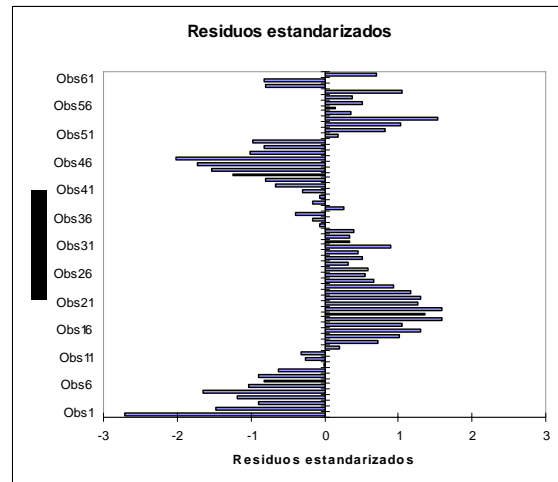
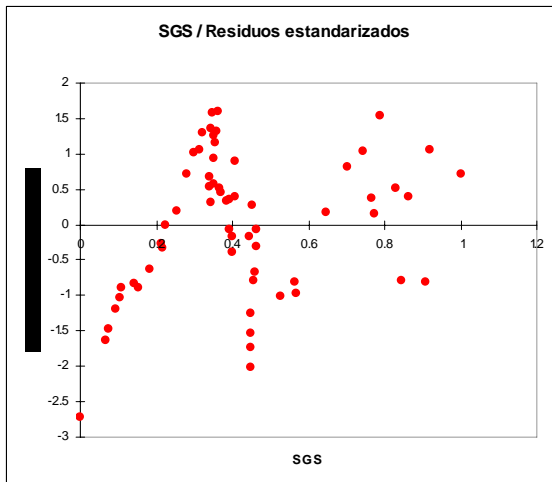
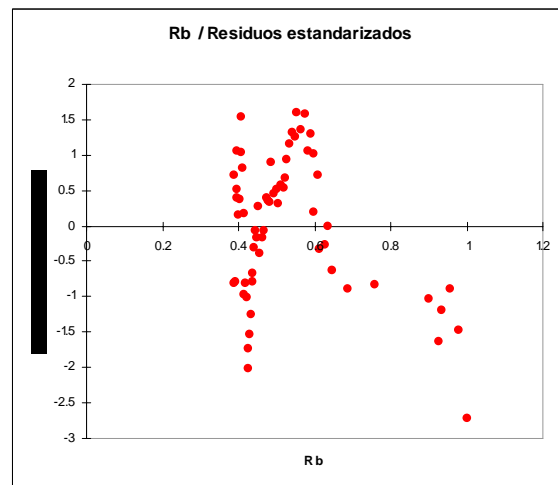
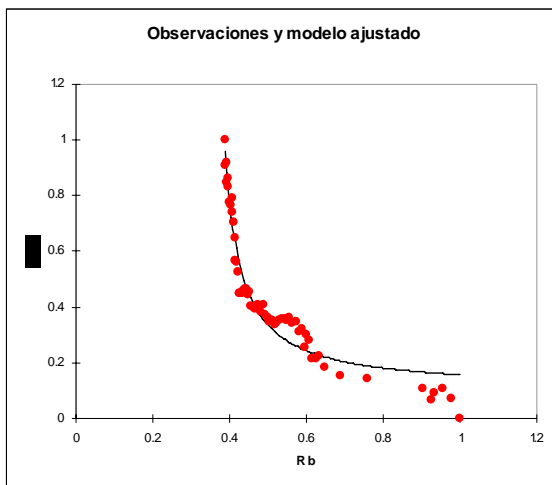


APÉNDICE I.3. Blanco A (200 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$0.102443283059578 * X1 / (-0.347337665145534 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.969
R ² (coeficiente de determinación)	0.939
SCR	0.197

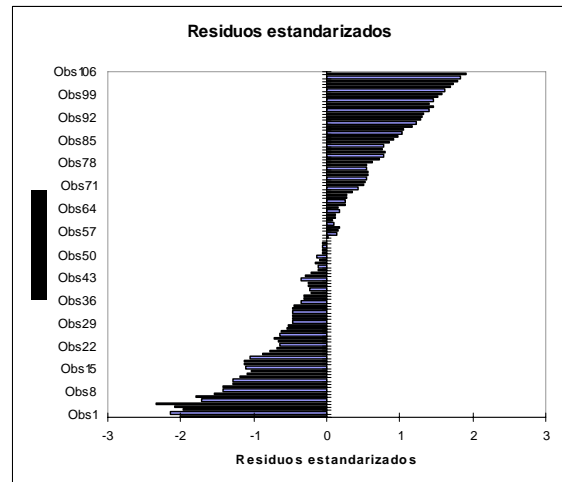
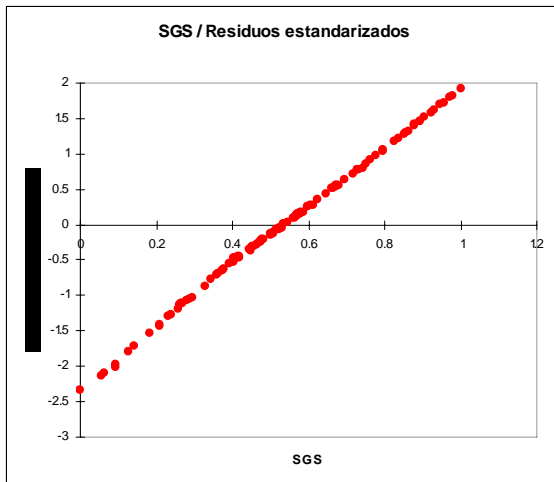
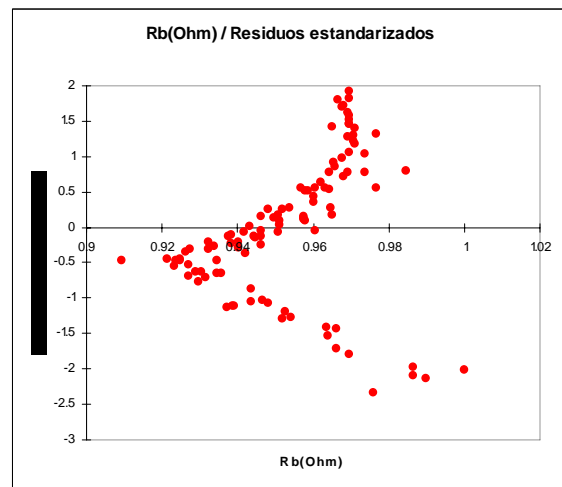
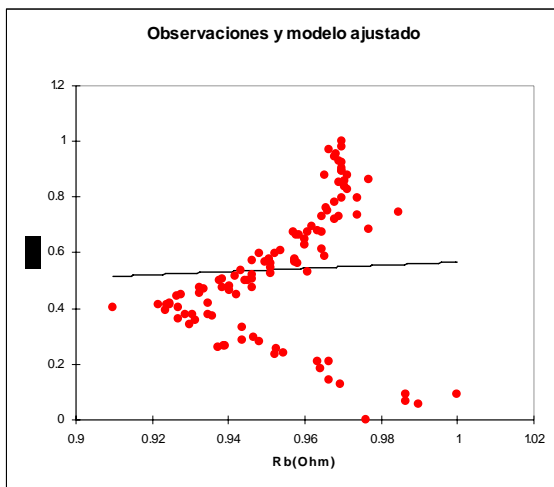


APÉNDICE I.4. Blanco B (77 °F y 14.7psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$64351357492.8674 * X1 / (113530292433.398 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.316
R ² (coeficiente de determinación)	0.100
SCR	5.793

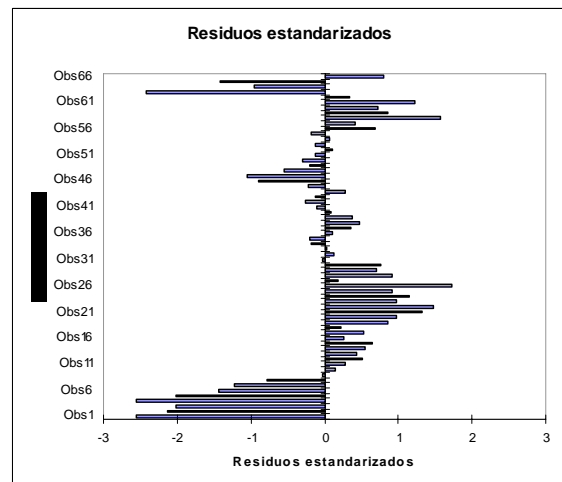
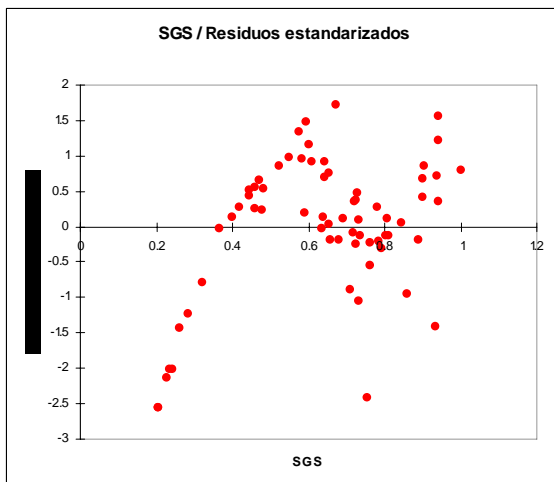
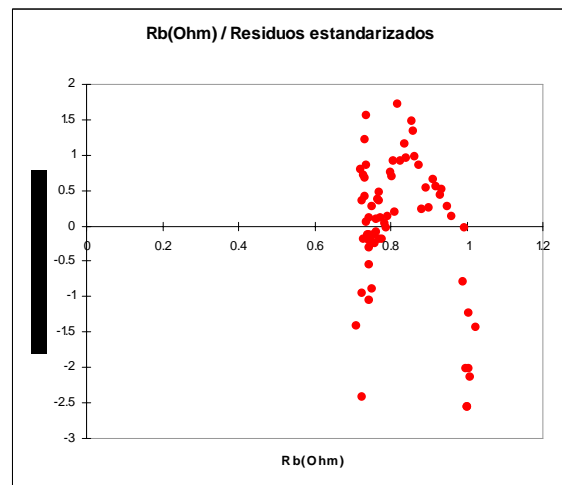
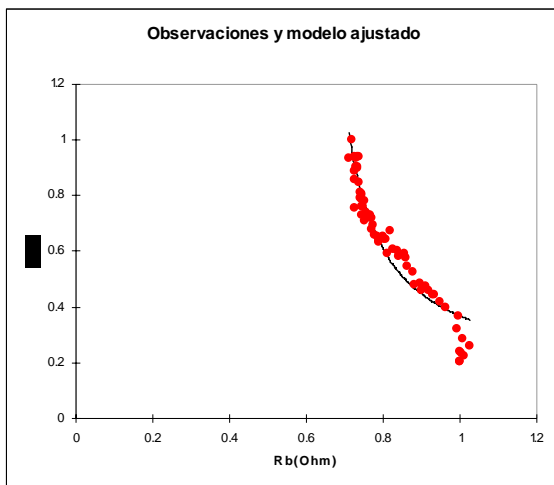


APÉNDICE I.5. Blanco B (250 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$\text{pr1} * \text{X1} / (\text{pr2} + \text{X1})$	$0.142994845838772 * \text{X1} / (-0.612044678321786 + \text{X1})$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.957
R ² (coeficiente de determinación)	0.915
SCR	0.249

