

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DE DIFERENTES SISTEMAS CEMENTANTES MEDIANTE SUS PROPIEDADES MECÁNICAS Y ACÚSTICAS

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Echenique T., Mercedes M.
Para optar al Título
de Ingeniera de Petróleo

Caracas, 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DE DIFERENTES SISTEMAS CEMENTANTES MEDIANTE SUS PROPIEDADES MECÁNICAS Y ACÚSTICAS

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Pedro Díaz

TUTOR INDUSTRIAL: PhD. Gerardo Jaimes

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Echenique T., Mercedes M.
Para optar al Título
de Ingeniera de Petróleo

Caracas, 2013

Caracas, 07 de Junio de 2013

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller **MERCEDES MARGARITA ECHENIQUE TORRES**, titulado

**“CARACTERIZACIÓN DE DIFERENTES SISTEMAS
CEMENTANTES MEDIANTE SUS PROPIEDADES MECÁNICAS
Y ACÚSTICAS”**

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



Prof. Jenny Graterol

Jurado



Prof. Violeta Wills

Jurado



Prof. Pedro Díaz

Tutor Académico



A Dios, por darme la oportunidad de vivir cada día y nunca dejarme desfallecer

A mis padres, por creer en mí y siempre apoyarme en cada una de mis locuras

A mi hermanita, mi otra mitad y compañera de aventuras

A mis hermanos, por siempre protegerme y darme consejos

A mis sobrinitos, por hacerme reír hasta llorar

AGRADECIMIENTOS

Gracias a **Dios**, por iluminar mi camino y darme fortaleza para seguir adelante. A **mis padres**, a **mi hermana** y a **mis hermanos** por contar con ellos cada día de mi existencia y apoyarme en cada paso que doy. Gracias por estar siempre, los quiero mucho...

A la **Ilustre Universidad Central de Venezuela**, la casa que vence la sombra, a la **Facultad de Ingeniería**, a la **Escuela de Petróleo** y a todos los profesores que ayudaron en mi crecimiento profesional. Gracias...

A mi tutor académico **Ing. Pedro Díaz**, por permitirme realizar ese trabajo, por su paciencia infinita y su amistad incondicional. Mil gracias...

A mi tutor industrial **PhD. Gerardo Jaimes**, por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo, por sus orientaciones y consejos. Gracias...

A **Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA)** y al **Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo (INTEVEP)** por permitirme desarrollar mi Trabajo Especial de Grado en sus instalaciones, fueron meses enriquecedores para mi formación profesional. Gracias especiales a **Abrahan Salazar** por el apoyo técnico incondicional que me brindó en el Laboratorio de Cementación, e igualmente gracias a **Vanessa Bastos**, **Fedymar Pereira** y **Antonio Ochoa** por su colaboración y orientación. Gracias...

Un agradecimiento especial a **Soliana Díaz** por brindarme su amistad incondicional desde el primer día que llegue a Puerto La Cruz. Gracias...

A mi mejor amiga, **Roselys Rodríguez** porque hace más de 10 años Dios unió nuestros caminos y desde entonces has sido incondicional. A mi mejor amigo, **Jesús Alejandro Ostos**, que ha estado presente en mis peores días, desde mi infancia. Gracias a los dos, por apoyarme en los buenos y malos momentos, por que más que unos amigos son como mis hermanos. Los quiero mucho chicos...

Echenique T., Mercedes M.

CARACTERIZACIÓN DE DIFERENTES SISTEMAS CEMENTANTES MEDIANTE SUS PROPIEDADES MECÁNICAS Y ACÚSTICAS

Tutor Académico: Prof. Pedro Díaz, Tutor Industrial: PhD. Gerardo Jaimes.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo.

Año 2013, 223 p.

Palabras Claves: sistemas cementantes, módulos elásticos estáticos, módulos elásticos dinámicos, ensayo mecánico, ensayo acústico, pozo TRV-6X (Estado Monagas).

Resumen. La presente investigación plantea la caracterización de diferentes sistemas cementantes mediante sus propiedades mecánicas y acústicas tanto a condiciones de laboratorio como a condiciones de pozo. Para dicho fin, se ha tomado como caso de estudio el campo Travi, ubicado al norte del estado Monagas. El trabajo se desarrolla en cinco fases. Luego de una revisión y recopilación de información se definieron las condiciones de presión y temperatura a los cuales se evaluaron los diseños. Se definieron 4 sistemas cementantes: cemento clase G más agua, cemento clase H más agua, cemento clase G, aditivos más agua y cemento clase H, aditivos más agua. En primer lugar, se evaluó los esfuerzos y deformaciones mediante el ensayo mecánico para obtener la resistencia a la compresión, el módulo de Young y la energía de deformación. En segundo lugar, se evaluó las velocidades de propagación de las ondas P y S a través del ensayo acústico para obtener la resistencia a la compresión, la relación de Poisson, el módulo de Young, el módulo de Bulk y los coeficientes de Lamé. Posteriormente se reportó los resultados y se realizó un análisis comparativo de los módulos elásticos tanto estáticos como dinámicos. Finalmente, se comparó los módulos elásticos de la formación Carapita que atraviesa el pozo TRV-6X con el diseño de la lechada utilizada en la completación del mismo, pudiéndose concluir que el diseño es apropiado ya que la lechada una vez fraguada no es de fácil fracturamiento y contribuye a un buen sello hidráulico. Asimismo, se concluyó que a mayor temperatura los módulos elásticos, tanto estáticos como dinámicos aumentan, a excepción de la relación de Poisson donde el comportamiento es inverso.

ÍNDICE

ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS	xxx
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. Planteamiento del Problema.....	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo General.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos	4
1.3. Alcance.....	4
1.4. Justificación.....	4
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1. Cemento	6
2.1.1. Cemento Portland	6
2.2. Composición Química del Cemento	7
2.3. Clasificación del Cemento	9
Clase A	9
Clase B	10
Clase C	10
Clase D	10

Clase E.....	10
Clase F.....	10
Clase G	11
Clase H	11
Clase J	11
2.4. Diseño de la Lechada de Cemento	11
2.5. Aditivos Utilizados en la Preparación de la Lechada de Cemento.....	12
2.5.1. Aceleradores	13
2.5.2. Retardadores	13
2.5.3. Extendedores.....	13
2.5.4. Densificantes.....	14
2.5.5. Dispersantes	14
2.5.6. Controladores de Filtrado	14
2.5.7. Controladores de Gas o Antimigratorio.....	14
2.5.8. Antiespumante	14
2.6. Elasticidad	15
2.6.1. Elasticidad Lineal	15
2.6.1.1. Esfuerzo	15
2.6.1.2. Deformación	18
2.6.2. Constantes Elásticas.....	19
2.6.2.1. Módulo Elástico o Módulo de Young.....	19
2.6.2.2. Módulo o Relación de Poisson.....	20
2.6.2.3. Módulo de Bulk	21
2.6.2.4. Ecuaciones de Lamé.....	22

Primer Coeficiente de Lamé	22
Segundo Coeficiente de Lamé: Módulo de Corte o Cizallamiento.....	22
2.6.2.5. Relación entre las Constantes Elásticas	23
2.6.3. Elasticidad No Lineal.....	23
2.7. Propiedades Mecánicas del Cemento	26
2.7.1. Propiedades Mecánicas Estáticas del Cemento	26
2.7.1.1. Propiedades Elásticas	26
2.7.1.2. Límites Mecánicos.....	27
Resistencia a la Compresión.....	27
Resistencia a la Tensión.....	27
Resistencia al Impacto	27
2.7.2. Propiedades Mecánicas Dinámicas del Cemento	28
2.8. Ensayo de Materiales	30
2.8.1. Ensayos Destructivos	31
2.8.2. Ensayos No Destructivos	31
CAPÍTULO III.....	32
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO	32
3.1. Ubicación del Área en Estudio.....	32
3.1.1. Cuenca Oriental de Venezuela.....	32
3.1.2. Subcuenca de Maturín	33
3.1.3. Campo Travi Norte	34
3.2. Marco Geológico y Estratigráfico	36
3.3. Diagrama Mecánico Recomendado para el Pozo.....	38

3.4. Difracción de Rayos X para el Pozo	40
CAPÍTULO IV	41
MARCO METODOLÓGICO	41
4.1. Tipo de Investigación	41
4.2. Diseño de la Investigación	41
4.3. Población y Muestra	42
4.4. Operacionalización de Variables	42
4.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	44
4.5.1. Revisión Bibliográfica	44
4.5.2. Observación Directa	44
4.5.3. Gráficas	45
4.5.4. Tablas	45
4.5.5. Ensayos de Laboratorio	45
4.5.6. Instrumentos para la Recolección de Información	45
4.5.6.1. Balanza Electrónica	46
4.5.6.2. Mezcladora	46
4.5.6.3. Consistómetro Atmosférico	47
4.5.6.4. Consistómetro Presurizado	48
4.5.6.5. Cilindro Graduado	49
4.5.6.6. Cámara de Curado Atmosférica	50
4.5.6.7. Cámara de Curado Presurizada	50
4.5.6.8. Prensa Mecánica	51
4.5.6.9. Analizador de Propiedades Mecánicas	52
4.6. Metodología del Proyecto de Investigación	54

4.6.1. Fase I: Revisión y Recopilación de Información.....	55
4.6.2. Fase II: Formulación y Preparación de los Sistemas Cementantes	55
4.6.2.1. Preparación de la Lechada.....	55
4.6.2.2. Ensayo de Fluido Libre	56
4.6.2.3. Ensayo de Resistencia a la Compresión	58
4.6.2.4. Ensayo de Tiempo de Espesamiento.....	59
4.6.2.5. Diseño de los Sistemas Cementantes	61
4.6.3. Fase III: Evaluación de los Esfuerzos y Deformaciones de los Sistemas Cementantes.....	62
4.6.4. Fase IV: Evaluación de las Velocidades de Propagación de Ondas de los Sistemas Cementantes.....	63
4.6.5. Fase V: Análisis, Conclusiones y Recomendaciones	65
CAPÍTULO V.....	66
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	66
5.1. Evaluación de las Propiedades de Control de Calidad del Cemento.....	66
5.2. Evaluación de los Esfuerzos y Deformaciones de los Sistemas Cementantes	70
5.2.1. Sistema 1A: Cemento Clase G + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica.....	70
5.2.2. Sistema 1B: Cemento Clase G + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica.....	76
5.2.3. Sistema 2A: Cemento Clase H + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica.....	82
5.2.4. Sistema 2B: Cemento Clase H + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica.....	88

5.2.5. Sistema 3A: Cemento Clase G + Aditivos + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica.....	94
5.2.6. Sistema 3B: Cemento Clase G + Aditivos + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica.....	100
5.2.7. Sistema 3C: Cemento Clase G + Aditivos + Agua. Curado a 168 °F y 3000 psi.....	106
5.2.8. Sistema 4A: Cemento Clase H + Aditivos + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica.....	112
5.2.9. Sistema 4B: Cemento Clase H + Aditivos + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica.....	118
5.2.10. Sistema 4C: Cemento Clase H + Aditivos + Agua. Curado a 168 °F y 3000 psi.....	123
5.3. Evaluación de las Velocidades de Propagación de Ondas de los Sistemas Cementantes	130
5.3.1. Sistema 1A: Cemento Clase G + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica.....	130
5.3.2. Sistema 1B: Cemento Clase G + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica.....	132
5.3.3. Sistema 2A: Cemento Clase H + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica.....	134
5.3.4. Sistema 2B: Cemento Clase H + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica.....	136
5.3.5. Sistema 3A: Cemento Clase G + Aditivos + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica.....	138
5.3.6. Sistema 3B: Cemento Clase G + Aditivos + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica.....	140

5.3.7. Sistema 3C: Cemento Clase G + Aditivos + Agua. Curado a 168 °F y 3000 psi.....	142
5.3.8. Sistema 4A: Cemento Clase H + Aditivos + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica.....	144
5.3.9. Sistema 4B: Cemento Clase H + Aditivos + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica.....	146
5.3.10. Sistema 4C: Cemento Clase H + Aditivos + Agua. Curado a 168 °F y 3000 psi.....	148
5.4. Evaluación de las Velocidades de Propagación de Ondas de la Formación .	150
5.5. Análisis de Resultados	150
5.5.1. Análisis de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico.....	150
5.5.2. Análisis de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico.....	158
5.5.3. Análisis de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico.....	165
5.5.4. Análisis de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Acústico	173
5.5.5. Análisis de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico	180
5.5.6. Análisis de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico	187
5.5.7. Análisis de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico	194
5.5.8. Análisis de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico	200

5.5.9. Análisis de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico	207
5.5.10. Análisis de los Módulos Elásticos de la Formación y la Lechada	214
CONCLUSIONES	216
RECOMENDACIONES	217
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	218
BIBLIOGRAFÍA	220

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Clinker ^[1]	6
Figura 2.2. Composición del Cemento Portland ^[3]	8
Figura 2.3. Fuerzas y esfuerzos sobre un cuerpo ^[6]	16
Figura 2.4. Esfuerzo local ^[6]	17
Figura 2.5. Descomposición de la fuerza ^[6]	17
Figura 2.6. Deformación de un cuerpo ^[6]	18
Figura 2.7. Deformación ^[6]	19
Figura 2.8. Deformación producida por una fuerza externa ^[6]	20
Figura 2.9. Módulo de Bulk ^[7]	21
Figura 2.10. Módulo de Corte ^[7]	22
Figura 2.11. Curva Esfuerzo-Deformación Típica ^[9]	25
Figura 2.12. Propagación de las ondas P y S ^[10]	28
Figura 3.1. Cuenca Oriental de Venezuela ^[12]	33
Figura 3.2. Ubicación geográfica del Campo Travi Norte ^[15]	35
Figura 3.3. Sistema de Fallas alrededor de la Localización Travi Norte ^[15]	35
Figura 3.4. Diagrama mecánico recomendado para perforaciones en el Campo Travi ^[16]	39
Figura 3.5. Difracción de Rayos X para el Pozo TRV-6X ^[16]	40
Figura 4.1. Balanza Electrónica Marca Mettler Modelo PM 4000.....	46
Figura 4.2. Mezcladora Marca Chandler Engineering Modelo 30-60.....	47
Figura 4.3. Consistómetro Atmosférico Marca Chandler Engineering Modelo 1200.....	48
Figura 4.4. Consistómetro Presurizado Marca Chandler Engineering Modelo 7222.....	49