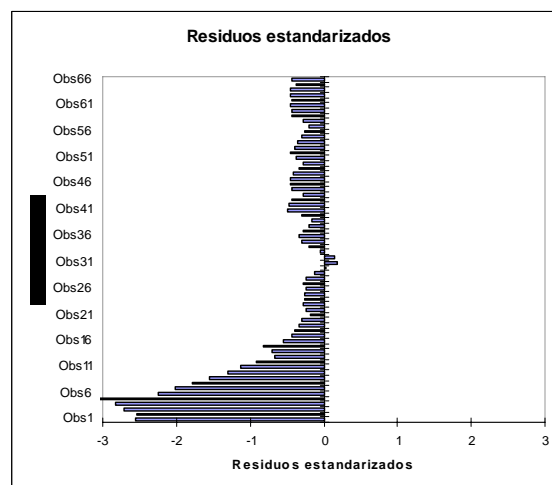
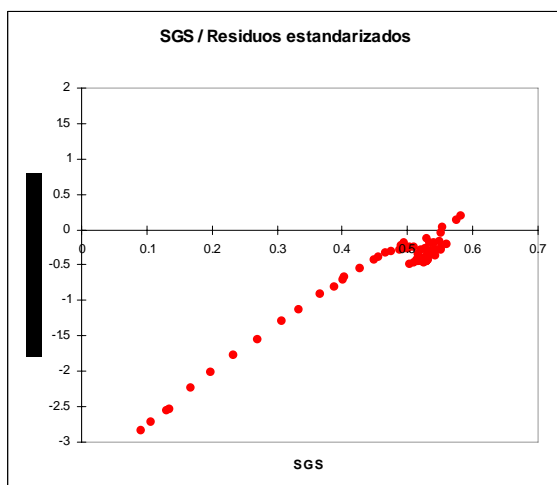
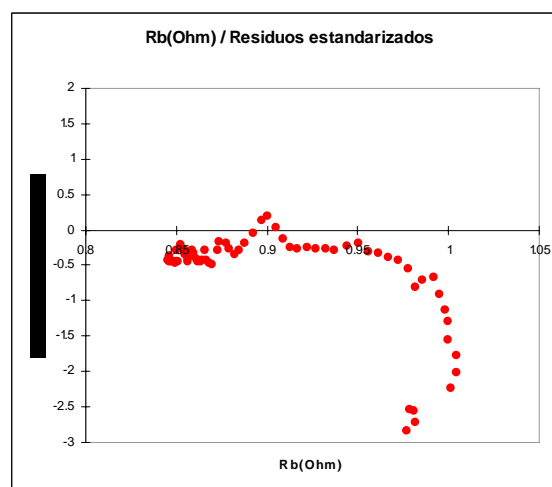
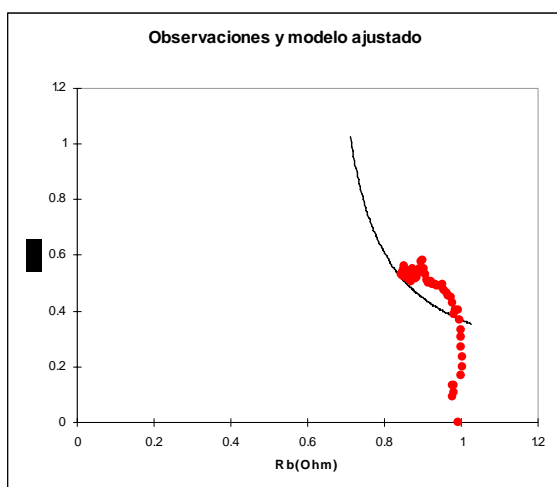


APÉNDICE I.6. Sistema A (100 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$0.260659557718829 * X1 / (-0.47675534405027 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.266
R ² (coeficiente de determinación)	0.071
SCR	4.538

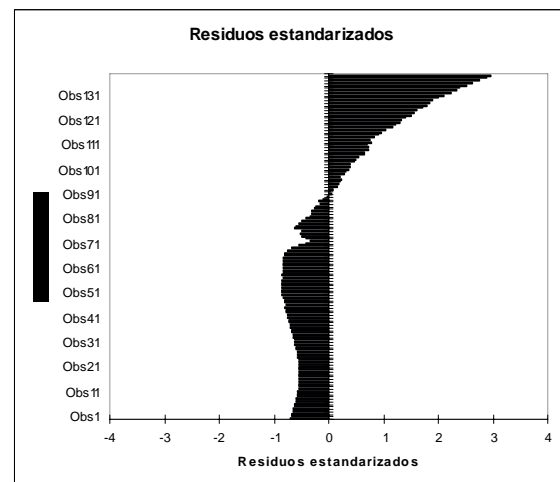
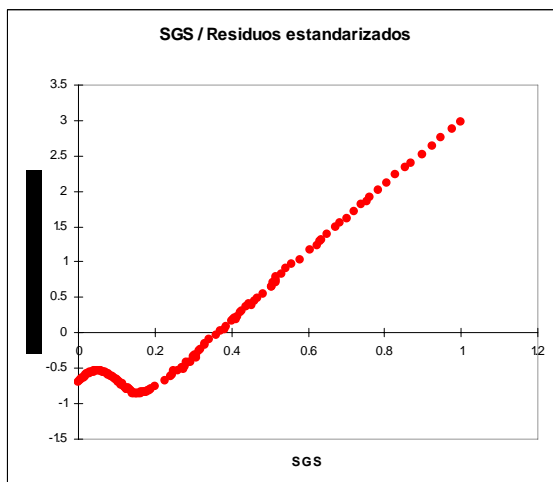
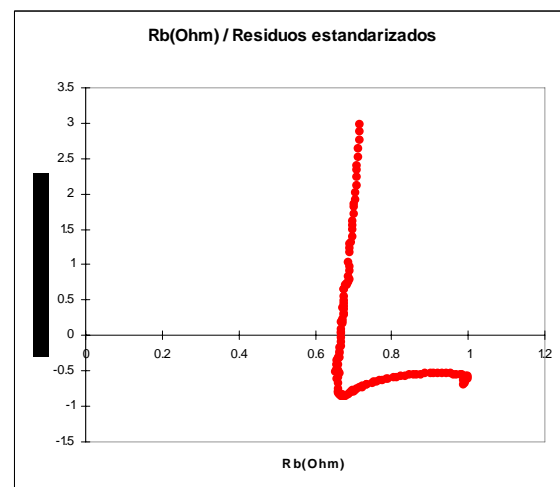
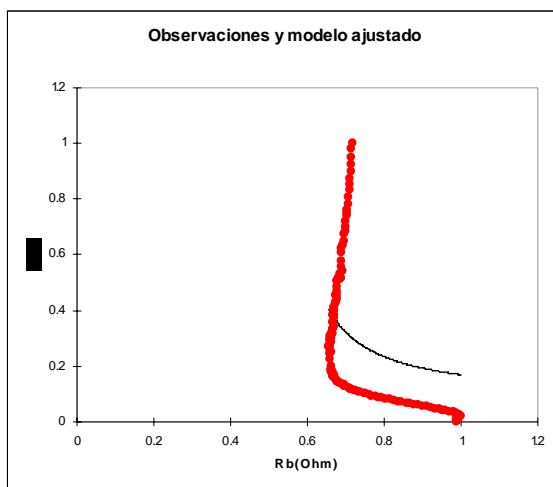


APÉNDICE I.7. Sistema A (140 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$8.04314299465817E-02 * X1 / (-0.525231653854144 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.411
R ² (coeficiente de determinación)	0.169
SCR	7.815

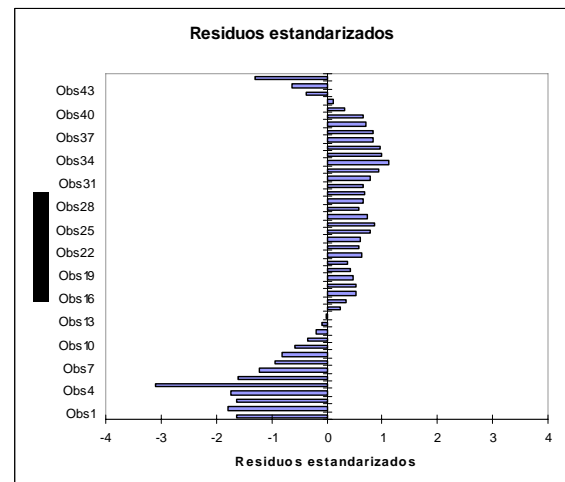
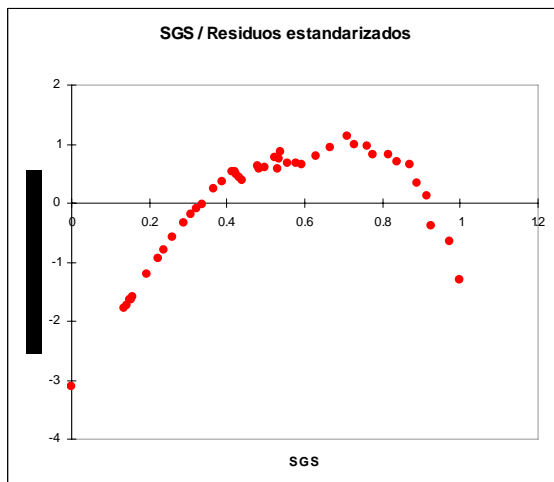
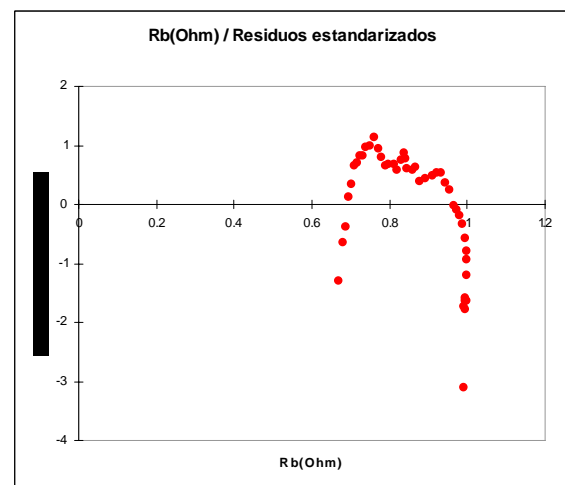
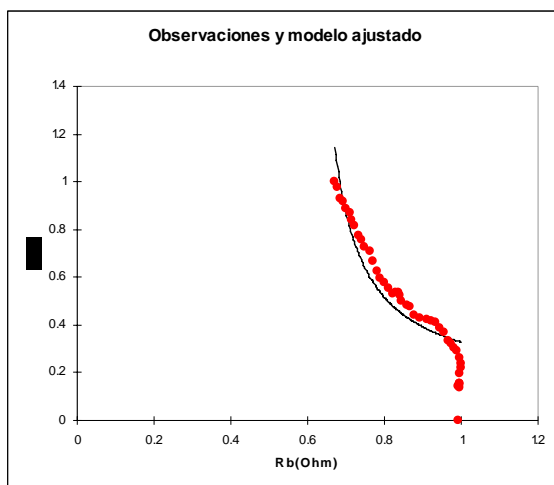


APÉNDICE I.8. Sistema A (200 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$0.133959442188573 * X1 / (-0.592268829823644 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.926
R ² (coeficiente de determinación)	0.857
SCR	0.459

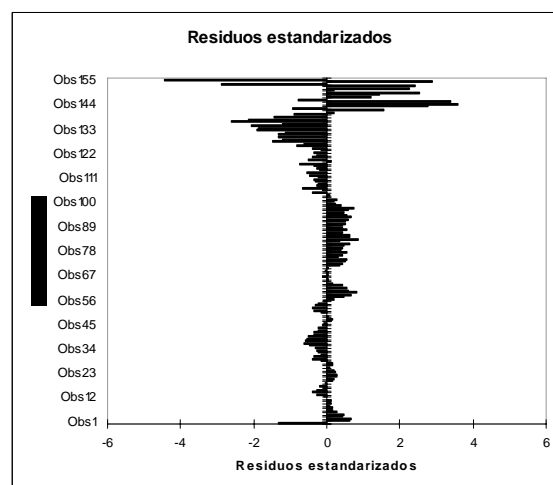
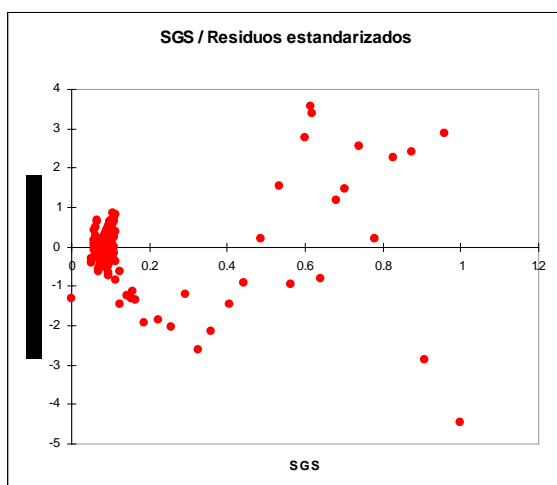
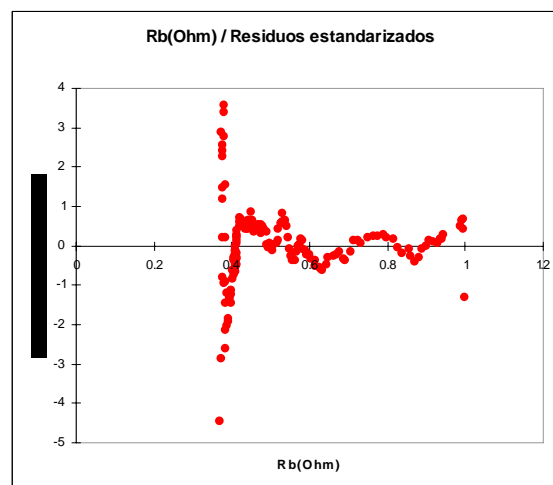
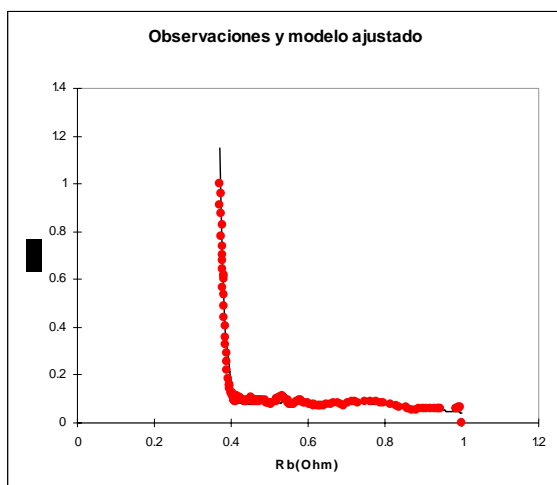


APÉNDICE I.9. Sistema C (270 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$\frac{\text{Exp}(\text{pr1} + \text{x1} * \text{pr2})}{(\text{X1} + 1)^{\text{pr3}} + \text{Exp}(\text{pr4} + \text{X1} * \text{pr5})} + 1^{\text{pr6}}$	$\frac{\text{Exp}(-21.4146946408159 + \text{x1} * -855.733312358938)}{(\text{X1} + 1)^{-1073.99999999729}} + \text{Exp}(-5.21371382479131 + \text{X1} * -17.7823352524303)}{(\text{X1} + 1)^{-28.6627765023168}}$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.987
R ² (coeficiente de determinación)	0.974
SCR	0.164

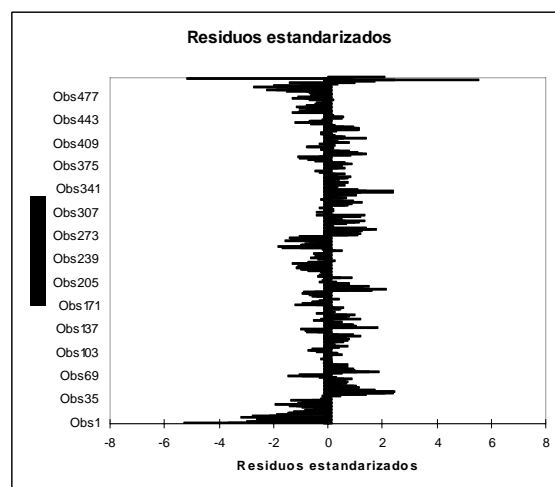
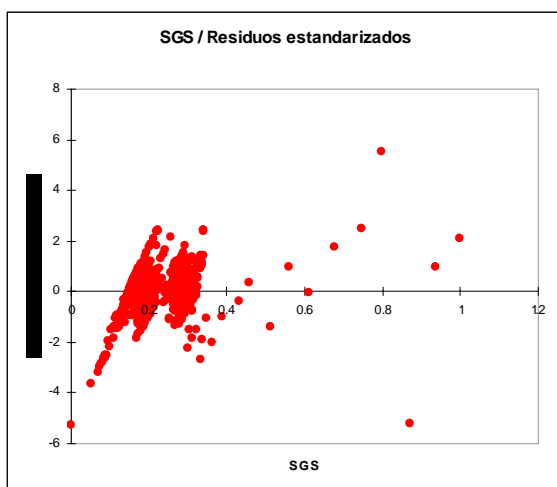
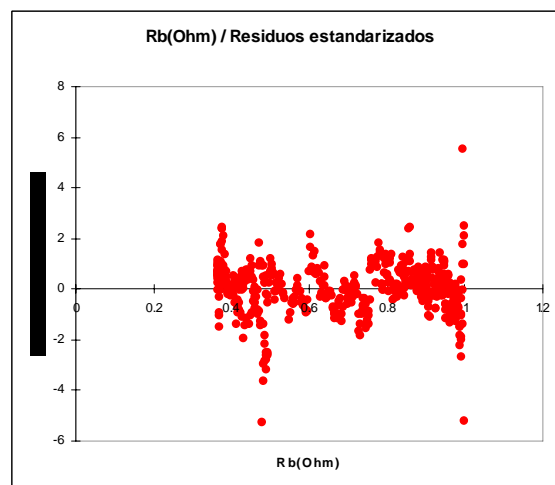
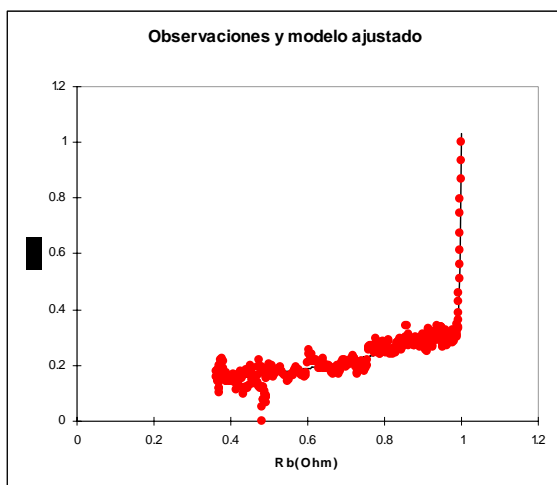


APÉNDICE I.10. Sistema D (150 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$\frac{\text{Exp}(pr1+x1*pr2)}{(X1 + 1)^{pr3} + \text{Exp}(pr4+X1*pr5)} / (X1 + 1)^{pr6}$	$\frac{\text{Exp}(-458.398619846725+x1*276.085799837096)}{(X1 + 1)^{1059.13025415745} + \text{Exp}(-2.20459848405212+X1*2.4770211604816)} / (X1 + 1)^{2.00848322370754}$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.951
R ² (coeficiente de determinación)	0.904
SCR	0.477



12.- GLOSARIO

A

Amplitud: Valor de una onda sinusoidal desde cero hasta su máximo.

Aparejo: Componente del sistema de izaje provisto de poleas para mejorar la distribución del peso.

B

Barrena: Herramienta que se emplea para cortar los estratos de la formación a fin de hacer el hoyo que llegará al yacimiento.

C

Cabria: Estructura de la torre de perforación.

Cañoneo: Operación llevada a cabo para abrir orificios de determinado diámetro en la tubería de producción, para establecer el flujo de crudo del yacimiento al pozo.

Capacitancia: es la razón de la magnitud de la carga en uno u otro conductor con la diferencia de potencial resultante entre ambos conductores.

Clinker: Material que sirve como base para la preparación de cementos.

Colisa: Dispositivo mecánico que va instalado en el centro de la base de la torre de perforación y que le imparte movimiento a la sarta.

Corriente alterna: corriente que tiene un comportamiento sinusoidal.

E

Espacio Anular: espacio libre que se encuentra entre el revestidor y las paredes de la formación.

F

Fasor: Vector rotatorio.

Fraguado: Proceso de solidificación de una lechada de cemento.

G

Gel: Material semisólido.

I

Impedancia: Capacidad de un material para impedir el flujo de corriente a través de su seno.

Inductancia: Flujo magnético que cambia con el tiempo producido por una corriente que pasa a través de un resistor.

J

Junta Kelly: Eje que se conecta a la colisa para imprimir rotación a la sarta de perforación.

L

Lastrabarrenas: Herramienta que conecta la barrena a la sarta de perforación que permite mantener la barrena más firme sobre la roca.

Lechada de cemento: Mezcla de cemento, agua y aditivos.

P

Preflujos: Fluidos que se bombean entre el lodo de perforación y la lechada de cemento.

R

Reología: Ciencia que estudia la deformación y flujo de la materia.

Reómetro tipo Vane: Equipo de para medir propiedades reológicas, conformado por cilindros concéntricos.

Resistencia: Capacidad de un elemento de circuito ideal para impedir el flujo de corriente a través de su seno.

Revoque: capa de sólidos que se deposita en las paredes de la formación como producto de la diferencia de presiones en la interfase lodo-formación.

S

Sarta de perforación: Columna de tubos de aceros a la que se conecta la barrena.

T

Toberas: Abertura tubular en la barrena que permite el paso del fluido de perforación.

Z

Zaranda: Equipo que separa el fluido de perforación de los ripios.

Zapata: Herramienta que se le coloca al revestidor que sirve para guiar la tubería en su descenso hasta la profundidad que se va a cementar.

1.- APÉNDICES

APÉNDICE A.

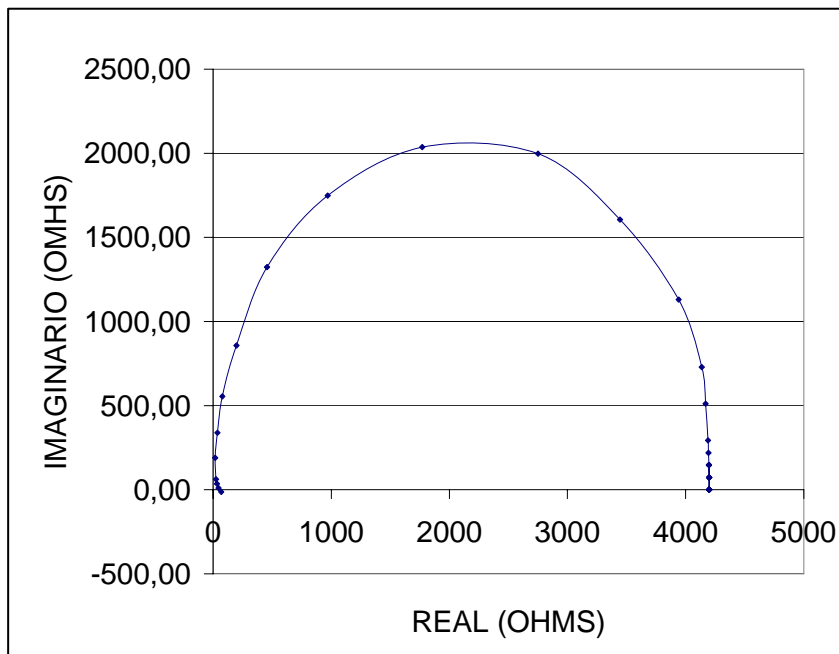


Figura A.1: Diagrama de Nyquist para el agua destilada reportado en la bibliografía. ^[35]

APÉNDICE B

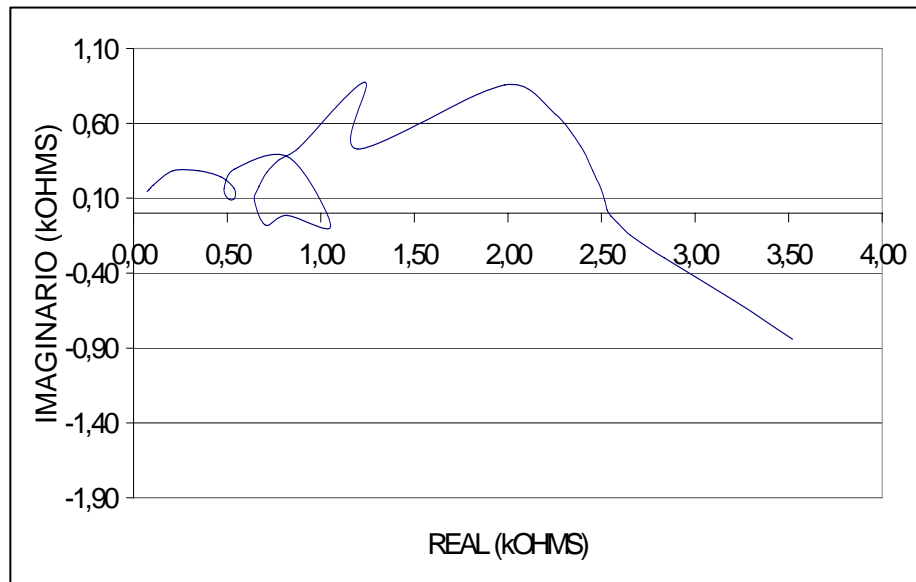


Figura B.1: Diagrama de Nyquist para el agua destilada reportado en la bibliografía, usando la celda #1 con los electrodos sin lijar. ^[35]

APÉNDICE C

APÉNDICE C.1. Cálculo de la constante dieléctrica para el agua destilada.