Figura 4.5. Cilindro Graduado 250 mL. Marca Halliburton.	49
Figura 4.6. Cámara de Curado Atmosférica Marca Thermo Electron Modelo WB1110A-1.	50
Figura 4.7. Cámara de Curado HPHT Marca OTI Modelo 200.....	51
Figura 4.8. Prensa Mecánica Marca Shimadzu Modelo UH-20A.	52
Figura 4.9. Analizador de Propiedades Mecánicas Marca Chandler Engineering Modelo 6265 MPRO.	53
Figura 4.10. Esquema Metodológico.	54
Figura 5.1. Tiempo de Espesamiento para la lechada de Cemento Clase G.....	69
Figura 5.2. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase H.....	69
Figura 5.3. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase G. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.....	70
Figura 5.4. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.	72
Figura 5.5. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 8 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	73
Figura 5.6. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 12 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	73
Figura 5.7. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 16 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	73
Figura 5.8. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 20 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	74
Figura 5.9. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 24 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	74
Figura 5.10. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 48 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	74

Figura 5.11. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase G. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.....	76
Figura 5.12. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.	78
Figura 5.13. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 4 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	78
Figura 5.14. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 8 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	79
Figura 5.15. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 12 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	79
Figura 5.16. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 16 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	79
Figura 5.17. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 20 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	80
Figura 5.18. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 24 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	80
Figura 5.19. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 48 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	80
Figura 5.20. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase H. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.....	82
Figura 5.21. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.	84
Figura 5.22. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 8 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	85
Figura 5.23. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 12 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	85

Figura 5.24. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 16 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	85
Figura 5.25. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 20 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	86
Figura 5.26. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 24 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	86
Figura 5.27. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 48 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	86
Figura 5.28. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase H. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.	88
Figura 5.29. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.	90
Figura 5.30. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 4 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	91
Figura 5.31. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 8 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	91
Figura 5.32. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 12 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	91
Figura 5.33. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 16 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	92
Figura 5.34. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 20 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	92
Figura 5.35. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 24 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	92
Figura 5.36. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 48 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	93

Figura 5.37. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.....	95
Figura 5.38. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica. ..	97
Figura 5.39. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 12 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	97
Figura 5.40. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 16 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	98
Figura 5.41. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 20 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	98
Figura 5.42. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 24 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	98
Figura 5.43. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 48 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	99
Figura 5.44. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.....	100
Figura 5.45. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.	102
Figura 5.46. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 8 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	103
Figura 5.47. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 12 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	103
Figura 5.48. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 16 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	103
Figura 5.49. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 20 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	104

Figura 5.50. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 24 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	104
Figura 5.51. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 48 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	104
Figura 5.52. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 168 °F y 3000 psi.....	106
Figura 5.53. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 168 °F y 3000 psi.	108
Figura 5.54. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 8 horas a 168 °F y 3000 psi.	109
Figura 5.55. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 12 horas a 168 °F y 3000 psi.	109
Figura 5.56. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 16 horas a 168 °F y 3000 psi.	110
Figura 5.57. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 20 horas a 168 °F y 3000 psi.	110
Figura 5.58. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 24 horas a 168 °F y 3000 psi.	110
Figura 5.59. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 48 horas a 168 °F y 3000 psi.	111
Figura 5.60. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.....	113
Figura 5.61. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.	115
Figura 5.62. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 12 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	115

Figura 5.63. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 16 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	116
Figura 5.64. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 20 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	116
Figura 5.65. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 24 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	116
Figura 5.66. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 48 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.	117
Figura 5.67. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.....	118
Figura 5.68. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.	120
Figura 5.69. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 12 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	121
Figura 5.70. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 16 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	121
Figura 5.71. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 20 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	121
Figura 5.72. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 24 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.	122
Figura 5.73. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 48 horas a 140 °F y Presión Atmosférica	122
Figura 5.74. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 168 °F y 3000 psi.....	124
Figura 5.75. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 168 °F y 3000 psi.	126

Figura 5.76. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 8 horas a 168 °F y 3000 psi.	126
Figura 5.77. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 12 horas a 168 °F y 3000 psi.	127
Figura 5.78. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 16 horas a 168 °F y 3000 psi.	127
Figura 5.79. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 20 horas a 168 °F y 3000 psi.	127
Figura 5.80. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 24 horas a 168 °F y 3000 psi.	128
Figura 5.81. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 48 horas a 168 °F y 3000 psi.	128
Figura 5.82. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.	131
Figura 5.83. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.	133
Figura 5.84. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.	135
Figura 5.85. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.	137
Figura 5.86. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.	139
Figura 5.87. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.	141

Figura 5.88. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 168 °F y 3000 psi.	143
Figura 5.89. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.	145
Figura 5.90. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.	147
Figura 5.91. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 168 °F y 3000 psi.	149
Figura 5.92. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 4 h.	151
Figura 5.93. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.	152
Figura 5.94. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.	153
Figura 5.95. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.	154
Figura 5.96. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.	155
Figura 5.97. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.	156

Figura 5.98. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.	157
Figura 5.99. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 4 h.	158
Figura 5.100. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.	159
Figura 5.101. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.	160
Figura 5.102. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.	161
Figura 5.103. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.	162
Figura 5.104. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.	163
Figura 5.105. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.	164
Figura 5.106. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 4 h.	165

Figura 5.107. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.	166
Figura 5.108. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.	168
Figura 5.109. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.	169
Figura 5.110. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.	170
Figura 5.111. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.	171
Figura 5.112. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.	172
Figura 5.113. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 4 h.	173
Figura 5.114. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.	174
Figura 5.115. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.	175

Figura 5.116. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.	176
Figura 5.117. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.	177
Figura 5.118. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.	178
Figura 5.119. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.	179
Figura 5.120. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.	181
Figura 5.121. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.	182
Figura 5.122. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.	183
Figura 5.123. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.	184
Figura 5.124. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.	185

Figura 5.125. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.	186
Figura 5.126. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.	188
Figura 5.127. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.	189
Figura 5.128. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.	190
Figura 5.129. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.	191
Figura 5.130. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.	192
Figura 5.131. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.	193
Figura 5.132. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.	194
Figura 5.133. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.	195

Figura 5.134. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.	196
Figura 5.135. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.	197
Figura 5.136. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.	198
Figura 5.137. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.	199
Figura 5.138. Gráfica Comparativa de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.	201
Figura 5.139. Gráfica Comparativa de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.	202
Figura 5.140. Gráfica Comparativa de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.	203
Figura 5.141. Gráfica Comparativa de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.	204
Figura 5.142. Gráfica Comparativa de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.	205

Figura 5.143. Gráfica Comparativa de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.	206
Figura 5.144. Gráfica Comparativa de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.	208
Figura 5.145. Gráfica Comparativa de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.	209
Figura 5.146. Gráfica Comparativa de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.	210
Figura 5.147. Gráfica Comparativa de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.	211
Figura 5.148. Gráfica Comparativa de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.	212
Figura 5.149. Gráfica Comparativa de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.	213

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Relación entre las Constantes Elásticas ^[8]	23
Tabla 4.1. Operacionalización de Variables	43
Tabla 4.2. Requerimientos para la preparación de la lechada.....	55
Tabla 4.3. Requerimientos de aceptación para el porcentaje de fluido libre.	56
Tabla 4.4. Requerimientos de aceptación para la resistencia a la compresión.	58
Tabla 4.5. Requerimientos de aceptación para el tiempo de espesamiento.	59
Tabla 4.6. Diseño del sistema cementante 3.	61
Tabla 4.7. Diseño del sistema cementante 4.	61
Tabla 5.1. Porcentaje de Fluido Libre a una Temperatura de 80 °F y Presión Atmosférica.	66
Tabla 5.2. Resistencia a la Compresión a una Temperatura de 100 °F y Presión Atmosférica para el Cemento Clase G. 8 horas de curado.	67
Tabla 5.3. Resistencia a la Compresión a una Temperatura de 140 °F y Presión Atmosférica para el Cemento Clase G. 8 horas de curado.	67
Tabla 5.4. Resistencia a la Compresión a una Temperatura de 100 °F y Presión Atmosférica para el Cemento Clase H. 8 horas de curado.	67
Tabla 5.5. Resistencia a la Compresión a una Temperatura de 140 °F y Presión Atmosférica para el Cemento Clase H. 8 horas de curado.	68
Tabla 5.6. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase G.....	71
Tabla 5.7. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.....	75
Tabla 5.8. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 140 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase G.....	77

Tabla 5.9. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.....	81
Tabla 5.10. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H.....	83
Tabla 5.11. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase H. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.	87
Tabla 5.12. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 140 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H.....	89
Tabla 5.13. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase H. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.	93
Tabla 5.14. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H + Aditivos.	96
Tabla 5.15. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica. ..	99
Tabla 5.16. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 140 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase G + Aditivos.	101
Tabla 5.17. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.	105
Tabla 5.18. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 168 °F y 3000 psi para el Cemento Clase G + Aditivos.....	107
Tabla 5.19. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 168 °F y 3000 psi.	111
Tabla 5.20. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H + Aditivos.	113
Tabla 5.21. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.	117

Tabla 5.22. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 140 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H + Aditivos.	119
Tabla 5.23. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.	123
Tabla 5.24. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 168 °F y 3000 psi para el Cemento Clase H + Aditivos.	124
Tabla 5.25. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 168 °F y 3000 psi.	129
Tabla 5.26. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase G. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.	130
Tabla 5.27. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase G. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.	131
Tabla 5.28. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase G. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.	132
Tabla 5.29. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase G. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.	133
Tabla 5.30. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase H. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.	134
Tabla 5.31. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase H. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.	135
Tabla 5.32. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase H. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.	136
Tabla 5.33. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase H. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.	137
Tabla 5.34. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica. ..	138

Tabla 5.35. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.	139
Tabla 5.36. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica. ..	140
Tabla 5.37. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.	141
Tabla 5.38. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 168 °F y 3000 psi.	142
Tabla 5.39. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 168 °F y 3000 psi.	143
Tabla 5.40. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica. ..	144
Tabla 5.41. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.	145
Tabla 5.42. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica. ..	146
Tabla 5.43. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.	147
Tabla 5.44. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 168 °F y 3000 psi.	148
Tabla 5.45. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 168 °F y 3000 psi.	149
Tabla 5.46. Constantes Elásticas de la Formación para la Profundidad.	150
Tabla 5.47. Tabla Comparativa de los Resultados de las Constantes Elásticas de la Formación y el Diseño Cementante S3	214

INTRODUCCIÓN

La cementación tiene como objetivo principal proveer un aislamiento zonal entre el revestimiento y las formaciones que han sido perforadas, evitando la comunicación de fluidos entre zonas de baja presión existentes a lo largo del pozo. Sin embargo, en procesos de cementación realizados de forma correcta que inicialmente proveían un buen sello hidráulico, muchas veces presentan la pérdida del aislamiento zonal con el paso del tiempo. Esta pérdida puede ser producto de un fracturamiento de una zona equivocada durante el proceso de estimulación del pozo o presentar un problema de migración de gas o agua que no fue detectado inicialmente.

Los diferentes cambios de las condiciones del hoyo en la sección revestida pueden ocasionar esfuerzos en el cemento y provocar esta pérdida. Entre los procesos que pueden ocasionar dichas variaciones se pueden mencionar: la perforación del pozo, la producción y la estimulación del yacimiento. Es por ello, que para realizar una cementación exitosa se deben tomar en cuenta diversos factores, entre los que se destacan: variaciones de presión y temperatura en el fondo del hoyo, gradiente de temperatura y fractura de la formación, entre otros.

Las variaciones de presión y temperatura durante la vida del pozo ocasionan cargas aplicadas al cemento, lo que promueve en forma adicional la pérdida de adherencia del cemento. Así pues, la planificación del proceso de cementación debe considerar las propiedades mecánicas y acústicas del cemento, y no sólo las propiedades de diseño del mismo.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto se realizarán diferentes ensayos: el primero permitirá medir los módulos elásticos estáticos mediante pruebas de esfuerzo y deformación; posteriormente se medirán los módulos elásticos dinámicos haciendo uso de las ondas de propagación P y S a diferentes núcleos de cemento.

A fin de lograr la meta planteada, la investigación a realizarse ha sido organizada en cinco capítulos.

- ✓ El Capítulo I expondrá los fundamentos de la investigación, los cuales versarán en torno al planteamiento del problema, objetivos, alcance y justificación.
- ✓ El Capítulo II presentará el marco teórico correspondiente.
- ✓ El Capítulo III describirá el área en estudio: ubicación, geología y estratigrafía.
- ✓ El Capítulo IV explicará la metodología a seguir para desarrollar satisfactoriamente la investigación.
- ✓ El Capítulo V presentará los resultados obtenidos y sus respectivos análisis.
- ✓ Finalmente se darán a conocer las conclusiones obtenidas, las recomendaciones para futuras investigaciones y el material de referencia.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.Planteamiento del Problema

El proceso de cementación de un pozo de hidrocarburo es una de las operaciones de mayor relevancia, el mismo consiste en colocar una lechada de cemento entre el revestimiento y la formación expuesta del hoyo. Existen dos tipos de cementación: la primaria, la cual provee una zona de aislamiento, creando un sello hidráulico revestimiento-cemento y cemento-formación, mientras que, al mismo tiempo previene la canalización de los fluidos de la formación. Por otra parte la cementación secundaria se efectúa para reparar fallas de la cementación primaria.

Por largo tiempo las complicaciones en la cementación se debieron a los problemas generados por los altos esfuerzos a las cuales está sometido el cemento fraguado, por consiguiente, es necesario realizar el estudio de dichas cargas tomando en cuenta las condiciones de pozo para minimizar éstas deficiencias.

Para obtener una lechada adecuada se deben optimizar sus diferentes propiedades. Entre ellas se destacan las propiedades físicas, éstas permiten conocer si la lechada diseñada tiene las características apropiadas para soportar las condiciones a las cuales se va realizar el proceso de cementación del pozo.

En este sentido, surge el interés y la necesidad de estudiar las propiedades mecánicas mediante el análisis del módulo elástico estático y las propiedades acústicas por medio del módulo elástico dinámico en distintos sistemas cementantes tanto a condiciones de laboratorio como en condiciones de envejecimiento.

1.2.Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Caracterizar diferentes sistemas cementantes mediante sus propiedades mecánicas y acústicas tanto a condiciones de laboratorio como a condiciones de pozo.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Formular diferentes sistemas cementantes.
2. Medir los módulos elásticos estáticos en los sistemas cementantes formulados, mediante pruebas de esfuerzo versus deformación.
3. Medir los módulos elásticos dinámicos de sistemas cementantes formulados mediante la propagación de ondas P y S.
4. Establecer comparaciones de las propiedades medidas en los sistemas cementantes formulados.

1.3.Alcance

Los sistemas cementantes serán preparados tomando en cuenta los requerimientos del proceso de cementación. A cada uno de ellos se le evaluarán los módulos elásticos tanto estáticos como dinámicos, para posteriormente comparar los resultados.

1.4.Justificación

Las nuevas tecnologías hacen posible medir características físicas del cemento a condiciones de yacimiento. El uso de ondas ultrasónicas y ensayos uniaxiales permiten determinar propiedades físicas como los coeficientes de Lamé, la máxima resistencia al esfuerzo, los módulos elásticos y la posibilidad de identificar la presencia de microfallas, la adherencia mecánica, el sello hidráulico entre otras.

En la actualidad sólo se han realizado ensayos acústicos haciendo uso de las ondas P. Este trabajo de grado pretende caracterizar los cementos mediante ensayos simultáneos que tomen en cuenta las ondas P y S, para luego calcular los módulos elásticos y compararlos con los obtenidos en los ensayos de esfuerzo-deformación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

La cementación en la construcción de pozos de petróleo, es un proceso que consiste en mezclar cemento seco más aditivos y agua para obtener una lechada que es bombeada al pozo a través de la tubería de revestimiento y colocada en el espacio anular entre la formación y la superficie externa del revestidor, luego se deja fraguar y endurecer, formando una barrera permanente e impermeable que impide el movimiento de los fluidos detrás del revestidor, con la finalidad de asegurar la producción de los fluidos del yacimiento hacia la superficie.

La realización de un trabajo de cementación satisfactorio es una fase muy importante en la vida de un pozo, es por ello, que se deben conocer los requerimientos técnicos y operacionales para diseñar una lechada de cemento que cumpla con éstos.

El éxito de la cementación depende entre otros factores, de la calidad inicial de los materiales protagonistas de la lechada: el cemento Portland, los aditivos químicos y el agua.

En general, los tipos de cementos utilizados durante la cementación de un pozo, deben mantener los estándares de alto rendimiento en condiciones extremas de presión y temperatura del pozo, así como también, deben presentar una adecuada distribución de las fases líquida y sólida, y un tamaño óptimo de las partículas durante el mezclado con otros aditivos, que permitan asegurar la resistencia a la compresión y la baja permeabilidad del cemento; principales parámetros en el éxito de la cementación de pozos.

2.1.Cemento

Mezcla homogénea natural o artificial, compuesta principalmente de caliza y arcilla, la cual al ser calentada a temperaturas comprendidas entre los 1280°C y 1350°C, forma una fase líquida de silicatos y aluminatos en mayor o menor proporción, disminuyendo considerablemente el contenido de óxido de calcio (CaO) libre. Como resultado, se genera un aglomerado, conocido como *clinker* de cemento natural (ver Figura 2.1). El producto obtenido es molturado al tamaño de grano adecuado para su uso. Al mezclarse con agua y gracias al proceso de hidratación forma una pasta la cual desarrolla rigidez y resistencia compresiva (dureza).^[1]



Figura 2.1. Clinker^[1].

2.1.1. Cemento Portland

Patentado por Joseph Aspdin el 21 de Octubre de 1824. Debe su nombre a la semejanza con la roca caliza perteneciente al período Jurásico tardío, extraída de la isla de Portland en Dorset, Inglaterra.

El cemento Portland es un material ideal para las operaciones de cementación de pozos, debido a que es un cemento hidráulico que desarrolla esfuerzos compresivos como resultado de la hidratación, lo que implica la reacción química entre el agua y los componentes presentes en el mismo. El cemento fraguado tiene baja permeabilidad y es casi insoluble en agua, lo que permite lograr y mantener un buen aislamiento zonal.

La composición del cemento es variable de acuerdo a su aplicación, siendo una mezcla homogénea de materiales arcillosos y calcáreos, más otros materiales que contienen sílica, aluminio y minerales de hierro, los cuales son quemados en el horno rotatorio a temperaturas tan altas como 1500 °C. Esta mezcla es enfriada, posteriormente se muele y da como resultado el *clinker*. Así pues, el cemento Portland es esencialmente un polvo compuesto por una mezcla de *clinker* (95%) y yeso (5%).^[2]

2.2.Composición Química del Cemento

Después de ser elaborado el cemento, se realiza un análisis químico donde se identifica dos grupos de compuestos: componentes primarios y componentes secundarios. De acuerdo a su función dependerá su clasificación.

Existen cuatro principales componentes:

- **Silicato Dicálcico.** De fórmula química $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$; causa que el cemento endurezca a largo plazo ya que genera una baja hidratación del ambiente.
- **Silicato Tricálcico.** De fórmula química $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$; es el componente de mayor proporción dentro del cemento, entre mayor sea el contenido de éste, más rápido se desarrollan las resistencias iniciales ocasionando así el endurecimiento temprano que comprende de 1 a 28 días.
- **Ferrito Aluminato Tetracálcico.** De fórmula química $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; proporciona bajo calor en el proceso de hidratación durante el fraguado y el endurecimiento.
- **Aluminato Tricálcico.** De fórmula química $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$; promueve una rápida hidratación del cemento y controla el fraguado y el tiempo de fraguado.

Los componentes secundarios provienen de las impurezas que pueda presentar la materia prima. El término secundario no se refiere a su importancia e influencia, sino a la menor proporción en que aparecen en la composición del *clinker*. Entre ellos se pueden señalar:^[2]

- **Magnesio.** Si es añadido en exceso ocasiona una expansión en el cemento ya fraguado y puede producir fracturas. El contenido de óxido de magnesio debe ser inferior al 5%.
- **Cal libre.** Es nociva debido a que causa agrietamientos, hinchamientos y expansiones en el cemento. En la actualidad el porcentaje de cal libre no excede el 1% de su composición.
- **Álcalis.** La reacción entre los álcalis y el resto de los compuestos es expansivo, un exceso de este da como resultado el fracturamiento del cemento.

Una composición típica del cemento viene dada por: ^[3]

- 50 – 70% de silicato tricálcico.
- 15 – 30% de silicato dicálcico.
- 5 – 10% de aluminato tricálcico.
- 5 – 15% de aluminoferrito tetracálcico.
- 3 – 8% de otros aditivos o minerales como óxido de calcio y magnesio.

En la Figura 2.2 se puede observar una representación esquemática de un corte transversal de un grano de cemento Portland.

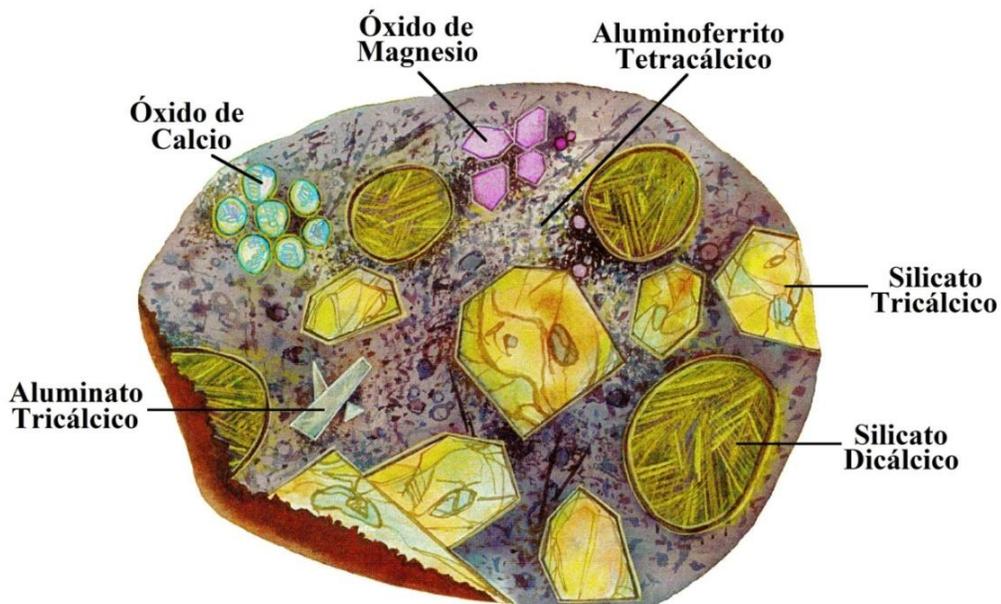


Figura 2.2. Composición del Cemento Portland ^[3].

2.3. Clasificación del Cemento

De acuerdo a su composición química, física y granulométrica, el cemento tiene diferentes usos, bien sea en la construcción o en la industria petrolera.

Entre las organizaciones que regulan la elaboración de los cementos, se destacan:

- API, por sus siglas en inglés *American Petroleum Institute*.
- ASTM, por sus siglas en inglés *American Society for Testing Materials*.
- ACI, por sus siglas en inglés *American Concrete Institute*.

La industria petrolera se rige principalmente por las normas propuestas en la API. Las condiciones a las cuales se somete el cemento Portland en los pozos varían considerablemente. La clasificación API toma en cuenta la profundidad, temperatura y presión a la cual el cemento va a estar expuesto. Entre las normas API que se aplican en cementación, se destacan: ^[4]

- Spec 10A: *Specification for Cements and Materials for Well Cementing*. Establece los requerimientos físicos y químicos del cemento, así como los procedimientos para realizar pruebas físicas. Esta norma considera nueve clases de cemento Portland.
- RP 10B: *Recommended Practice for Testing Well Cements*. Proporciona los procedimientos recomendados para realizar muestreo, preparación de la lechada, determinación de resistencia a la compresión, tiempo de bombeo del cemento, tiempo de filtrado, permeabilidad y propiedades reológicas.

A continuación se presenta una descripción de la clasificación del cemento Portland según las Normas API. De igual forma, se indica de ser posible el equivalente propuesto por la ASTM. ^[5]

Clase A: Diseñado para ser aplicado desde superficie hasta profundidades de 6000 pies, cuando propiedades especiales no son requeridas en la cementación. Es comercializado sólo en tipo ordinario, posee poca

resistencia a sulfatos. El requerimiento de agua es del 46% en peso. La ASTM C150 clasifica a este cemento como Tipo I.

Clase B: Diseñado para ser aplicado desde superficie hasta profundidades de 6000 pies, cuando la cementación requiere de moderada a alta resistencia a los sulfatos. El requerimiento de agua es del 46% en peso. La ASTM C150 clasifica a este cemento como Tipo II.

Clase C: Diseñado para ser aplicado desde superficie hasta profundidades de 6000 pies, cuando la cementación requiere alta resistencia inicial. Es comercializado en tres tipos de resistencia a sulfatos: ordinaria, moderada y alta. El requerimiento de agua es del 56% en peso. La ASTM C150 clasifica a este cemento como Tipo III.

Clase D: Diseñado para ser aplicado desde 6000 pies hasta 10000 pies de profundidad, cuando la cementación requiere condiciones de temperatura y presión moderadamente altas. Es comercializado en dos tipos de resistencia a los sulfatos: moderada y alta. El requerimiento de agua es del 38% en peso.

Clase E: Diseñado para ser aplicado desde 10000 pies hasta 14000 pies de profundidad, cuando la cementación requiere condiciones de temperatura y presión altas. Es comercializado en dos tipos de resistencia a los sulfatos: moderada y alta. El requerimiento de agua es del 38% en peso.

Clase F: Diseñado para ser aplicado desde 10000 pies hasta 16000 pies de profundidad, cuando la cementación requiere condiciones de temperatura y presión extremadamente altas. Es comercializado en dos tipos de resistencia a los sulfatos: moderada y alta. El requerimiento de agua es del 38% en peso.

Clase G: Diseñado para ser aplicado desde superficie hasta profundidades de 8000 pies, es un cemento base el cual puede ser usado directamente o añadirsele aceleradores o retardadores químicos cubriendo así un amplio rango de temperaturas y presiones. No se debe agregar o mezclar ningún aditivo al *clinker* en el momento de la manufactura del cemento, con excepción del sulfato de calcio o agua o la combinación de ambos. Es comercializado en dos tipos de resistencia a los sulfatos: moderada y alta. El requerimiento de agua es del 44% en peso.

Clase H: La composición química de éste, es idéntica al cemento clase G, la diferencia radica en la forma de moler los componentes, originando así una granulometría diferente. El cemento clase G posee granos más pequeños que el cemento clase H, con lo cual se obtienen densidades menores. El requerimiento de agua es del 38% en peso.

Clase J: Diseñado para ser aplicado desde 12000 pies hasta 16000 pies de profundidad, cuando la cementación requiere condiciones de temperatura y presión extremadamente altas. Puede añadirsele aceleradores y retardadores químicos cubriendo así un amplio rango de profundidades y temperaturas.

2.4.Diseño de la Lechada de Cemento

Las propiedades y el comportamiento de una lechada de cemento dependen de una gran variedad de aspectos que deben ser considerados al momento de su diseño. En cualquier trabajo de cementación, estos factores se encuentran clasificados en tres grandes categorías:

- La profundidad y la configuración anular del hoyo, los cuales sugieren el régimen de flujo más apropiado y las propiedades reológicas requeridas.
- Las condiciones del hoyo, las cuales indican los materiales especiales que deben ser incorporados debido a la presencia de gas, sales, entre otros.

-
- La temperatura del fondo, que junto a los demás factores, guían la selección de los aditivos para el control de las propiedades reológicas de la lechada y el tiempo de espesamiento.