Recordando la forma de la ecuación 28 se tiene:

$$\varepsilon = \left(2 \cdot \pi \cdot v_{top}\right)^{\left(\frac{2\theta}{\pi}-1\right)} \cdot \left(\frac{L}{R \cdot A \cdot \varepsilon_o}\right) \quad (28)$$

Luego, a partir de la Tabla N° 4 y de la figura N° 25 se obtienen los siguientes datos para el cálculo de la constante dieléctrica del agua destilada usando la celda #1 y el espectro de impedancia presentado en la figura N° 25.

$$v_{top} : 130000 \text{ Hz.}$$

$$\theta : 0 \text{ rad.}$$

$$L : 1.0 \times 10^{-1} \text{ m.}$$

$$R : 315000 \Omega.$$

$$A : 5.332 \times 10^{-4} \text{ m}^2.$$

$$\varepsilon_o : 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m.}$$

Sustituyendo en la ecuación 28 se tiene:

$$\varepsilon = \left(2 \cdot 3.14 \cdot 130000 \text{ Hz}\right)^{\left(\frac{2 \cdot 0}{3.14}-1\right)} \cdot \left(\frac{1.0 \times 10^{-1} \text{ m}}{315000 \Omega \cdot 5.332 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}}\right)$$
$$\varepsilon = 82.3$$

APÉNDICE C.2. Cálculo del Factor de corrección para la celda #3.

Recordando la forma de la ecuación 29 se tiene:

$$A_{equivalente} = F * A_{real} \quad (29)$$

Luego, a partir de la Tabla N° 8 se obtienen los siguientes datos para el cálculo del factor de corrección geométrico para la celda #3.

$$A_{equivalente} : \quad 3.72 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

$$A_{real} : \quad 7.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2.$$

Sustituyendo en la ecuación 29 y despejando se tiene:

$$F = \frac{A_{equivalente}}{A_{real}} = \frac{3.72 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{7.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2}$$
$$F = 47.4$$

APÉNDICE C.3. Cálculo del factor geométrico a partir de la ecuación de resistividad

Sustituyendo la ecuación 30 en la ecuación 29 se obtiene:

$$F = \frac{L \cdot R_v}{R_b \cdot A_{real}} \quad (33)$$

Posteriormente, a partir de las Tablas N° 4 y 9 se pueden determinar los datos para el cálculo del factor geométrico a partir de la resistividad de soluciones de Cloruro de Sodio usando la celda #3. En este caso se tomaron los datos para el barrido 01

efectuado a la solución de 1000 ppm de Cloruro de Sodio, los cuales se muestran a continuación:

$$L: 4.765 \times 10^{-2} \text{ m.}$$

$$A_{real}: 7.854 \times 10^{-5} \text{ m}^2.$$

$$R_v: 5.40 \text{ } \Omega\text{-m.}$$

$$R_b: 468.8 \text{ } \Omega.$$

Finalmente, sustituyendo en la ecuación 33 se tiene:

$$F = \frac{4.765 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot 5.40 \Omega \cdot \text{m}}{468.8 \Omega \cdot 7.854 \times 10^{-5} \text{ m}^2}$$

$$F = 7.0$$

APÉNDICE D

APENDICE D.1. Metodología para la operación del MINIMACS.

- 1) Armar la celda del equipo.
- 2) Colocar la lechada de cemento a acondicionarse en el consistómetro atmosférico a la temperatura requerida durante 60 minutos.
- 3) Programar el plan de trabajo en el equipo durante ese tiempo.
- 4) Luego de finalizado el tiempo de acondicionamiento, colocar la lechada de cemento en la celda hasta llenarla completamente.
- 5) Cerrar la celda y colocarla dentro de la cámara del equipo.
- 6) Cerrar la cámara del equipo y colocar la termocupla sin fijarla completamente.
- 7) Abrir el paso del agua y aire al equipo.
- 8) Fijar la termocupla cuando se llene completamente la cámara del equipo.
- 9) Colocar en el panel de control el menú start y presionar OK.

APÉNDICE D.2. Metodología para pruebas de impedancia electroquímica.

- 1) Engrasar y armar la celda a usar.
- 2) Programar el analizador de impedancia HP-4192A para la prueba a realizar.
- 3) Inicializar el software de adquisición de datos.
- 4) Colocar recubrimiento a los electrodos e instalar los mismos en la celda.
- 5) Si la muestra requiere acondicionamiento se debe iniciar el mismo con suficiente antelación.
- 6) Efectuar el procedimiento “Open” al equipo HP-4192A.
- 7) Colocar los conectores coaxiales a la celda.
- 8) Colocar la termocupla a la celda e instalar el sistema de calentamiento.
- 9) Efectuar el procedimiento “Short” al sistema.
- 10) Colocar la muestra en la celda.
- 11) Ensamblar todo el sistema.
- 12) Iniciar la adquisición de datos 5 minutos después de agregada la muestra a la celda.
- 13) Iniciar el calentamiento 6 minutos después de agregada la muestra a la celda.
- 14) Iniciar la presurización 6.5 minutos después de agregada la muestra a la celda.
- 15) Una vez finalizada la prueba, se debe detener la adquisición de datos.
- 16) Liberar la presión del sistema.
- 17) Desinstalar el sistema de calentamiento.
- 18) Desarmar el sistema y retirar la muestra de la celda.
- 19) Lavar la celda.

APÉNDICE E

Pruebas de repetibilidad elaboradas con el MINIMACS.

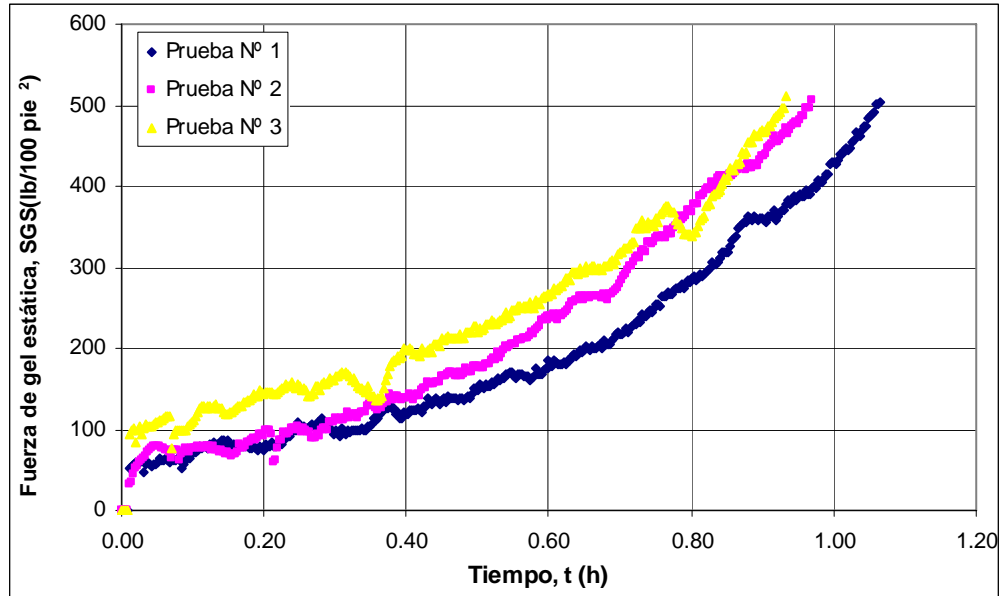


Figura E.1: Pruebas de repetibilidad de desarrollo de fuerza de gel estática elaboradas con el MINIMACS para el Blanco A (77 °F y 14.7 psi)

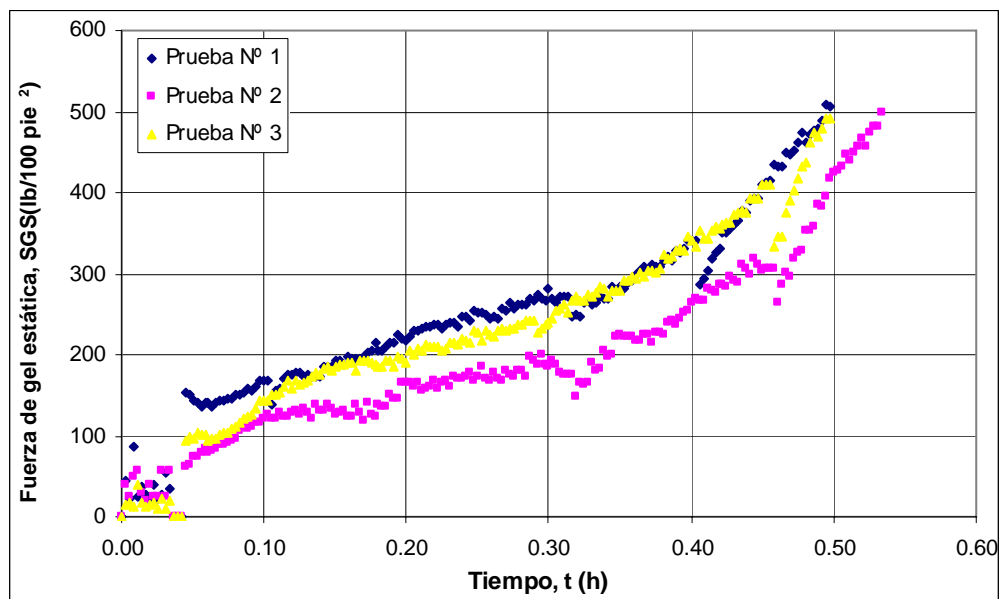


Figura E.2: Pruebas de repetibilidad de desarrollo de fuerza de gel estática elaboradas con el MINIMACS para el Blanco A (150 °F y 1000 psi)

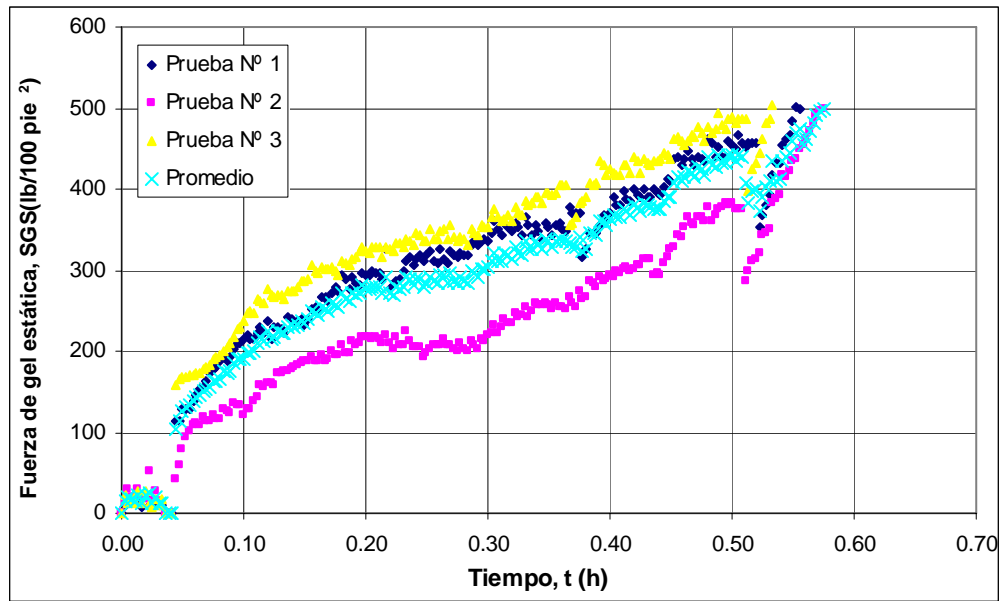


Figura E.3: Pruebas de repetibilidad de desarrollo de fuerza de gel estática elaboradas con el MINIMACS para el Blanco B (250 °F y 1000 psi)

APÉNDICE F

Química del cemento Portland.