Así pues, el diseño de una lechada de cemento contempla los siguientes pasos:

- Determinar la geometría del hoyo perforado de acuerdo al resultado de la herramienta *caliper*, o en su defecto, por estimación.
- Obtener información sobre la densidad del lodo utilizado, con el fin de determinar el rango de densidades en las que se encontrará la lechada.
- Determinar la altura de la columna de cemento y los tipos de formaciones expuestas.
- Determinar la presión de fractura en función de la profundidad, para seleccionar la densidad máxima de la lechada y la presión de bombeo máxima.
- Obtener información sobre la temperatura estática, circulante y de fondo de hoyo.
- Determinar si existen condiciones especiales que requieran del control de la pérdida de fluido, prevención de la migración de gas, entre otros.
- Estimar el tiempo de bombeo y de acuerdo al factor de seguridad utilizado, determinar el tiempo de espesamiento requerido de la lechada.
- Estimar la tasa de bombeo a utilizar, de acuerdo al régimen de flujo que se desea desarrollar para desplazar la lechada.
- Seleccionar el diseño inicial de la lechada para la prueba.

2.5. Aditivos Utilizados en la Preparación de la Lechada de Cemento

La perforación de pozos petroleros cubre amplios rangos de profundidades y diversas condiciones de presión y temperatura. La cementación debe ser diseñada para contener formaciones no consolidadas y/o de baja resistencia mecánica, prevenir la migración de fluidos corrosivos o provenientes de formaciones sobrepresurizadas.

Los aditivos son agentes químicos y físicos que modifican el comportamiento de la lechada de cemento. Su finalidad principal es facilitar las operaciones permitiendo: una óptima colocación del cemento entre el revestidor y la formación, un desarrollo

rápido de la resistencia a la compresión y un aislamiento adecuado entre zonas durante la vida útil del pozo.

Actualmente existe una gran variedad de aditivos disponibles para ser utilizados en las mezclas de las lechadas de cemento, muchos de ellos pueden encontrarse tanto en forma sólida como líquida. Las cantidades de aditivos secos se expresan en porcentaje por peso de cemento, % BWOC por sus siglas en inglés *By Weight Of Cement*, y los aditivos líquidos en galones por saco, GPS por sus siglas en inglés *Galon Per Sac of cement*. A continuación se presenta una breve descripción de estos: ^[5]

2.5.1. Aceleradores

Son añadidos a la mezcla de cemento con el fin de reducir el tiempo de espesamiento y de fraguado de la lechada. También ayudan a aumentar la tasa de desarrollo de la resistencia a la compresión. Generalmente son utilizados para contrarrestar los efectos secundarios retardadores de otros aditivos como los dispersantes o controladores de filtrado. De igual forma, se emplean en pozos someros donde las temperaturas son bajas.

2.5.2. Retardadores

Son análogos a los aceleradores, ya que modifican el tiempo de espesamiento pero de manera inversa a estos. Como su nombre lo indica su principal función es retardar el fraguado, o dicho de otra forma, extender el tiempo de espesamiento de una lechada de cemento con ciertas características. Generalmente, se utilizan cuando la cementación se debe realizar en secciones más profundas, donde las temperaturas elevadas influyen en un asentamiento acelerado.

2.5.3. Extendedores

Son materiales añadidos a la mezcla de cemento con el fin de reducir la densidad de la lechada o disminuir la cantidad de cemento requerida por unidad del material fraguado. Esta reducción a su vez, disminuye la presión hidrostática que ejerce la columna de cemento durante la cementación, y ayuda a prevenir la fractura de las formaciones y pérdidas de circulación.

2.5.4. Densificantes

Son agregados a la mezcla de cemento con el fin de incrementar la densidad de la lechada o aumentar la cantidad de cemento requerida por unidad del material fraguado, con el propósito de incrementar la presión hidrostática que ejerce la columna de cemento durante la cementación en zonas sobre presurizadas.

2.5.5. Dispersantes

Son aditivos que se utilizan para mejorar las propiedades reológicas de la lechada, debido a que las lechadas de cemento son suspensiones de partículas sólidas en agua, altamente concentradas. Adicionalmente, sirve como un reductor de viscosidad, lo que permite obtener flujo turbulento a una presión circulante menor y no incurrir en pérdidas indeseadas.

2.5.6. Controladores de Filtrado

Estos aditivos permiten controlar la pérdida de la fase acuosa de los sistemas cementantes cuando se está en presencia de una formación permeable. Asimismo, este material previene la deshidratación y el fraguado prematuro de la lechada. También se utilizan para disminuir el contenido de agua libre en la lechada.

2.5.7. Controladores de Gas o Antimigratorio

Su principal función es prevenir la migración de gas proveniente de la formación hacia la columna de cemento bombeada en el hoyo. La lechada de cemento, tanto en su estado líquido, al ser bombeado, como en su estado sólido, cemento endurecido, no permite la migración de gas que ocurre en el período de transición entre ambos estados, en la que la mezcla se asemeja a un gel. Estos agentes reducen el tiempo de transición entre la fase líquida y la gaseosa, disminuyendo así, la cantidad de gas que penetra en el cemento.

2.5.8. Antiespumante

Algunos aditivos utilizados en la preparación de las lechadas de cemento pueden ocasionar la formación de espuma durante el mezclado. La presencia de espuma en una lechada puede traer consecuencias que van desde un aumento no deseado de la

densidad de la lechada hasta problemas de cavitación en las bombas y los sistemas de mezclado. Los agentes antiespumantes son añadidos al agua de mezclado o directamente a la lechada para evitar la formación de espuma.

2.6.Elasticidad

La elasticidad se refiere a la habilidad que presentan la mayoría de los materiales para resistirse y recuperarse de las deformaciones producidas por diferentes fuerzas. El comportamiento más simple, es cuando existe una relación lineal entre las fuerzas externas aplicadas y las deformaciones correspondientes. Si las fuerzas aplicadas son muy pequeñas, la respuesta es lineal.

2.6.1. Elasticidad Lineal

Los conceptos de esfuerzo y deformación son necesarios para entender la teoría de elasticidad. A continuación se definen cada uno de ellos.

2.6.1.1.Esfuerzo

Se define como la capacidad que posee un cuerpo para resistir carga por unidad de área. Las unidades de esfuerzo más frecuentes son Pascal [$\text{Pa}=\text{N}/\text{m}^2$], bar, atmósfera, lpc, dinas/cm². Sin embargo, para cálculos teóricos, la unidad en el sistema internacional es Pascal, mientras que las restantes son usadas comúnmente en el área de ingeniería.

El esfuerzo se denota con la letra σ , el signo del mismo no está definido únicamente por la física propia de la situación, sino que se establece por convención. En mecánica de rocas los esfuerzos compresivos son positivos, esto debido a que la mayoría de los esfuerzos son casi exclusivamente de este tipo.

En la Figura 2.3 se puede observar la representación esquemática de un peso sobre el tope de un cuerpo. Como consecuencia del peso, una fuerza F actúa sobre el cuerpo, asimismo, el cuerpo reacciona con una fuerza de igual magnitud pero en sentido contrario. Dicha fuerza actúa a través de cualquier sección transversal del cuerpo.

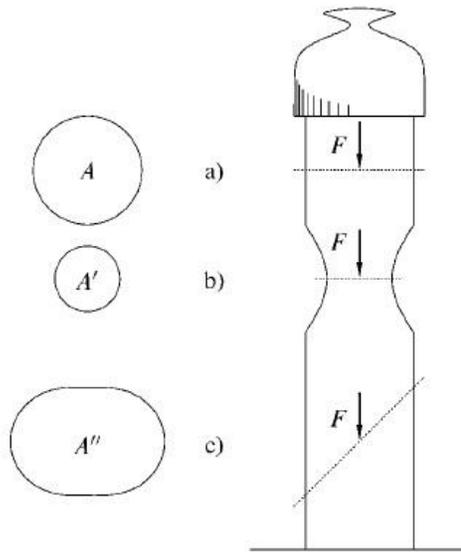


Figura 2.3. Fuerzas y esfuerzos sobre un cuerpo ^[6].

El área de la sección transversal a) es A en m^2 . Si la fuerza actuante sobre dicha sección se denota con la letra F en N , entonces el esfuerzo σ en Pa está definido como:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

La magnitud de la fuerza que actúa sobre la sección b) a través del área transversal A' es igual a la fuerza que actúa sobre la sección a). Se observa que el área A' de la sección b) es más pequeña que el área A de la sección a), así pues, el esfuerzo ocasionado en b) es mayor que el esfuerzo aplicado sobre la sección a).

Se puede dividir la sección transversal a) en un número infinito de subsecciones ΔA , a través de las cuales actúa una parte infinitesimal ΔF de la fuerza total F , como se muestra en la Figura 2.4. La fuerza ΔF puede variar de una subsección a otra, por lo tanto, se puede considerar a una subsección i , la cual contiene un punto P . El esfuerzo sobre el punto P se define como:

$$\sigma = \lim_{\Delta A_i \rightarrow 0} \frac{\Delta F_i}{\Delta A_i} \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 representa el esfuerzo local en el punto P dentro de la sección transversal a) mientras que la ecuación 2.1 describe el esfuerzo promedio en la sección transversal.

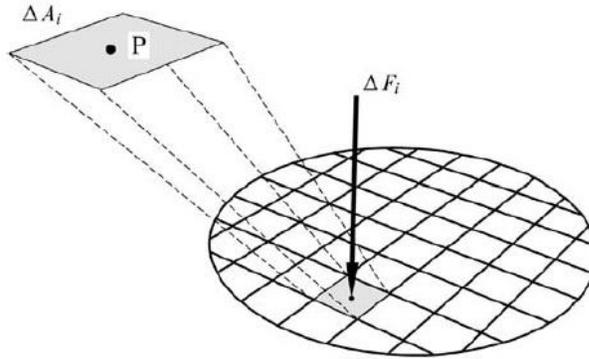


Figura 2.4. Esfuerzo local ^[6].

En la sección c) de la Figura 2.3 se tiene un área transversal A'' , donde la fuerza que experimenta no es solamente normal a la sección transversal. Esta fuerza se puede descomponer en una componente F_n , que es normal a la sección transversal y una componente F_p paralela a ésta sección, como se muestra en la Figura 2.5.

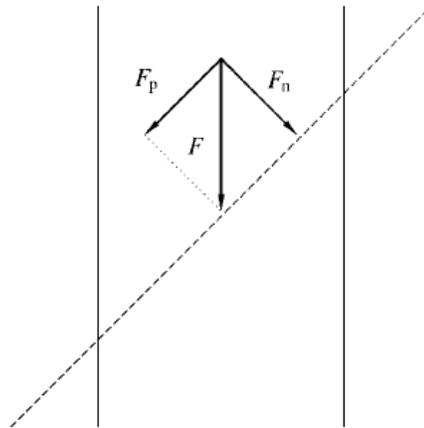


Figura 2.5. Descomposición de la fuerza ^[6].

Así pues, se define el esfuerzo normal como:

$$\sigma = \frac{F_n}{A''} \quad (2.3)$$

Y el esfuerzo cortante, τ en Pa, como:

$$\tau = \frac{F_P}{A''} \quad (2.4)$$

Se debe acotar que los esfuerzos generados multiplicados por las respectivas áreas dan como resultados fuerzas, así pues, en una sección i , la suma vectorial de estas fuerzas es lo que mantiene el cuerpo en equilibrio.

2.6.1.2. Deformación

Se define como la relación que existe entre la nueva magnitud o forma de un cuerpo y su configuración original o no alterada, cuando es sometido a fuerzas externas.

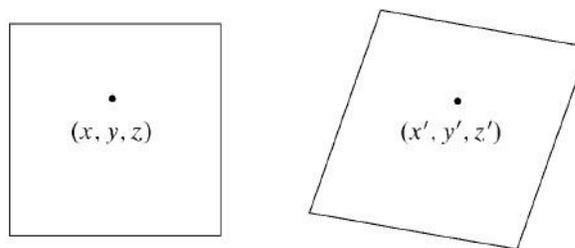


Figura 2.6. Deformación de un cuerpo ^[6].

En la Figura 2.6 se observa la posición de una partícula específica dentro de una muestra como x, y, z , expresadas en mm. Al ejercer una fuerza externa a la muestra, la posición inicial de la partícula es alterada x', y', z' , expresadas en mm. Denotaremos el cambio en la dirección x como u , en la dirección y como v y en la dirección z como w . Las cantidades u, v, w representan el desplazamiento de la partícula, expresadas en mm. Las ecuaciones siguientes indican la nueva posición de la partícula.

$$x' = x - u \quad (2.5)$$

$$y' = y - v \quad (2.6)$$

$$z' = z - w \quad (2.7)$$

Los desplazamientos son positivos cuando están dirigidos en dirección negativa a los ejes de coordenadas. Así pues, si los desplazamientos u, v, w son constantes, entonces son iguales para cada partícula de la muestra. En este caso, el desplazamiento es simplemente la traslación de un cuerpo rígido.

Si la posición relativa de las partículas dentro de la muestra cambia, entonces la nueva posición no puede obtenerse simplemente por la traslación rígida como se indicó anteriormente. En la Figura 2.7 se muestra un cuerpo deformado, donde se observa que los desplazamientos relativos de las posiciones O y P no son iguales.

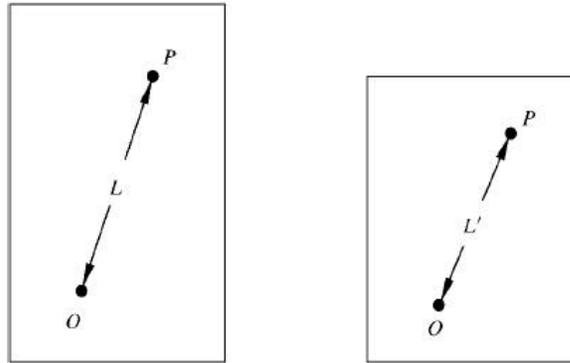


Figura 2.7. Deformación ^[6].

Se define así, el concepto de elongación ε expresado en mm/mm correspondiente al punto O y la dirección OP, siendo la elongación positiva para una contracción.

$$\varepsilon = \frac{L - L'}{L} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.8)$$

2.6.2. Constantes Elásticas

Se denominan así a los diferentes parámetros que caracterizan el comportamiento elástico de un material en función del tipo de esfuerzo aplicado.