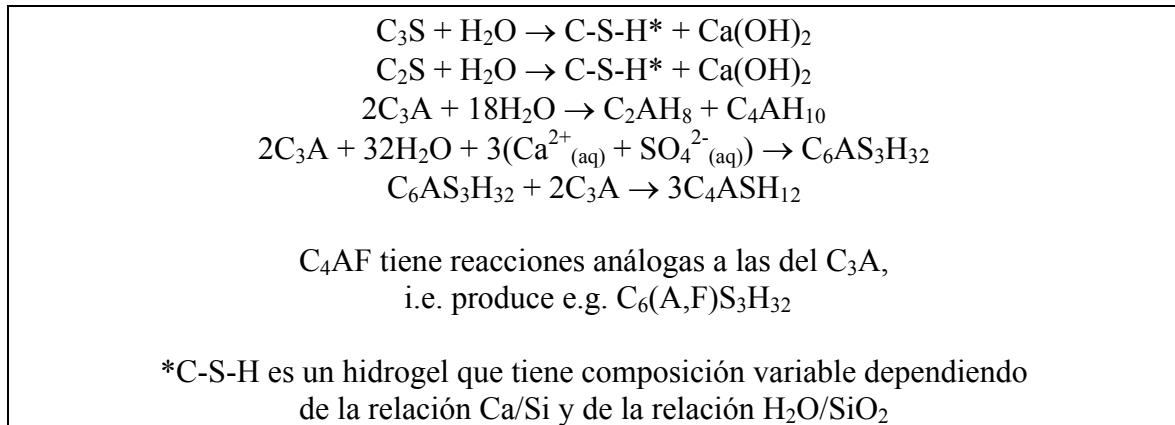


Figura F.1: Principales reacciones de las fases del cemento Portland

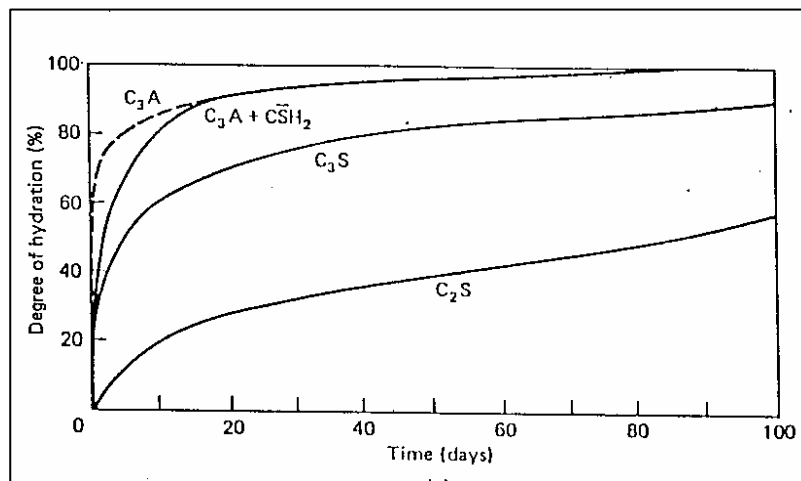


Figura F.2: Velocidades de hidratación de las fases individuales del cemento Portland

APÉNDICE G

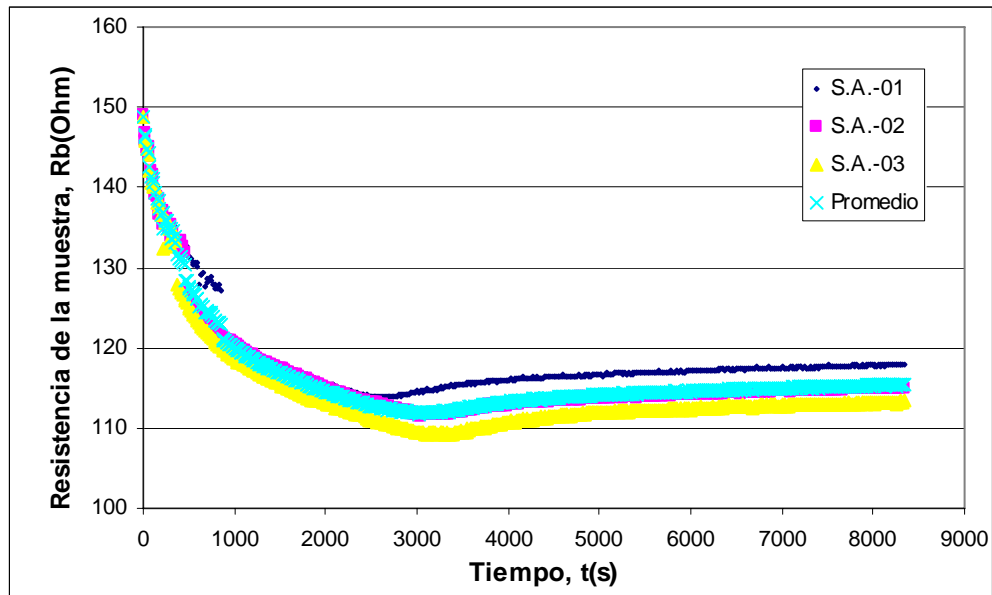


Figura G.1: Pruebas de repetibilidad para el Blanco A (77 °F y 14.7 psi) obtenidas mediante la aplicación de las experiencias de impedancia electroquímica.

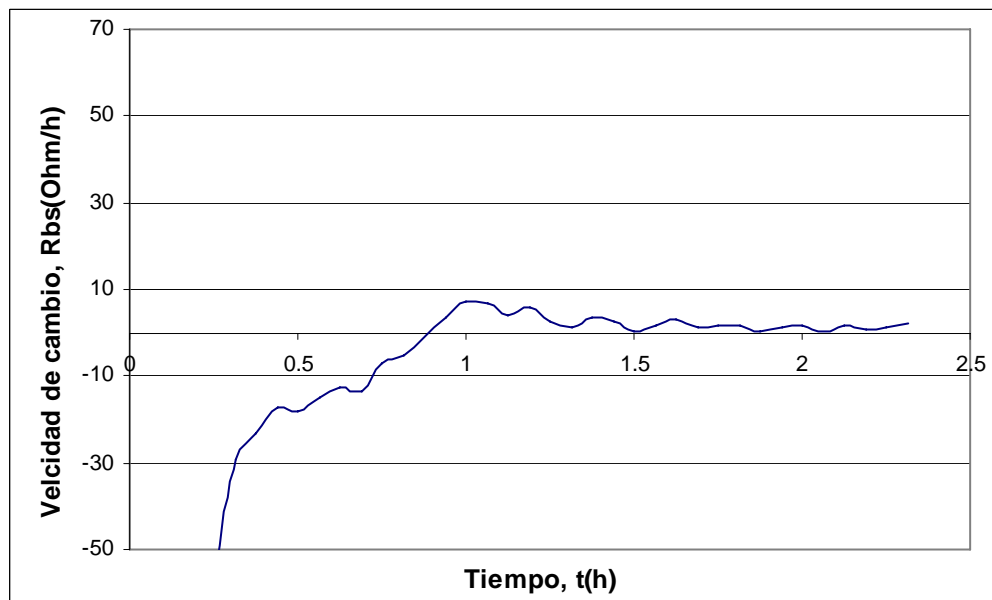


Figura G.1: Curva de la primera derivada de la resistencia eléctrica en función del tiempo para el Blanco A (77 °F y 14.7 psi)

APÉNDICE H

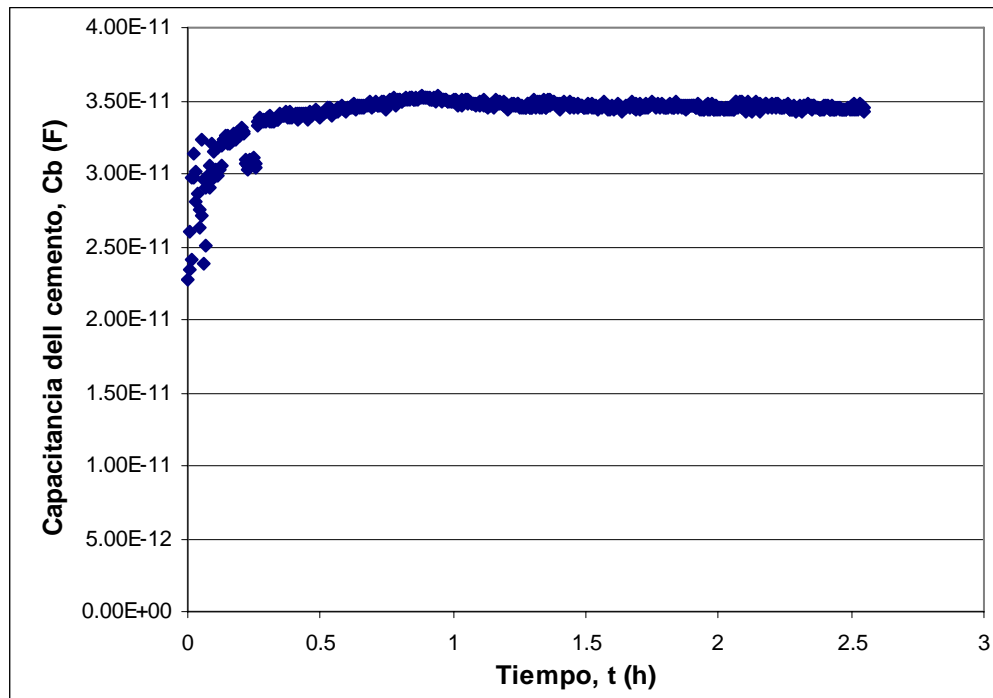


Figura H.1: Variación de la capacitancia del cemento en función del tiempo para el Blanco A (77 °F y 14.7 psi)

APÉNDICE I

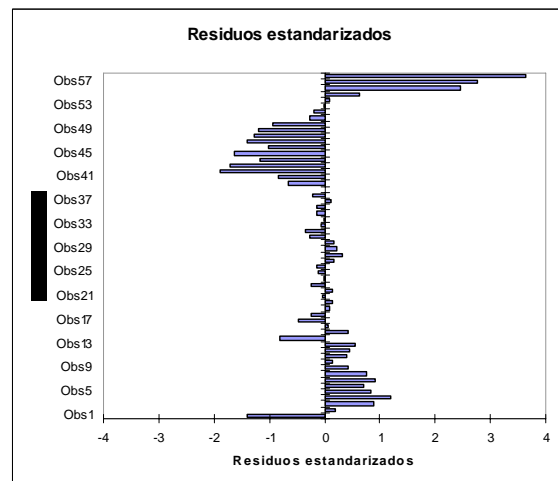
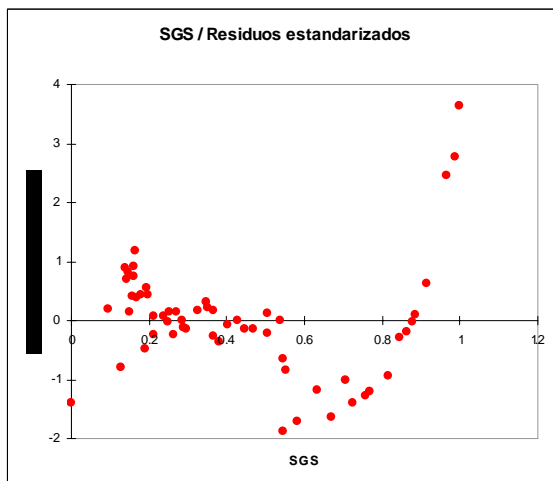
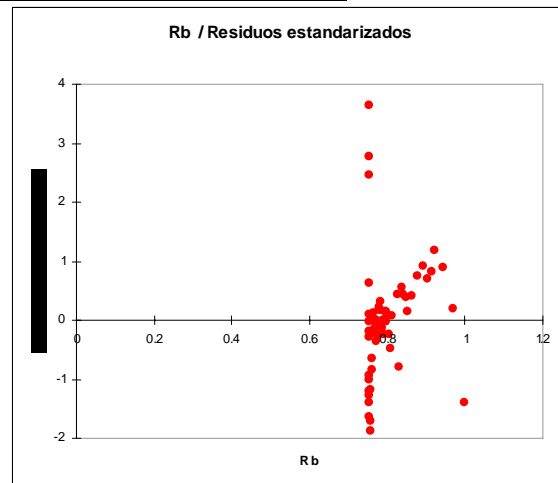
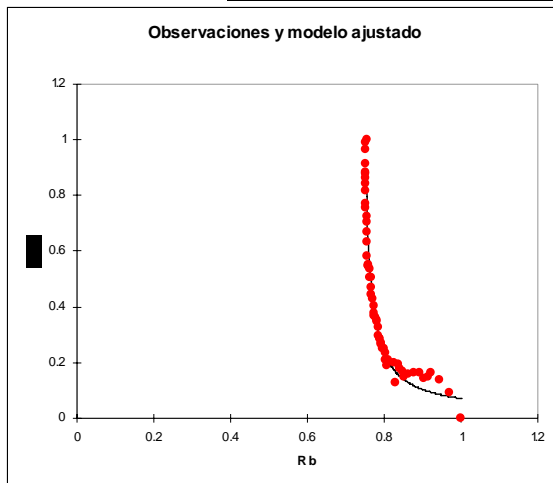
Gráficas de los ajustes para todos los sistemas obtenidas con XLSTAT®.