2.6.2.1. Módulo Elástico o Módulo de Young

Relación existente entre la magnitud de las fuerzas externas que provocan el alargamiento elástico de un cuerpo y el valor que dicha elongación alcanza. El módulo de Young también es conocido como módulo de elasticidad longitudinal. Mediante este parámetro se puede determinar que tanto se deforma un cuerpo en relación a la fuerza aplicada.

En la Figura 2.8 se tiene una muestra de longitud L y una sección transversal $A=D^2$.

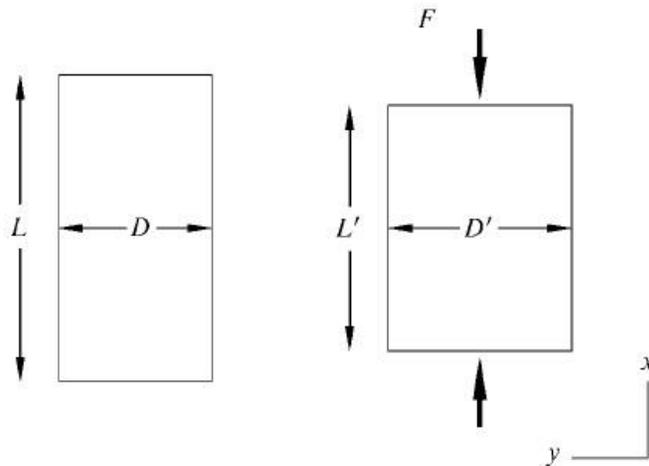


Figura 2.8. Deformación producida por una fuerza externa ^[6].

Se observa que la longitud inicial L de la muestra se ve reducida a L' , al ser aplicada una fuerza F sobre la superficie. El esfuerzo aplicado es entonces $\sigma_x = F / A$ y su correspondiente elongación es $\varepsilon_x = (L - L') / L$. Si la muestra tiene un comportamiento lineal, entonces existe una relación lineal entre ambos parámetros:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x \quad (2.9)$$

Esta ecuación representa la Ley de Hooke donde el coeficiente E es conocido como módulo de Young y se expresa en Pa. Así pues:

$$E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} \quad (2.10)$$

2.6.2.2. Módulo o Relación de Poisson

Es una relación en valores absolutos, entre las deformaciones lateral y axial cuando un cuerpo está sometido a una carga uniaxial. Su unidad es adimensional. Este parámetro indica una medida de dureza del material en estudio. Un material que bajo una fuerza se deforma tanto longitudinalmente como lateralmente deberá tener un módulo de Poisson de 0,5. Si el material no se deforma lateralmente bajo una carga longitudinal, deberá tener una relación de Poisson de 0.

En la Figura 2.8 también se observa un incremento en el ancho D de la muestra. La elongación lateral es $\varepsilon_y = \varepsilon_x = (D - D') / D$. En general $D' > D$, por lo tanto, ε_y y ε_x son negativos, existiendo una relación entre ellas:

$$\nu = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (2.11)$$

Esta ecuación es conocida como relación de Poisson y representa una medida de expansión lateral relativa a la contracción longitudinal.

2.6.2.3. Módulo de Bulk

Relación existente entre el esfuerzo normal σ_n y la deformación volumétrica ε_{vol} , viene dada por la siguiente ecuación:

$$K = \frac{\sigma_n}{\varepsilon_{vol}} \quad (2.12)$$

El coeficiente K es lo que se conoce como módulo de Bulk o módulo de deformación volumétrica, se expresa en Pa. Está asociado a los cambios de volumen del material bajo la acción de esfuerzos generalmente compresores, que actúan perpendicular a la superficie como se aprecia en la Figura 2.9. No implica un cambio de forma, tan solo de volumen. Mediante este parámetro se puede indicar el aumento de presión necesario para producir una disminución de volumen. Como K es una medida de resistencia a la compresión hidrostática, el inverso de K , es la compresibilidad.

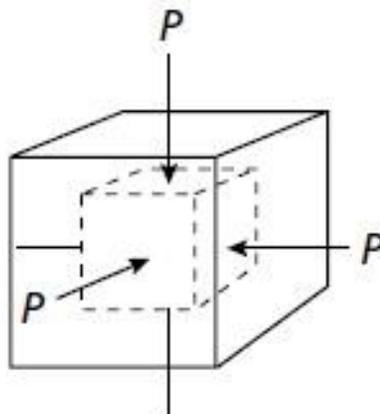


Figura 2.9. Módulo de Bulk ^[7].

2.6.2.4. Ecuaciones de Lamé

La ley de Hooke generalizada expresa las deformaciones en función de las tensiones. Las ecuaciones de Lamé resultan de invertir dichas relaciones a fin de expresar las tensiones en función de las deformaciones. Así pues, se mencionan dos nuevas constantes elásticas conocidas como coeficientes de Lamé: λ y μ .^[7]

Primer Coeficiente de Lamé

El primer coeficiente de Lamé, λ , expresado en Pa, es una propiedad física que representa la resistencia a la dilatación del material, Δ .

Segundo Coeficiente de Lamé: Módulo de Corte o Cizallamiento

El segundo coeficiente de Lamé, μ , expresado en Pa, es una propiedad física de los materiales que relaciona el esfuerzo tangencial σ_t y la deformación de corte ε_{cor} . Viene dada por la siguiente ecuación:

$$\mu = G = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_{cor}} \quad (2.13)$$

El coeficiente μ representa la segunda constante de Lamé también conocida como módulo de Corte o Cizallamiento, G . Está asociado a los cambios de forma del material bajo la acción de esfuerzos tangenciales a la superficie como se aprecia en la Figura 2.10. No implica un cambio de volumen, tan solo de forma.

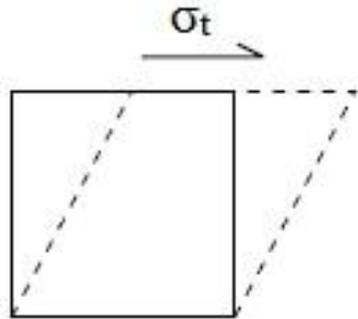


Figura 2.10. Módulo de Corte^[7].

2.6.2.5. Relación entre las Constantes Elásticas

Las constantes elásticas definidas anteriormente: módulo de Young (E), relación de Poisson (ν), módulo de Bulk (K), primera constante de Lamé (λ) y segunda constante de Lamé (μ), no son independientes la una de la otra. Así pues, el conocimiento de dos de ellas nos permite calcular las demás. En la Tabla 2.1 se muestra las diferentes relaciones entre las constantes elásticas:

Tabla 2.1. Relación entre las Constantes Elásticas ^[8].

	E	ν	K	λ	μ
(E, μ)	-	$\frac{E}{2\mu} - 1$	$\frac{E\mu}{3(3\mu - E)}$	$\frac{\mu(E - 2\mu)}{3\mu - E}$	-
(λ , μ)	$\frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}$	$\frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$	$\lambda + \frac{2\mu}{3}$	-	-
(K, λ)	$\frac{9K(K - \lambda)}{3K - \lambda}$	$\frac{\lambda}{3K - \lambda}$	-	-	$\frac{3(K - \lambda)}{2}$
(K, μ)	$\frac{9K\mu}{3K + \mu}$	$\frac{3K - 2\mu}{2(3K + \mu)}$	-	$K - \frac{2\mu}{3}$	-
(λ , ν)	$\frac{\lambda(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{\nu}$	-	$\frac{\lambda(1 + \nu)}{3\nu}$	-	$\frac{\lambda(1 - 2\nu)}{2\nu}$
(μ , ν)	$2\mu(1 + \nu)$	-	$\frac{2\mu(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$	$\frac{2\mu\nu}{1 - 2\nu}$	-
(E, ν)	-	-	$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	$\frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	$\frac{E}{2(1 + \nu)}$
(K, ν)	$3K(1 - 2\nu)$	-	-	$\frac{3K\nu}{1 + \nu}$	$\frac{3K(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)}$
(K, E)	-	$\frac{3K - E}{6K}$	-	$\frac{3K(3K - E)}{9K - E}$	$\frac{3KE}{9K - E}$

2.6.3. Elasticidad No Lineal

Para un material linealmente elástico, siempre hay una relación constante entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante, a pesar de la magnitud del esfuerzo y la deformación. Para ciertos materiales la relación esfuerzo-deformación es una línea recta, donde el módulo elástico correspondiente es la pendiente de la recta. ^[7]

Cualquier material que no obedezca una relación lineal esfuerzo-deformación, tiene un comportamiento no lineal. Para un material elástico no lineal, la relación esfuerzo-deformación puede ser descrita como:

$$\sigma = E_1 \varepsilon + E_2 \varepsilon^2 + E_3 \varepsilon^3 + \dots \quad (2.14)$$

El comportamiento no lineal puede tener varios casos y aparecer en diferentes formas. Este material tiene una relación esfuerzo-deformación no lineal, ya que, el radio de esfuerzo contra deformación no es el mismo para todos los esfuerzos. Sin embargo, la relación es idéntica para el proceso de carga y descarga. Se dice que tales materiales son perfectamente elásticos. Para estas relaciones no lineales, los módulos elásticos no están definidos únicamente para un nivel de esfuerzo específico.

La relación esfuerzo-deformación comúnmente observada en las rocas, es cuando el patrón de carga es diferente al patrón de descarga, este efecto es conocido como histéresis. Para materiales con comportamientos como éste, el trabajo realizado durante la carga no es enteramente solventado en la descarga, ya que parte de la energía se disipa en el material. El módulo elástico relacionado al patrón de descarga es llamado módulo de descarga.

Si al quitar la carga la deformación retorna a cero, se dice que el material es elástico. Para esfuerzos suficientemente grandes, muchas rocas entran en una fase donde ocurre una deformación permanente, sin embargo, el material todavía es capaz de resistir carga. En este caso, se dice que el material es dúctil. El punto donde ocurre la transición de comportamiento de elástico a dúctil es llamado punto cedente.

Para observar el proceso de deformación y falla del material, el método más común consiste en la compresión axial de cilindros hechos del material que será evaluado, para los cuales se miden las deformaciones laterales y axiales en función de la carga axial aplicada, para luego graficar los esfuerzos contra las deformaciones y efectuar su posterior interpretación. La Figura 2.11 presenta una curva tipo con su correspondiente análisis en función de las zonas de importancia.

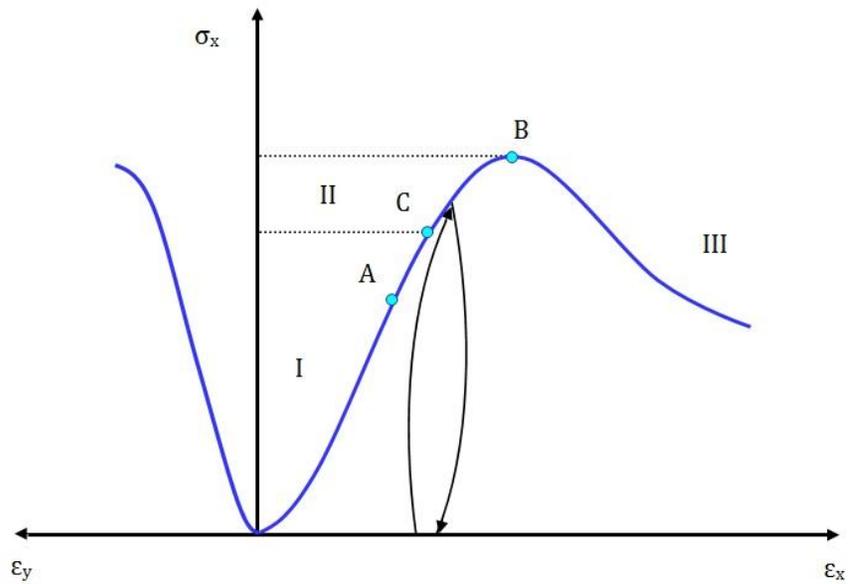


Figura 2.11. Curva Esfuerzo-Deformación Típica ^[9].

Del lado derecho de la Figura 2.11 se aprecia: En la región I, la cual, es ligeramente convexa hacia arriba, el comportamiento es prácticamente elástico. En esta región se destacan: el punto A, que es el límite de proporcionalidad y el punto C, que es el punto cedente. La histéresis puede estar presente, sin embargo, el proceso de carga y descarga no produce deformaciones permanentes. En la región II, la pendiente de la curva se degrada progresivamente hasta llegar a cero, al incrementarse los esfuerzos. En esta región se producen deformaciones irreversibles. El punto máximo B de la curva, se conoce como resistencia máxima del material o resistencia a la compresión y es en este punto donde la curva esfuerzo-deformación marca el punto de transición entre el comportamiento dúctil y el comportamiento frágil o quebradizo del material. Se dice que un material es dúctil cuando mantiene una deformación permanente sin perder su habilidad de resistir carga. Por último, en la región III, el material se comporta como un material quebradizo o frágil. Del lado izquierdo de la Figura 2.11 se muestra: La deformación radial producida en la muestra debido al esfuerzo axial aplicado, nótese que la deformación radial es menor que la deformación radial y el comportamiento de la relación de Poisson, es directamente dependiente de la deformación radial. Igualmente se estudian las regiones elásticas, plástica y la máxima resistencia al esfuerzo. ^[9]

2.7. Propiedades Mecánicas del Cemento

Los requerimientos para asegurar la integridad del cemento durante la vida productiva del pozo dependen de las propiedades mecánicas del mismo. Es necesario tomar en cuenta estas propiedades ya que el pozo está sujeto a cambios y esfuerzos. Éstas pueden dividirse en dos grandes grupos: estáticas y dinámicas.

Las propiedades estáticas abarcan las propiedades elásticas como el módulo de Young y relación de Poisson; asimismo se toma en cuenta los límites mecánicos: la resistencia a la compresión, a la tensión y al impacto. En cuanto a las propiedades mecánicas dinámicas, las mismas están relacionadas con las ondas de propagación P y S. A continuación se da una breve descripción de cada una de estas propiedades.

2.7.1. Propiedades Mecánicas Estáticas del Cemento

2.7.1.1. Propiedades Elásticas

El conocimiento de las propiedades elásticas del cemento es necesario para establecer la relación entre los esfuerzos y las deformaciones, aspecto que adquiere gran importancia en el diseño de las lechadas.

La relación entre los esfuerzos y las deformaciones se establece a través del módulo de elasticidad o módulo de Young descrito en la sección anterior. Para materiales totalmente elásticos, el módulo de elasticidad es constante e independiente del esfuerzo aplicado. Otros materiales como el cemento tienen un comportamiento que no es completamente lineal, por tanto, el módulo de elasticidad depende de la magnitud del esfuerzo al que está sometido.

La relación de Poisson es una propiedad elástica importante a considerar en el diseño, donde los cambios dimensionales que resultan de las fuerzas aplicadas necesitan ser tomados en cuenta. El módulo de Poisson representa la relación entre la deformación unitaria transversal y la deformación unitaria longitudinal o axial como se definió a mayor profundidad en la sección anterior.

Cabe mencionar que estas dos propiedades dependen de un gran número de factores. Entre ellos se pueden señalar: los componentes de la lechada, las condiciones a las cuales se realicen los ensayos y los métodos de prueba, por lo que se debe tener cuidado en su determinación y uso.

2.7.1.2.Límites Mecánicos

Resistencia a la Compresión

Es la capacidad que tiene el material para soportar fuerzas que intentan acortarlo. En otras palabras, es la resultante de las presiones que existen dentro de un sólido deformable, caracterizada porque tiende a una reducción de volumen o un acortamiento en determinada dirección, manteniendo una masa constante. Ésta propiedad permite conocer la capacidad del cemento para resistir los esfuerzos ejercidos sobre él en el fondo del pozo. ^[9]

Resistencia a la Tensión

Es la capacidad que tiene el material para soportar fuerzas que intentan alargarlo. Por definición, la tensión es igual al cociente entre la fuerza de tensión uniaxial aplicada y la sección transversal original del material. Por tanto, la resistencia a la tensión es una fuerza de oposición que realiza el material para evitar su deformación. Este es un parámetro útil para la determinación o medición de la resistencia que tiene o que va a soportar el cemento durante las diferentes etapas de la vida productiva de un pozo. ^[9]

Resistencia al Impacto

Es la energía absorbida por un material en una unidad de área, en un ensayo a muy alta velocidad de deformación, impacto. La capacidad de absorber energía no solo depende del tipo y estructura del material, sino también de su forma, tamaño, espesor, entre otros. Se espera que los materiales con altos valores de resistencia, elasticidad y ductilidad, posean valores altos de energía absorbida en el impacto. Existen ocasiones donde son inferiores a los esperados, esto como consecuencia del efecto de la concentración de esfuerzos. Este parámetro es importante para determinar la calidad de la lechada del cemento, ya que se puede analizar el fenómeno de agrietamiento en

los cementos y cuánto estos se pueden propagar por las cargas existentes dentro del pozo. ^[9]

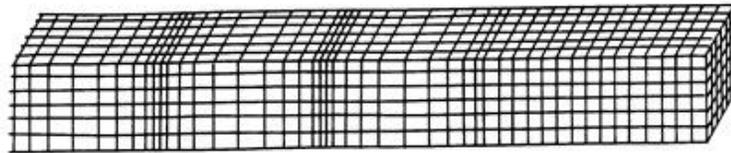
2.7.2. Propiedades Mecánicas Dinámicas del Cemento

Las propiedades mecánicas dinámicas están relacionadas con las ondas elásticas. Se denominan ondas elásticas a las perturbaciones temporales del campo de esfuerzos que producen movimientos en un medio elástico, a diferencia de aquellas que no necesitan de un medio para propagarse.

Entre las ondas elásticas se pueden distinguir dos tipos importantes:

- Las ondas P, también llamadas ondas primarias, compresivas o longitudinales son aquellas que se generan por un movimiento paralelo a la dirección de propagación como se aprecia en la Figura 2.12.
- Las ondas S, conocidas también como ondas secundarias, de corte o cizalla, son aquellas que se generan por un movimiento perpendicular a la dirección de propagación como se aprecia en la Figura 2.12.

Onda de Propagación P:



Onda de Propagación S:

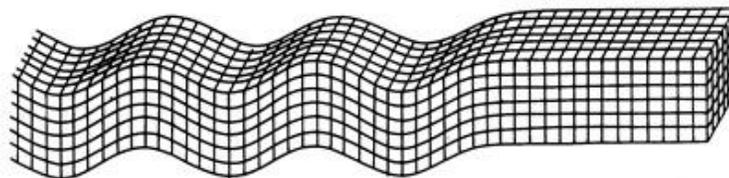


Figura 2.12. Propagación de las ondas P y S ^[10].

Las ondas elásticas se propagan en medios elásticos, por tanto, las velocidades asociadas estarán relacionadas con las constantes elásticas del material. La velocidad de propagación de las ondas en cualquier material viene dada por la ecuación:

$$V = \sqrt{\frac{\text{Módulo Elástico del Material}}{\text{Densidad del Material}}} \quad (2.15)$$

Las velocidades de propagación pueden expresarse en función de dos de las constantes elásticas. Así pues la velocidad de propagación de la onda P, viene dada por la ecuación:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.16)$$

donde,

V_p : Velocidad de propagación de la onda P [m/s]

λ : Primer coeficiente de Lamé [Pa]

μ : Segundo coeficiente de Lamé [Pa]

ρ : Densidad del material [Kg/m³]

La velocidad de propagación de la onda S, será:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.17)$$

donde,

V_s : Velocidad de propagación de la onda S [m/s]

μ : Segundo coeficiente de Lamé [Pa]

ρ : Densidad del material [Kg/m³]

Como las velocidades de propagación de onda están relacionadas con las características mecánicas del material, su resistencia y su deformabilidad, es posible

conocer los módulos de elásticos dinámicos como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$\nu_d = \frac{1 \left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2 \left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1} \quad (2.18)$$

donde,

ν_d : Relación de Poisson dinámico [adim]

V_P : Velocidad de propagación de la onda P [m/s]

V_S : Velocidad de propagación de la onda S [m/s]

$$E_d = 2 \rho (1 + \nu_d) V_S^2 \quad (2.19)$$

donde,

E_d : Módulo de Young dinámico [Pa]

ρ : Densidad del material [Kg/m³]

ν_d : Relación de Poisson dinámico [adim]

V_S : Velocidad de propagación de la onda S [m/s]

Con las ecuaciones de la Tabla 2.1 se pueden calcular el resto de las constantes elásticas dinámicas.

2.8. Ensayo de Materiales

Se denomina ensayo de materiales a toda prueba que permite determinar las propiedades mecánicas y químicas de un material. Asimismo, permite verificar si cumplen o no con los requerimientos establecidos en las normas y decidir si los mismos puede ser utilizados.

Los ensayos de materiales pueden ser de dos tipos: destructivos y no destructivos.

2.8.1. Ensayos Destructivos

Son ensayos que se plantean para obtener el valor de los parámetros que permiten caracterizar propiedades de naturaleza mecánica a expensas de destruir o alterar los especímenes utilizados en los ensayos.

Los ensayos de caracterización de materiales destructivos generalmente son utilizados para calificar el material sobre la base de estándares predefinidos por diseño o de especificaciones particulares de calidad. Los resultados se obtienen ensayando el mínimo número de muestras para cumplir con los requisitos estadísticos y permiten obtener unos valores medios de esas propiedades. Así pues, se infiere que los resultados de la muestra son los mismos que para el resto del lote que se esté ensayando.

Entre los ensayos destructivos típicos se tienen: el ensayo a tracción, torsión y compresión, siendo este último uno de los ensayos que se utilizará para la evaluación de los esfuerzos y deformaciones de los sistemas cementantes.

2.8.2. Ensayos No Destructivos

Son ensayos que se le realizan a los materiales sin alterar de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Así pues, los ensayos no destructivos permiten poner de manifiesto cualidades de los materiales sin necesidad de destruir los especímenes o componentes sobre los que se ensaya.

Los ensayos de caracterización de materiales no destructivos implican un daño imperceptible o nulo. Se basan en la aplicación de ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad y cualquier tipo de ensayo que no implique daño a los especímenes ensayados.

Entre los ensayos no destructivos típicos se tienen: el ensayo con corrientes inducidas, el de campo magnético y los acústicos, siendo este último uno de los ensayos que se utilizará para la evaluación de las velocidades de propagación de ondas de los sistemas cementantes.

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO

En este capítulo se presenta una descripción geográfica y geológica del área en estudio. Así pues, el área en estudio se localiza al noreste del estado Monagas, dentro de la Cuenca Oriental de Venezuela, en la subcuenca de Maturín, específicamente en el campo Travi. Asimismo, se presenta el diagrama mecánico recomendado para la perforación de los pozos.

3.1. Ubicación del Área en Estudio

3.1.1. Cuenca Oriental de Venezuela

La Cuenca Oriental es considerada como la segunda cuenca petrolífera más importante de Venezuela. Está situada en la zona centro-este del país formando una depresión topográfica y estructural, limitada al sur por el río Orinoco, desde la desembocadura del río Arauca hasta el este de Boca Grande; al oeste por el levantamiento de El Baúl, que sigue aproximadamente el curso de los ríos Portuguesa y Pao; al norte por el cinturón móvil de las Serranías del Interior, Central y Oriental; hacia el este la Cuenca continúa por debajo del Golfo de Paria, incluyendo la parte situada al sur de la Cordillera Septentrional de la Isla de Trinidad y se hunde en la plataforma continental del Atlántico, al este de la costa del Delta del Orinoco, siendo ésta una nueva área para la explotación de hidrocarburos.

En su totalidad tiene una longitud aproximada de 800 Km. en sentido oeste-este, un ancho promedio de 200 Km. de norte a sur y un área aproximada de 160.000 Km² que comprende los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas, Delta Amacuro y una extensión menor del estado Sucre, además de prolongarse por el Golfo de Paria hasta Trinidad. ^[11]

En la Cuenca Oriental se pueden distinguir principalmente ocho áreas productoras de hidrocarburos: Guárico, Quiriquire, Pedernales, Mayor de Anaco, Mayor de Oficina, Jusepín, Temblador y la Faja Petrolífera del Orinoco. Basándose en sus características sedimentológicas, tectónicas y estratigráficas se subdivide en dos subcuencas: una occidental (Subcuenca de Guárico) y otra oriental (Subcuenca de Maturín) como se aprecia en la Figura 3.1.

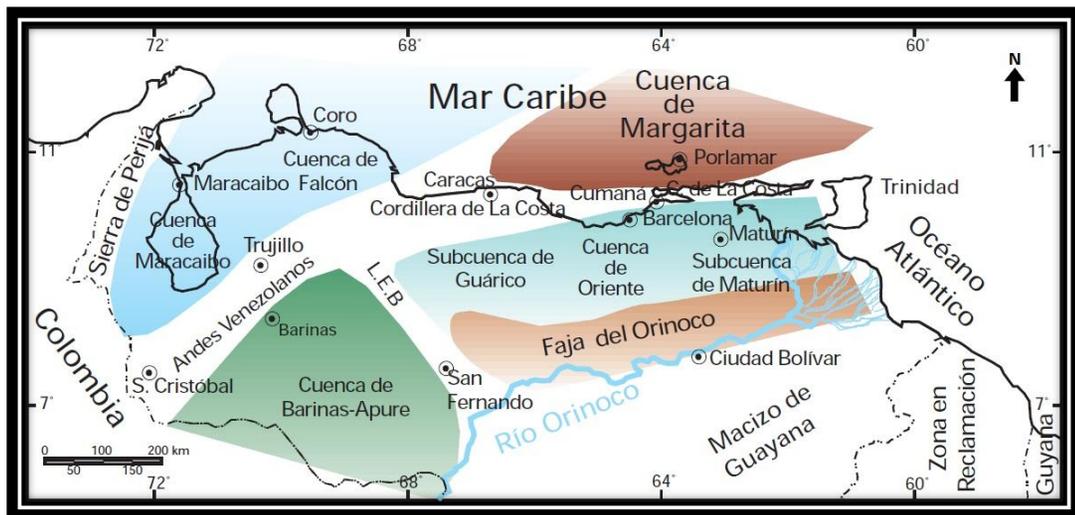


Figura 3.1. Cuenca Oriental de Venezuela ^[12].

El flanco norte de la Cuenca Oriental de Venezuela presenta plegamientos y fallamientos característicos de zonas compresivas. Estos son productos de esfuerzos en dirección norte-sur que actuaron durante el Terciario Inferior.

La cuenca está caracterizada por la presencia de corrimientos que buzanan al norte, como lo son: los corrimientos de Anaco y Piritál, el Furríal y las fallas de Onado, Guanaco y San Juan, fallas trascurrentes que desplazan a las primeras y están representadas por las fallas de Urica, San Francisco, Bohordal y los Bajos.

3.1.2. Subcuenca de Maturín

Ubicada al este de la Cuenca Oriental de Venezuela, la subcuenca de Maturín constituye la principal unidad petrolífera de la cuenca. La deformación estructural y

los acñamientos de las unidades estratigráficas hacia el sur definen dos dominios operacionales: uno al norte del Corrimiento de Pirital y otro al sur.

Es una cuenca asimétrica alargada paralela a la Serranía del Interior, que posee un flanco sur pasivo apoyado en el escudo de Guayana y un flanco norte activo. Además, la región ha recibido sedimentos casi de forma ininterrumpida desde el Cretácico Inferior al Reciente.

La subcuenca se formó a partir del Eoceno, encima de una cuenca de margen pasivo, en ella se presentan cambios de facies y discordancias. La cuenca es de carácter marino dominante con algunas turbiditas en el flanco norte, depósitos sedimentarios sintectónicos y continentales. ^[12]

La transcolisión de la placa Caribe con la Suramericana produjo tres familias de fallas principales en la Cuenca Oriental de Venezuela: ^[13]

- Fallas transcurrentes dextrales de rumbo este-oeste conocida como falla de El Pilar
- Fallas transcurrentes dextrales de rumbo N60°O-N80°O, como son las fallas principales de Urica y de San Francisco
- Corrimientos de rumbo N60°E-N90°E, como son los corrimientos de Furrial o de Pirital.