APÉNDICE I.1. Blanco A (77 °F y 14.7 psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$0.018899179224436 * X1 / (-0.73589403441463 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.981
R ² (coeficiente de determinación)	0.962
SCR	0.166

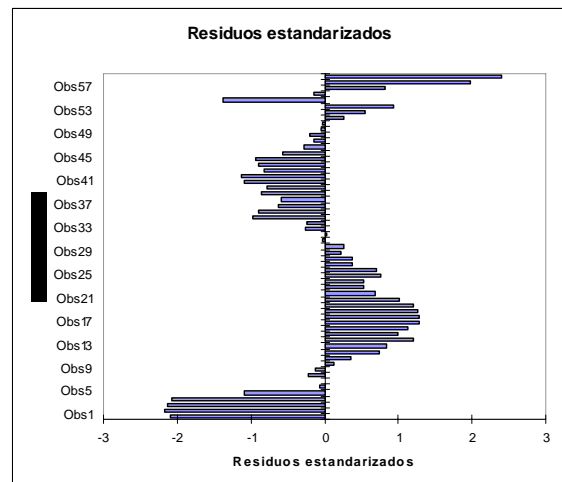
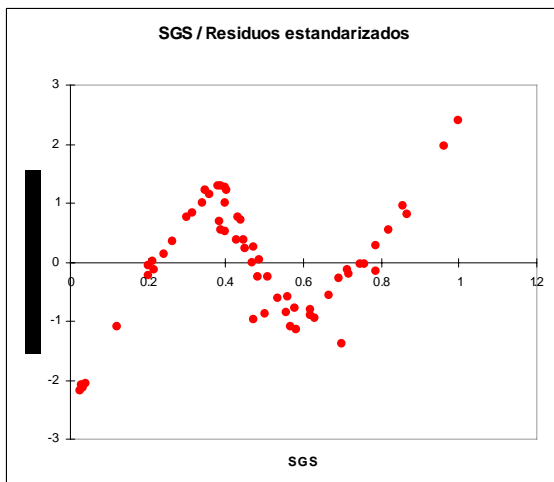
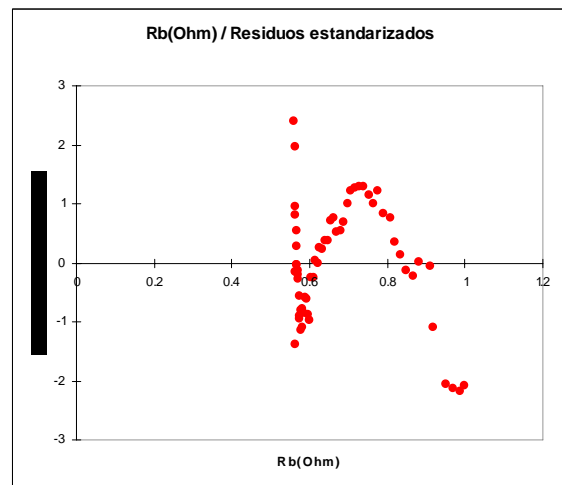
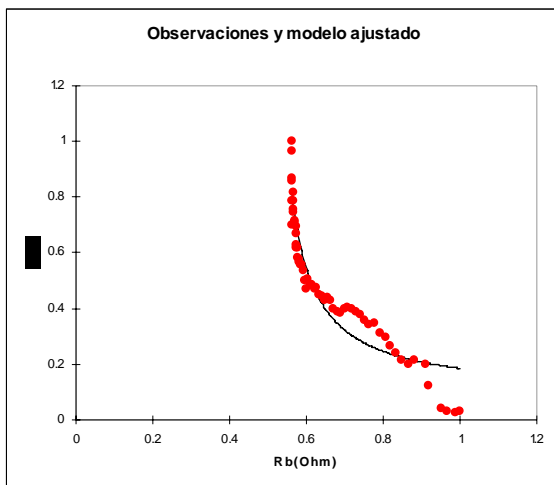


APÉNDICE I.2. Blanco A (150 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$9.29985852171421E-02 * X1 / (-0.497744267242815 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.947
R ² (coeficiente de determinación)	0.897
SCR	0.320

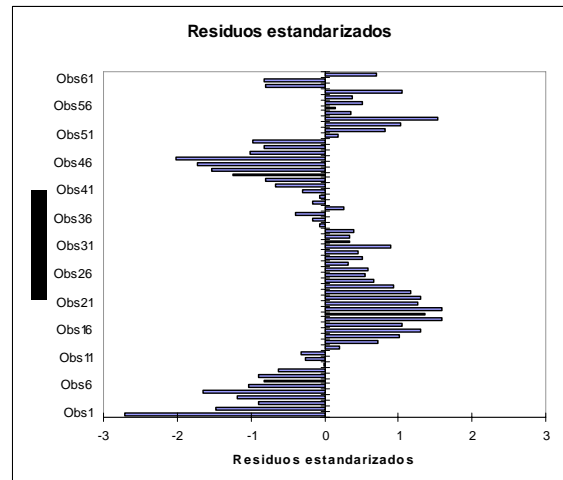
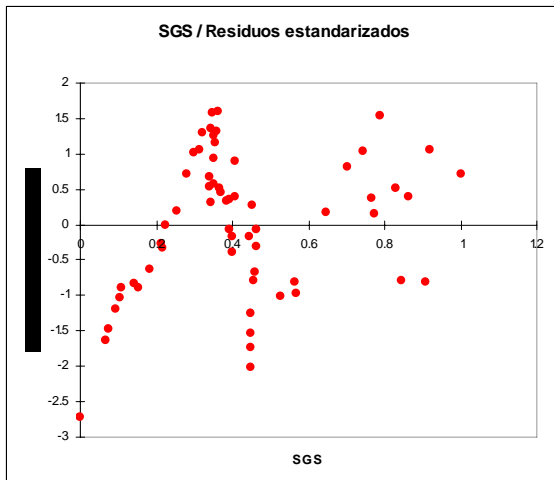
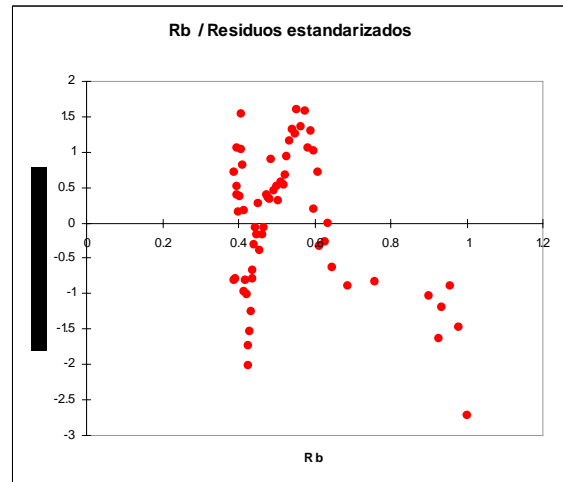
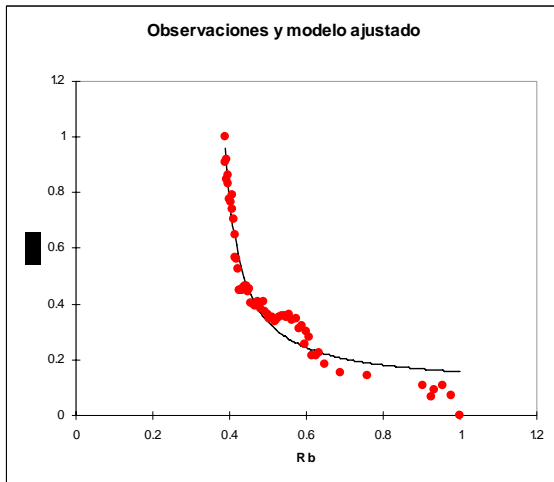


APÉNDICE I.3. Blanco A (200 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$0.102443283059578 * X1 / (-0.347337665145534 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.969
R ² (coeficiente de determinación)	0.939
SCR	0.197

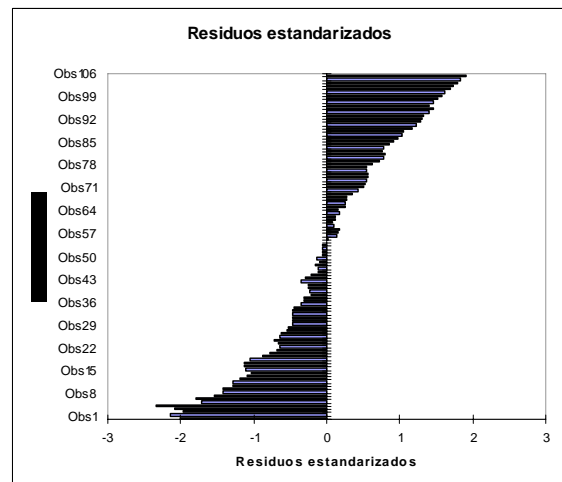
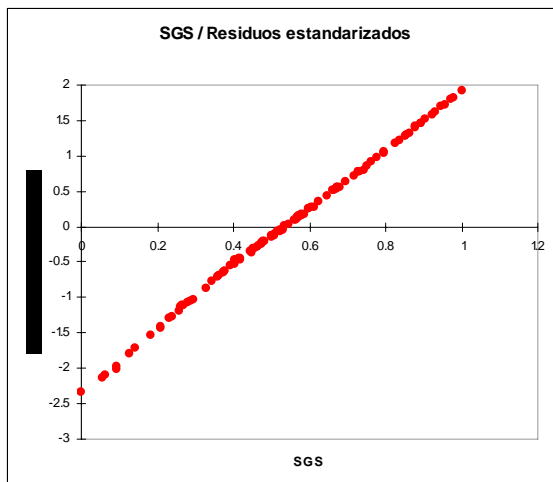
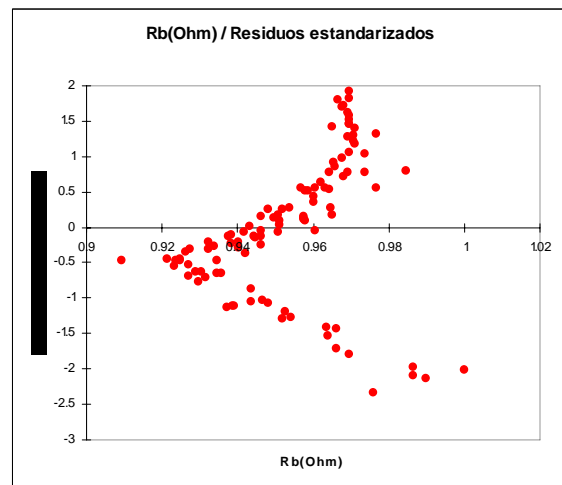
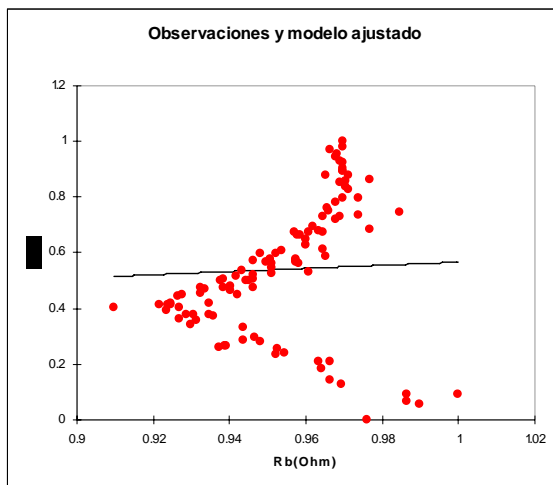


APÉNDICE I.4. Blanco B (77 °F y 14.7psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$64351357492.8674 * X1 / (113530292433.398 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.316
R ² (coeficiente de determinación)	0.100
SCR	5.793