El rasgo estructural característico de esta provincia es el corrimiento de Pirital, el cual corre paralelo a la Serranía del Interior. En esta provincia de transición se observa también un alineamiento de volcanes y Diapiros de Barro, paralelos a los anticlinales presentes. ^[14]

3.1.3. Campo Travi Norte

Geográficamente, el campo Travi Norte se encuentra al noroeste del estado Monagas, aproximadamente a 6 Km. al noreste de la población de Punta de Mata, como se observa en la Figura 3.2.

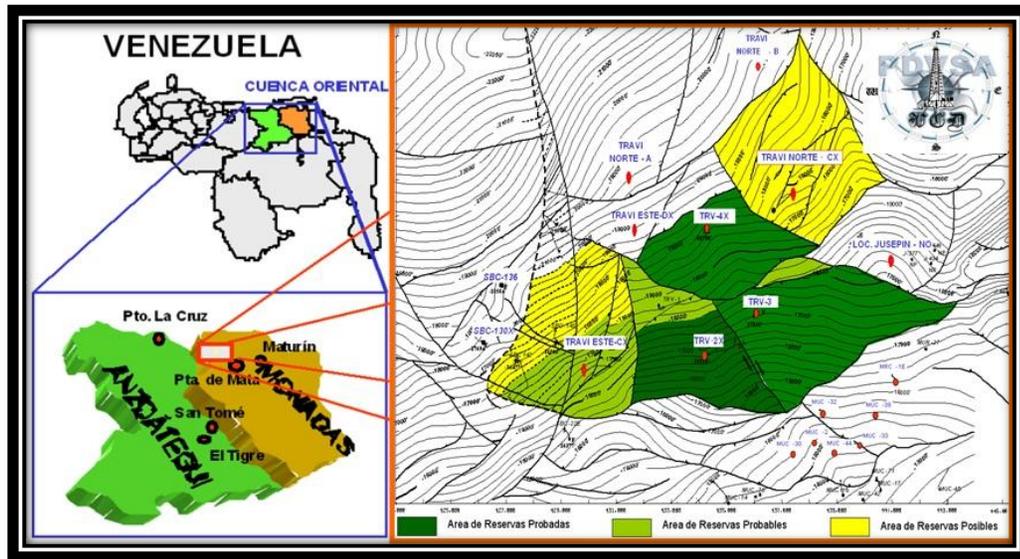


Figura 3.2. Ubicación geográfica del Campo Travi Norte [15].

Estructuralmente, la trampa formada por el sistema de fallas compresivas de El Carito-Travi, pertenecientes al flanco norte del alineamiento estructural El Furrial, se ubica en la Cuenca Oriental de Venezuela, subcuenca de Maturín.

Es una zona compleja, localizada entre grandes rasgos tectónicos: el Corrimiento de Pirital al sur; el Corrimiento de Mundo Nuevo al norte; el sistema de fallas de Urica al oeste, y la falla de San Francisco al este, como se aprecia en la Figura 3.3.



Figura 3.3. Sistema de Fallas alrededor de la Localización Travi Norte [15].

3.2.Marco Geológico y Estratigráfico

La sedimentación del área está afectada por una tectónica de margen pasivo entre el Jurásico y el Oligoceno, y de margen activo durante el Mioceno. La columna estratigráfica está conformada por sedimentos que van desde el Cretácico hasta el reciente. ^[16]

Los principales yacimientos del área se encuentran dentro de la formación Naricual; y en menor proporción en las formaciones San Juan, Los Jabillos y Caratas.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las unidades estratigráficas que han sido atravesadas durante la perforación en el área. ^[16]

- **Formación Mesa** (Pleistoceno): Está conformada principalmente por arenas de grano grueso, gravas ferruginosas y conglomerados compactos, asociados con cuerpos de arcillas solubles de colores gris, rojo y crema. Hacia la base las arcillas se alternan con capas de areniscas de grano grueso y carbón.
- **Formación Las Piedras** (Mioceno tardío-Plioceno): Está constituida por arcillas muy pastosas, solubles y de colores variados, intercaladas con limonitas arenosas y glauconíticas. También se observan capas de carbón con inclusiones de pirita y hacia la base abundantes fósiles.
- **Formación Morichito** (Mioceno tardío - Plioceno): Compuesta por conglomerados constituidos por peñones, peñas y gravas intercaladas con arenas y limolitas, en una matriz arcillosa de color pardo, ocasionalmente carbonosa a lignítica.
- **Formación Carapita** (Oligoceno tardío - Mioceno medio): Constituida principalmente por una espesa secuencia de lutita laminar gris oscuro a negro, en ocasiones gris verdoso, con superficies cóncavas micropiríticas, fosilíferas, microcarbonáceas.
- **Formación Naricual** (Oligoceno): Caracterizada por una alternancia de areniscas y lutitas que muestran apilamiento de secuencias agradacionales; las areniscas típicamente masivas son de color claro, cuarzosas, friables a curacíticas y de grano

medio a grueso. Las lutitas y limonitas son de color gris a negro, blandas, físisiles o pizarrosas, arenáceas, micáceas, carbonáceas.

- **Formación Areo** (Oligoceno): Compuesta por lutitas grises con capas delgadas de concreciones, glauconíticas de ferrolita amarillenta a rojiza, asociadas con moluscos. Además, capas ocasionales de areniscas cuarcíticas duras, gris claro a blanco. Se encuentran también algunas calizas duras y delgadas.
- **Formación Los Jabillos** (Oligoceno): Está constituida por areniscas gruesas y macizas, comúnmente claras y gris rosado, de grano medio a grueso, muy duras y cuarcíticas, intercaladas con capas delgadas de lutitas y algunas capas de carbón.
- **Formación Caratas** (Eoceno temprano a tardío): Está compuesta por dos secuencias litológicas fácilmente diferenciables: la inferior, pelítica arenosa que es la formación Caratas, y la superior carbonática, bioclástica llamada miembro Tinajitas.
- **Formación Vidoño** (Campanéense- Eoceno temprano): Está constituida por lutitas oscuras, ricas en foraminíferos, con capas menores de areniscas y limolitas calcáreas duras con glauconita. La sección tipo consiste de una secuencia de lutitas negras, silíceas, y calcáreo-arenáceas, frecuentemente glauconíticas y piritosas, con intercalaciones menores de limolitas calcáreas, gris verdoso y areniscas de grano fino, gris oscuro, de espesores centimétricos.
- **Formación San Juan** (Maastrichtiense tardío): Consta de una alternancia monótona de capas de areniscas muy duras, gris a gris claro de grano fino, bien escogidas, escasamente glauconíticas y localmente calcáreas. Estas capas de areniscas se intercalan con capas centimétricas de lutitas negras, arenáceas, localmente calcáreas y limolitas negras.

3.3. Diagrama Mecánico Recomendado para el Pozo

En la Figura 3.4 se aprecia el diagrama mecánico recomendado para la perforación exploratoria de la Localización Travi Norte. Se han establecido cinco fases de construcción: ^[15]

- Hoyo conductor de 24’’ para un intervalo de 0’ a 2000’ y revestidor de 20’’.
Objetivo: Proteger los mantos de agua superficiales, cubrir las arenas conglomeradas poco consolidadas de la formación Mesa – Las Piedras y las intercalaciones de arena y lutita en la formación Morichito
- Hoyo superficial de 16’’ para un intervalo de 2000’ a 11879’ y revestidor de 13 $\frac{3}{8}$ ’’.
Objetivo: Atravesar la estructura geológica del Mioceno y el tope de la formación Naricual Alóctono.
- Hoyo intermedio I de 12 $\frac{1}{4}$ ’’ para un intervalo de 11879’ a 16219’ y revestidor de 9 $\frac{5}{8}$ ’’.
Objetivo: Atravesar las formaciones abrasivas del bloque Alóctono: Naricual, Areo, Los Jabillos y Caratas – Vidoño, hasta el tope de Carapita.
- Hoyo intermedio II de 8 $\frac{1}{2}$ ’’ para un intervalo de 16219’ a 19308’ y liner de 7 $\frac{5}{8}$ ’’.
Objetivo: Atravesar el tope de la formación objetivo Naricual Superior y las formaciones Carapita y Carapita E.
- Hoyo productor de 6 $\frac{1}{2}$ ’’ para un intervalo de 19308’ a 21086’ y liner de 5 $\frac{1}{2}$ ’’.
Objetivo: Atravesar la formación San Juan y las arenas prospectivas de hidrocarburos Naricual y Caratas – Vidoño.

De ser necesario se debe perforar un hoyo de contingencia de 16’’ para un intervalo de 2000’ a 7054’ y revestidor de 13 $\frac{3}{8}$ ’’, esta fase surge por la necesidad de aislar la formación Carapita Alóctono no presurizada y proporcionar la suficiente integridad mecánica al pozo para poder perforar la fase subsiguiente a través de la zona presurizada de dicha formación con un fluido de mayor densidad, puesto que se estima encontrar arenas con gas.

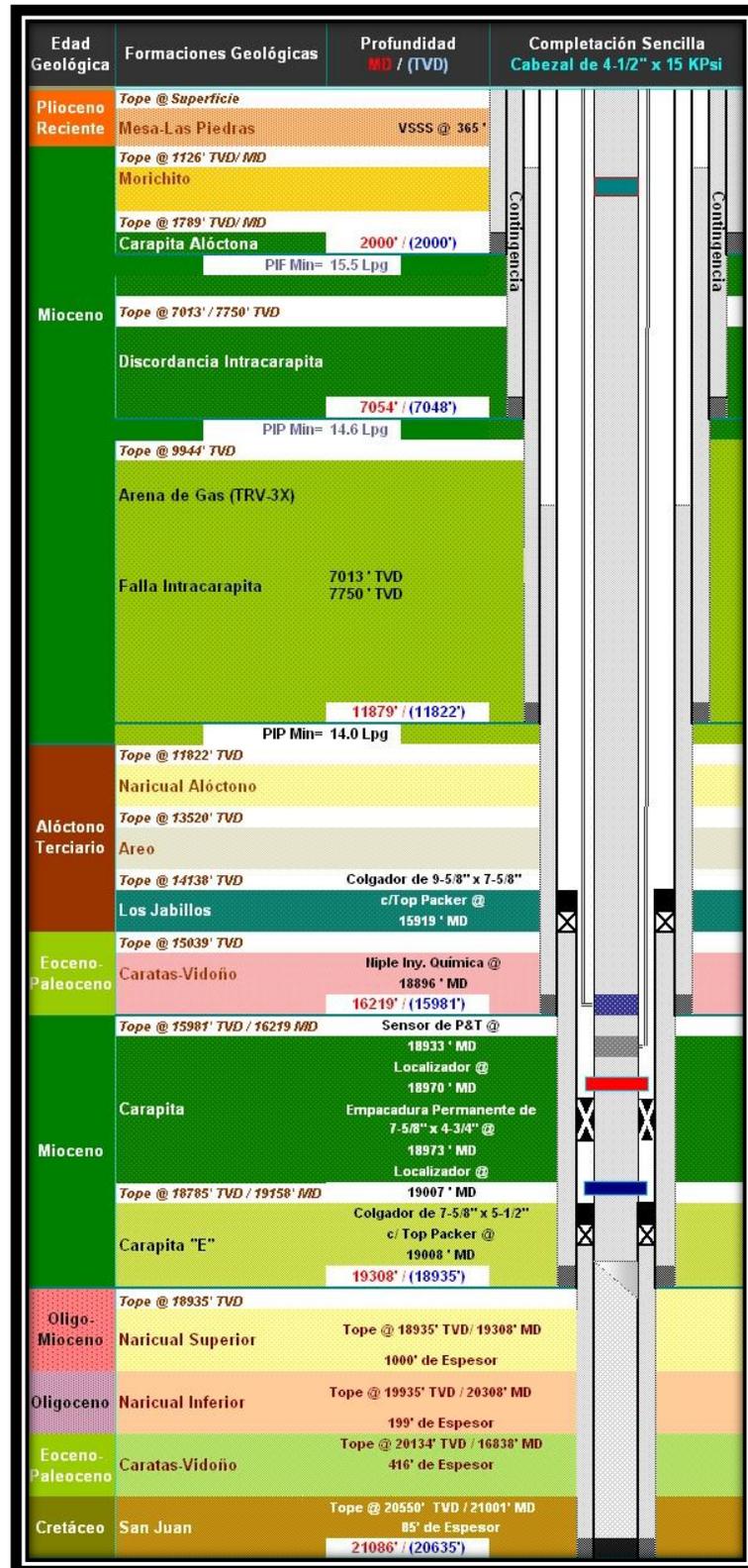


Figura 3.4. Diagrama mecánico recomendado para perforaciones en el Campo Travi ^[16].