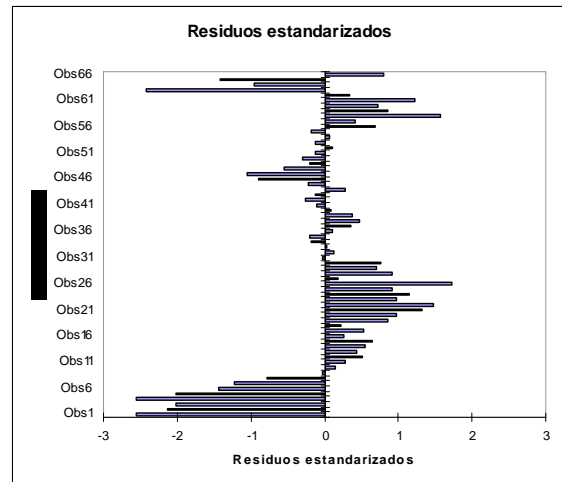
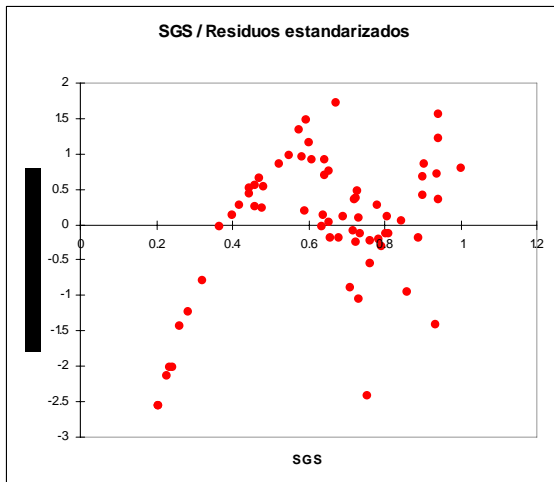
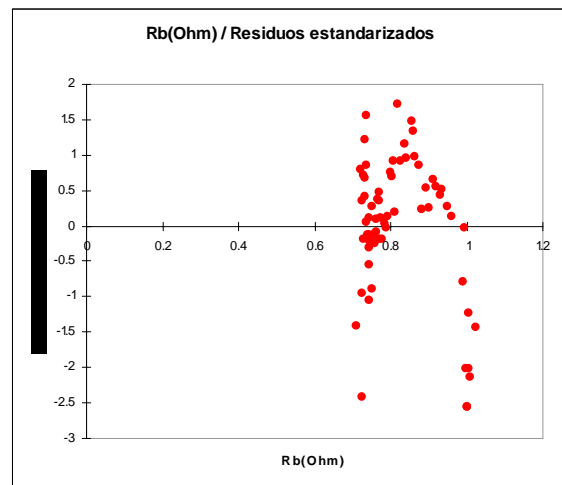
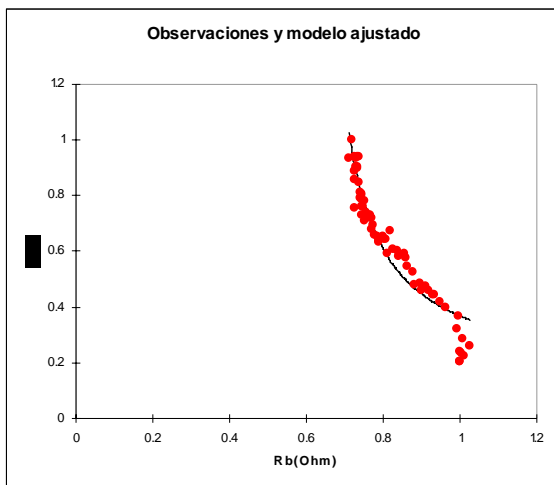


APÉNDICE I.5. Blanco B (250 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$\frac{pr1 * X1}{(pr2 + X1)}$	$0.142994845838772 * X1 / (-0.612044678321786 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.957
R ² (coeficiente de determinación)	0.915
SCR	0.249

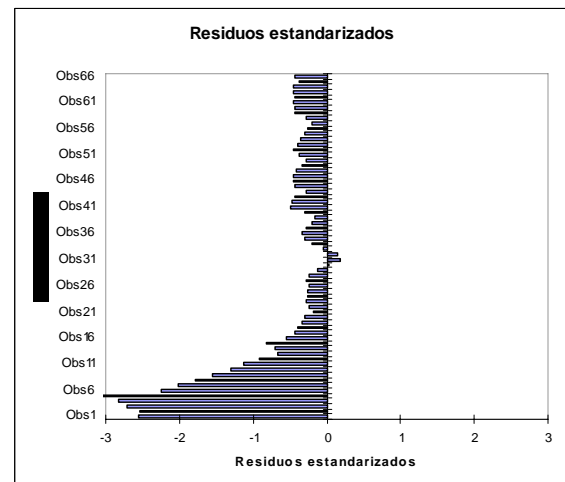
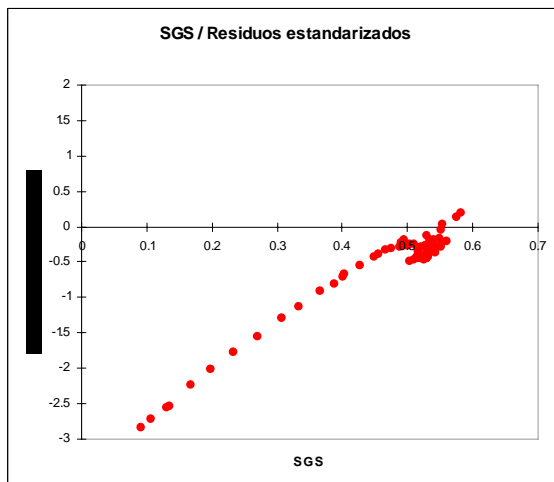
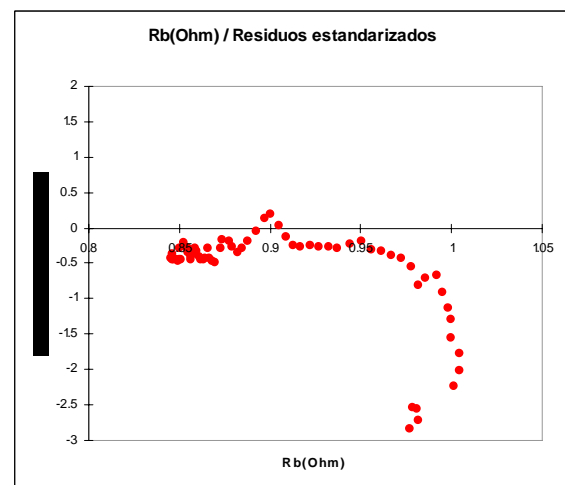
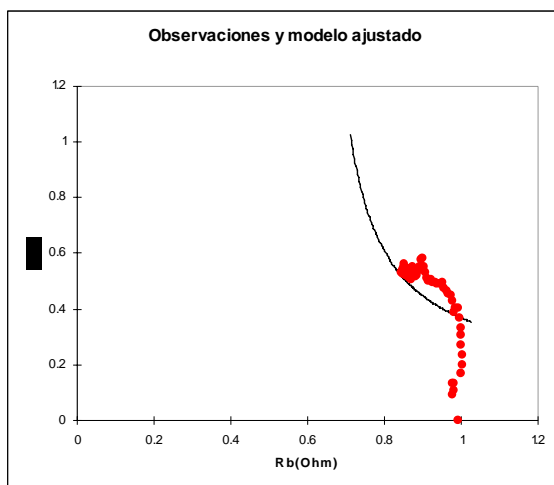


APÉNDICE I.6. Sistema A (100 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$0.260659557718829 * X1 / (-0.47675534405027 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.266
R ² (coeficiente de determinación)	0.071
SCR	4.538

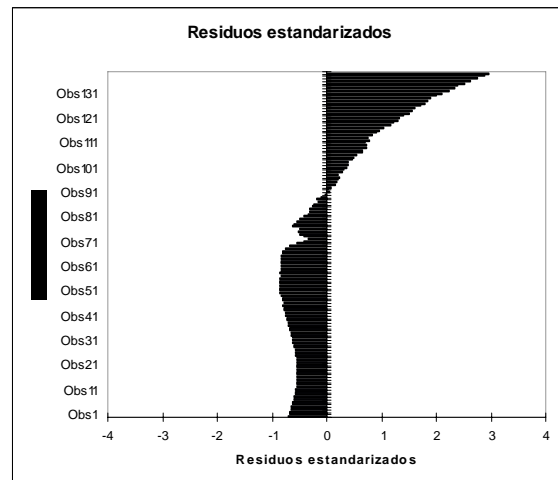
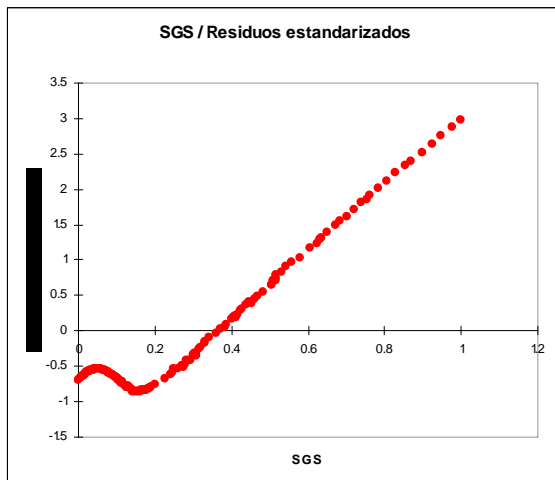
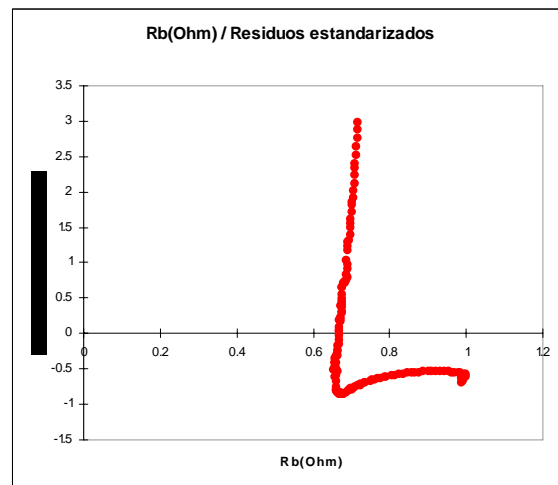
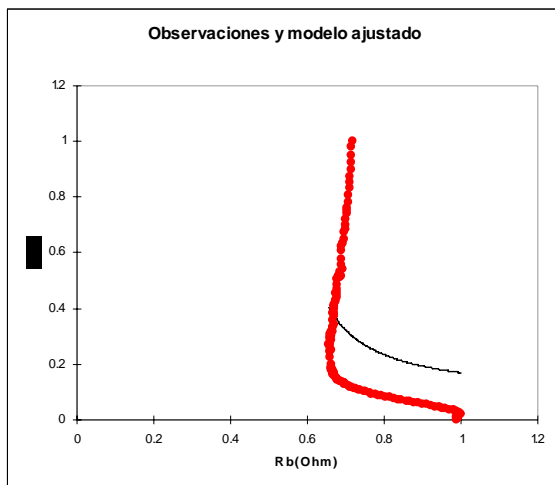


APÉNDICE I.7. Sistema A (140 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$8.04314299465817E-02 * X1 / (-0.525231653854144 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.411
R ² (coeficiente de determinación)	0.169
SCR	7.815

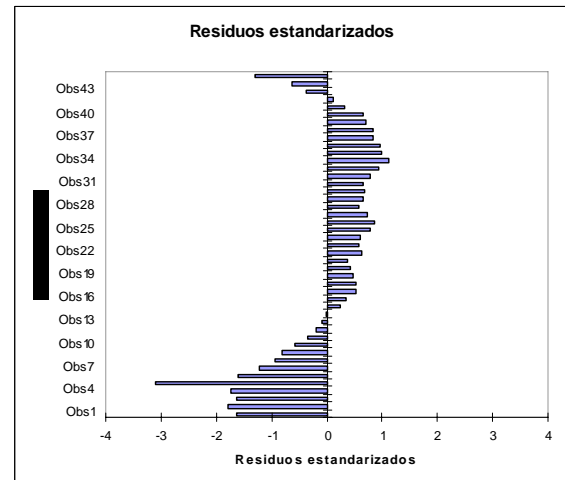
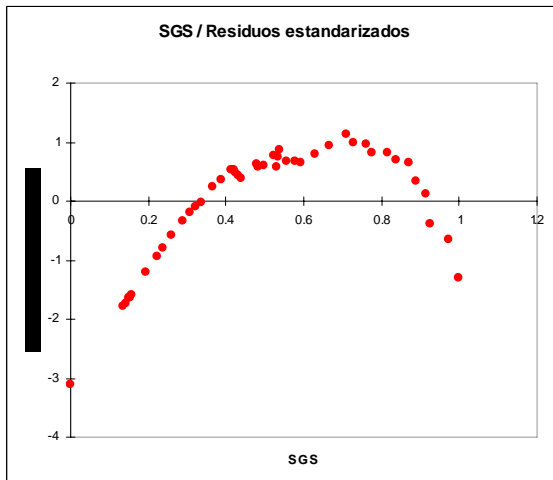
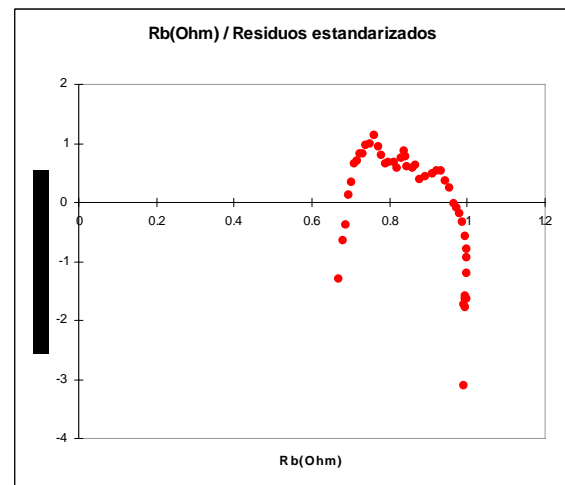
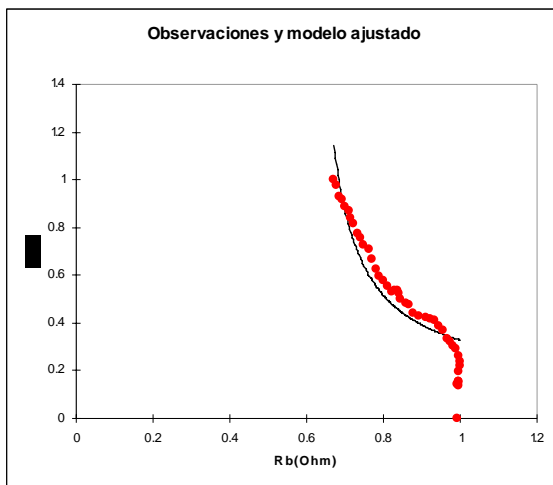


APÉNDICE I.8. Sistema A (200 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$pr1 * X1 / (pr2 + X1)$	$0.133959442188573 * X1 / (-0.592268829823644 + X1)$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.926
R ² (coeficiente de determinación)	0.857
SCR	0.459

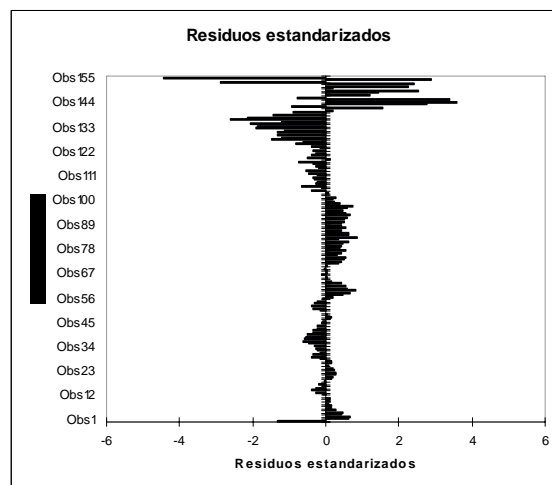
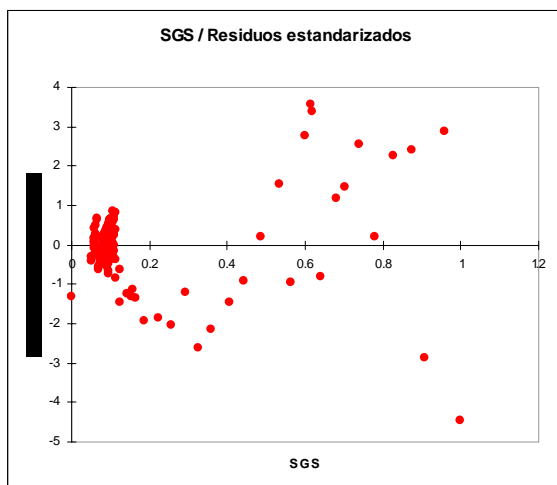
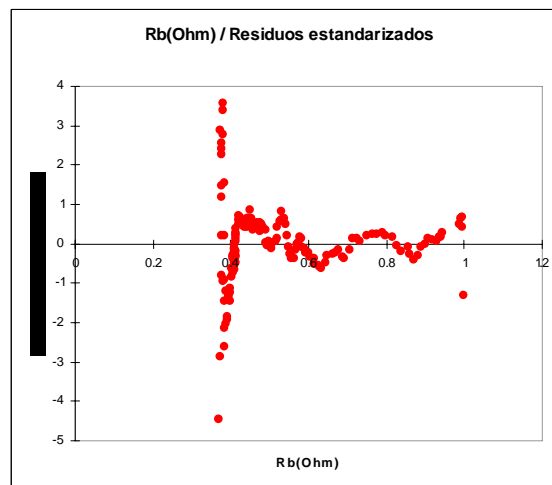
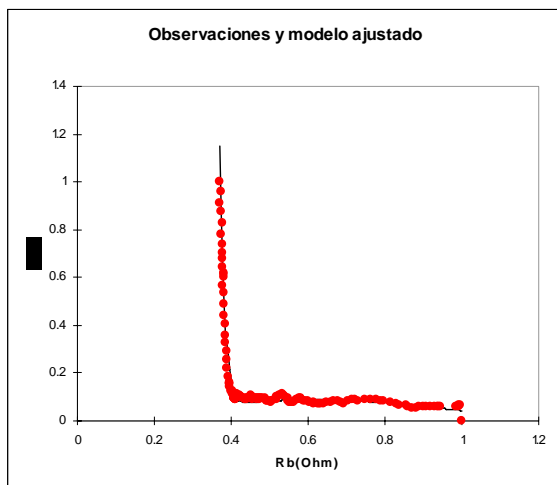


APÉNDICE I.9. Sistema C (270 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
$\frac{\text{Exp}(\text{pr1} + \text{x1} * \text{pr2})}{(\text{X1} + 1)^{\text{pr3}} + \text{Exp}(\text{pr4} + \text{X1} * \text{pr5})} + 1)^{\text{pr6}}$	$\frac{\text{Exp}(-21.4146946408159 + \text{x1} * -855.733312358938)}{(\text{X1} + 1)^{-1073.99999999729} + \text{Exp}(-5.21371382479131 + \text{X1} * -17.7823352524303)} + 1)^{-28.6627765023168}$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.987
R ² (coeficiente de determinación)	0.974
SCR	0.164

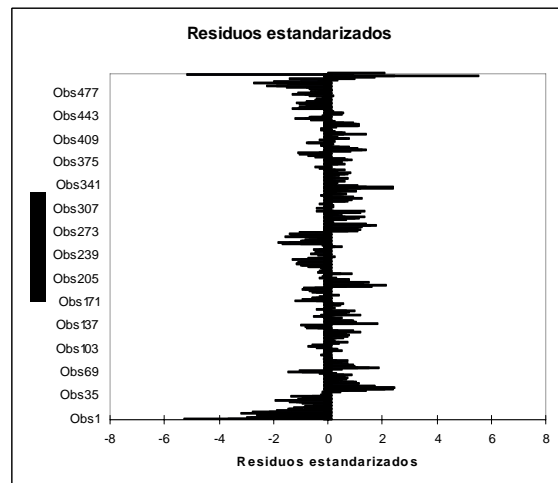
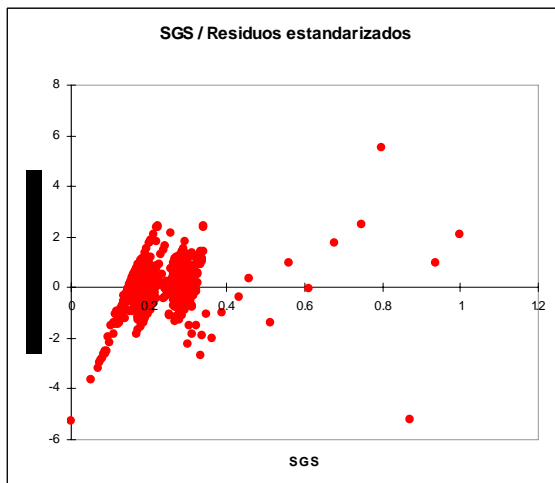
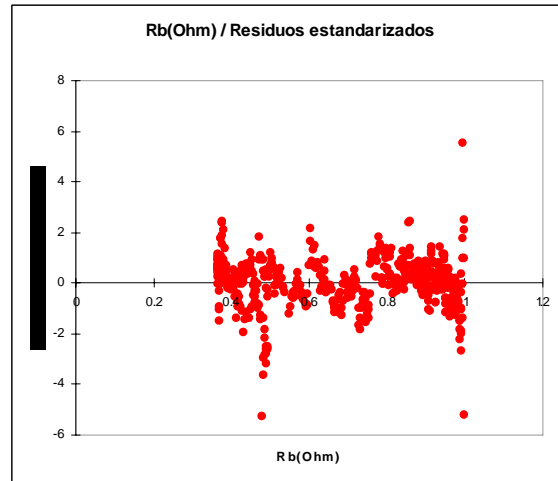
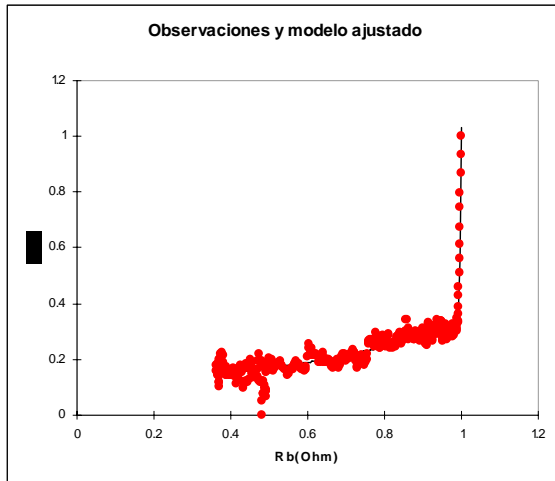


APÉNDICE I.10. Sistema D (150 °F y 1000 psi)

Modelo	Ecuación
	$\text{Exp}(-458.398619846725 + x1 * -276.085799837096) / (X1 + 1)^{-}$
$\text{Exp}(pr1 + x1 * pr2) / (X1 + 1)^{pr3} + \text{Exp}(pr4 + X1 * pr5) / (X1 + 1)^{pr6}$	$2.20459848405212 + X1 * 2.4770211604816) / (X1 + 1)^{2.00848322370754}$

Coefficientes de ajuste:

R (coeficiente de correlación)	0.951
R ² (coeficiente de determinación)	0.904
SCR	0.477



12.- GLOSARIO

A

Amplitud: Valor de una onda sinusoidal desde cero hasta su máximo.

Aparejo: Componente del sistema de izaje provisto de poleas para mejorar la distribución del peso.

B

Barrena: Herramienta que se emplea para cortar los estratos de la formación a fin de hacer el hoyo que llegará al yacimiento.

C

Cabria: Estructura de la torre de perforación.

Cañoneo: Operación llevada a cabo para abrir orificios de determinado diámetro en la tubería de producción, para establecer el flujo de crudo del yacimiento al pozo.

Capacitancia: es la razón de la magnitud de la carga en uno u otro conductor con la diferencia de potencial resultante entre ambos conductores.

Clinker: Material que sirve como base para la preparación de cementos.

Colisa: Dispositivos mecánico que va instalado en el centro de la base de la torre de perforación y que le imparte movimiento a la sarta.

Corriente alterna: corriente que tiene un comportamiento sinusoidal.

E

Espacio Anular: espacio libre que se encuentra entre el revestidor y las paredes de la formación.

F

Fasor: Vector rotatorio.

Fraguado: Proceso de solidificación de una lechada de cemento.

G

Gel: Material semisólido.

I

Impedancia: Capacidad de un material para impedir el flujo de corriente a través de su seno.

Inductancia: Flujo magnético que cambia con el tiempo producido por una corriente que pasa a través de un resistor.

J

Junta Kelly: Eje que se conecta a la colisa para imprimir rotación a la sarta de perforación.

L

Lastrabarrenas: Herramienta que conecta la barrena a la sarta de perforación que permite mantener la barrena más firme sobre la roca.

Lechada de cemento: Mezcla de cemento, agua y aditivos.

P

Preflujos: Fluidos que se bombean entre el lodo de perforación y la lechada de cemento.

R

Reología: Ciencia que estudia la deformación y flujo de la materia.

Reómetro tipo Vane: Equipo de para medir propiedades reológicas, conformado por cilindros concéntricos.

Resistencia: Capacidad de un elemento de circuito ideal para impedir el flujo de corriente a través de su seno.

Revoque: capa de sólidos que se deposita en las paredes de la formación como producto de la diferencia de presiones en la interfase lodo-formación.

S

Sarta de perforación: Columna de tubos de aceros a la que se conecta la barrena.

T

Toberas: Abertura tubular en la barrena que permite el paso del fluido de perforación.

Z

Zaranda: Equipo que separa el fluido de perforación de los ripios.

Zapata: Herramienta que se le coloca al revestidor que sirve para guiar la tubería en su descenso hasta la profundidad que se va a cementar.