3.4. Difracción de Rayos X para el Pozo

En la Figura 3.5 se aprecia el análisis de difracción de rayos X elaborado a muestras seleccionadas dentro del intervalo 6010'' a 6400'' durante la perforación del Pozo TRV-6X, correspondiente a la Formación Carapita. En dicho análisis se identificaron los siguientes minerales: arcillas, cuarzo, calcita, siderita, pirita, plagioclasa, dolomita y feldespato potásico. Se corrobora el carácter lutítico laminar de la Formación Carapita.^[15]

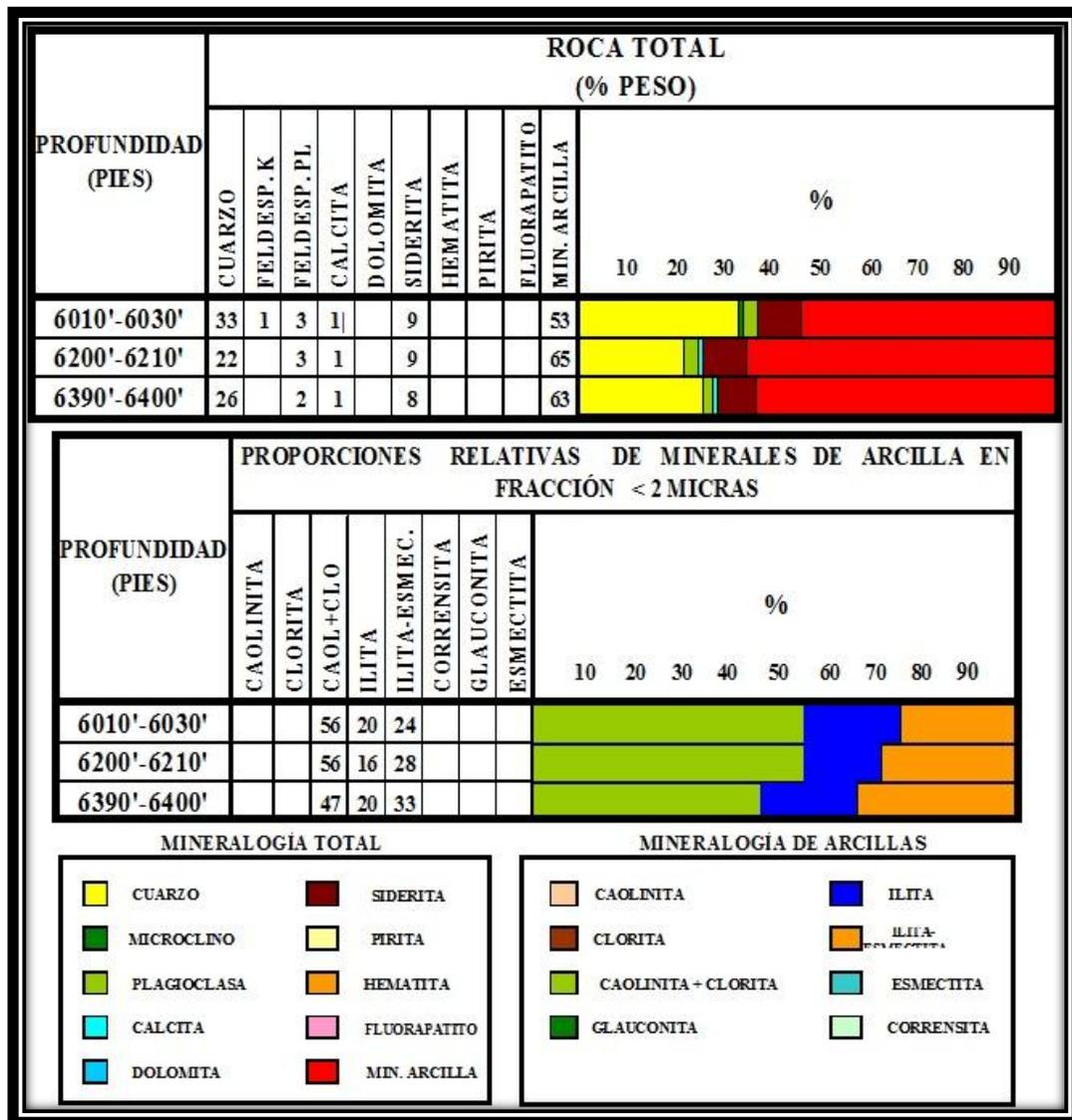


Figura 3.5. Difracción de Rayos X para el Pozo TRV-6X ^[16].

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta la metodología que permitió desarrollar el presente Trabajo Especial de Grado. Se describen los aspectos relacionados con el tipo y diseño de la investigación, la población y muestra a tomar en cuenta, las técnicas e instrumentos para la recolección de datos y los procedimientos utilizados para llevar a cabo dicha investigación.

4.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un objeto o fenómeno. En el caso del presente trabajo se tiene que el tipo de investigación es descriptiva, ya que consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento.^[17]

En esta investigación se propone caracterizar diferentes sistemas cementantes mediante sus propiedades elásticas mecánicas y acústicas, tanto a condiciones de laboratorio como a condiciones de pozo.

4.2. Diseño de la Investigación

El diseño de investigación se refiere a la estrategia que adopta el investigador para responder al problema planteado. Asimismo, determina el esquema que se tomará en cuenta para llevar a cabo el proceso de recolección de datos que permitirá la validación de los mismos. El diseño para esta investigación es experimental, ya que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos a determinadas condiciones o estímulos para observar los efectos que se producen.^[17]

En esta investigación se varió el tipo de cemento, la temperatura y la presión para determinar las propiedades mecánicas en los sistemas cementantes.

4.3.Población y Muestra

Toda investigación requiere de la identificación de la población objeto de estudio y la selección del tamaño de la muestra que va a ser analizada. Así pues, una población o universo, se refiere a cualquier conjunto de elementos de los cuales se pretende indagar y conocer sus características, o una de ellas, y para la cual serán válidas las conclusiones obtenidas en la investigación. Mientras que, la muestra es una proporción representativa de la población que selecciona el investigador, con la finalidad de obtener las características más exactas, confiables y representativas de la misma. ^[18]

En esta investigación se tiene que la población a tomar en cuenta son todos los sistemas cementantes en general, mientras que la muestra está conformada por lechadas cuyas formulaciones específicas con cemento G, H y ciertos aditivos se mencionan más adelante.

4.4.Operacionalización de Variables

La operacionalización de variables se define como el método utilizado de medición exacta, que permite a otros científicos seguir la misma metodología, evitando la ambigüedad en la definición de las variables y el error al momento de fijar criterios de mediciones.

La conceptualización de las variables en la presente investigación, fue producto de los objetivos específicos, lo cual reflejó una definición operacional que dio origen a las dimensiones que encerró la investigación y de donde, en definitiva se desprendieron los indicadores, los cuales fueron de gran utilidad para la construcción de los instrumentos necesarios para la recolección de los datos. En la Tabla 4.1 se muestra la operacionalización de variables para la presente investigación.

Tabla 4.1. Operacionalización de Variables

Objetivos Específicos	Variables	Dimensión	Indicadores	Instrumento
Formular diferentes sistemas cementantes.	Clases de cemento, presión y temperatura.	En esta etapa se determina la formulación específica de la lechada, las clases de cemento y las condiciones de presión y temperatura que se emplearán.	<ul style="list-style-type: none"> • Clases de cemento. • Condiciones de presión y temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión bibliográfica. • Observación.
Medir los módulos elásticos estáticos en los sistemas cementantes formulados, mediante pruebas de esfuerzo versus deformación.	Módulos elásticos estáticos.	En esta etapa se evalúa los esfuerzos y deformaciones de los sistemas cementantes formulados.	<ul style="list-style-type: none"> • Norma API Spec. 10A. • Ensayos: Tiempo de espesamiento, resistencia a la compresión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Balanza electrónica. • Mezcladora. • Consistómetro presurizado. • Cámara de curado atmosférica. • Cámara de curado presurizada. • Prensa mecánica.
Medir los módulos elásticos dinámicos de sistemas cementantes formulados mediante la propagación de ondas P y S.	Módulos elásticos dinámicos.	En esta etapa se evalúan las velocidades de propagación de las ondas P y S en los sistemas cementantes formulados.	<ul style="list-style-type: none"> • Norma API Spec. 10A. • Ensayo acústico 	<ul style="list-style-type: none"> • Balanza electrónica. • Mezcladora. • Analizador de propiedades mecánicas.
Establecer comparaciones de las propiedades medidas en los sistemas cementantes formulados.	Módulos elásticos estáticos y dinámicos.	En esta etapa se comparan los resultados de los módulos elásticos a las diferentes condiciones de temperatura y presión	<ul style="list-style-type: none"> • Norma API Spec. 10A. • Ensayos: Tiempo de espesamiento, resistencia a la compresión y acústico 	<ul style="list-style-type: none"> • Gráficas. • Tablas.

4.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La recolección de datos se refiere al uso de técnicas e instrumentos que pueden ser manejadas por el investigador, para recabar la información que servirá de sustento en la investigación. Así pues, las técnicas de recolección de datos son procedimientos realizados con el propósito de conseguir la información necesaria para el logro de los objetivos a través de la operacionalización de las variables. Por otra parte, cabe señalar que los instrumentos son los medios materiales que se emplean para recolectar y almacenar la información.

A continuación se enumeran las técnicas y los diferentes instrumentos que se emplearán para el logro de los objetivos de la presente investigación.

4.5.1. Revisión Bibliográfica

La revisión bibliográfica comprende todas las actividades relacionadas con la búsqueda de información escrita, sobre un tema que respalde la investigación. Esta permitirá identificar el marco de referencia, las definiciones conceptuales y operativas de las variables en estudio e igualmente seleccionar los métodos y procedimientos necesarios para la recolección de datos. En esta investigación se recopilará y revisará todos aquellos libros, artículos técnicos, normas, manuales y trabajos de investigación relacionados con la cementación, los sistemas cementantes, módulos elásticos tanto estáticos como dinámicos que son necesarios para el desarrollo de este trabajo.

4.5.2. Observación Directa

La observación directa es una técnica que consiste en visualizar o captar mediante la vista, en forma sistemática cualquier hecho, fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza, en función de los objetivos de investigación preestablecidos. ^[19] **Sabino** Este método permite observar detalladamente de forma cualitativa y cuantitativa la secuencia de los datos generados en los diferentes ensayos científicos que se llevarán a cabo en esta investigación, con la finalidad de evaluar los efectos de las variables y cumplir con los objetivos planteados.

4.5.3. Gráficas

Se denomina gráfica o gráfico a la representación de datos, generalmente numéricos que mediante líneas, vectores, superficies, colores o símbolos, muestran visualmente la relación que guardan entre sí. En esta investigación los datos recolectados se plasmarán en gráficas con coordenadas cartesianas que permitirán mostrar relaciones entre ellas, para establecer comparaciones, analizar el comportamiento de los diferentes ensayos experimentales y realizar su posterior interpretación.

4.5.4. Tablas

Las tablas permiten acomodar una gran cantidad de datos en un espacio reducido, lo que facilita su visualización. Muestra los valores numéricos exactos y los datos se presentan de una forma ordenada por medio de columnas y filas. En la presente investigación, los datos generados por los diferentes ensayos de laboratorio, serán las tablas que permitirán registrar las distintas propiedades elásticas de los sistemas cementantes seleccionados.

4.5.5. Ensayos de Laboratorio

Los ensayos de laboratorio son pruebas realizadas sobre muestras previamente obtenidas, que permiten determinar las características y propiedades de los materiales en estudio. En esta investigación se llevarán a cabo cuatro ensayos los cuales se realizarán en el laboratorio de cementación:

- Ensayo de fluido libre.
- Ensayo de resistencia a la compresión.
- Ensayo de tiempo de espesamiento.
- Ensayo acústico.

4.5.6. Instrumentos para la Recolección de Información

Los instrumentos para la recolección de información son dispositivos que permiten al investigador observar y/o medir las variables en estudio. A continuación se describen una serie de instrumentos y equipos que se utilizarán para alcanzar los objetivos de la investigación.

4.5.6.1. Balanza Electrónica

Es un instrumento utilizado para pesar los aditivos que componen las formulaciones de los sistemas cementantes a evaluar, de acuerdo con la Norma API Spec. 10A. En la Figura 4.1 se observa una balanza electrónica marca Mettler, modelo PM 4000.

Esta balanza, tiene una capacidad máxima de 4100 g. incluido el peso muerto de los recipientes utilizados para realizar la medición con una precisión de 0,01 g.



Figura 4.1. Balanza Electrónica Marca Mettler Modelo PM 4000.

4.5.6.2. Mezcladora

Es un instrumento utilizado para mezclar la lechada de cemento de acuerdo con la Norma API Spec. 10A. En la Figura 4.2 se observa una mezcladora marca Chandler Engineering, modelo 30-60.

Esta mezcladora está diseñada para funcionar a una velocidad constante, de este modo, el mezclado de la lechada se mantiene estable y homogéneo. Este equipo permite trabajar con dos tipos de velocidades de mezclado, las cuales pueden ser: constantes (4000 rpm y 12000 rpm) o ajustables (de 1000 rpm a 18000 rpm). La misma, es de alto rendimiento y está equipada con un motor, un recipiente de mezclado de un cuarto de galón y cuchillas de acero inoxidable resistentes a la corrosión.

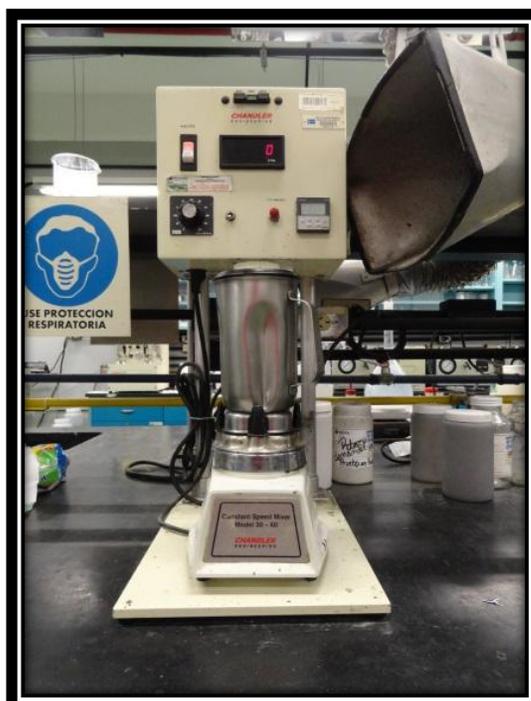


Figura 4.2. Mezcladora Marca Chandler Engineering Modelo 30-60.

4.5.6.3. Consistómetro Atmosférico

Es un equipo utilizado para acondicionar la lechada a presión atmosférica y a la temperatura circulante de pozo, para posteriormente determinar el porcentaje de fluido libre, de acuerdo con la Norma API Spec. 10A. En la Figura 4.3 se observa un consistómetro atmosférico marca Chandler Engineering, modelo 1200.

El consistómetro atmosférico está equipado con dos contenedores de cemento cilíndricos rotatorios que posee un ensamblaje de paleta estacionario, los cuales se introducen en un baño de agua a temperatura controlada. La temperatura máxima con que puede trabajar el equipo es 200 °F. Durante el periodo de mezclado y acondicionamiento el contenedor de la lechada gira a una velocidad constante de 150 ± 15 rpm, sin embargo, el equipo consta de un controlador de velocidad variable el cual permite ajustar la misma. Las paletas y todas las partes del contenedor de la lechada están fabricadas de un material resistente a la corrosión.



Figura 4.3. Consistómetro Atmosférico Marca Chandler Engineering Modelo 1200.

4.5.6.4. Consistómetro Presurizado

Es un equipo utilizado para predecir el tiempo de espesamiento de la lechada, de acuerdo con la Norma API Spec. 10A, bajo condiciones de presión y temperatura del pozo. En la Figura 4.4 se observa un consistómetro presurizado marca Chandler Engineering, modelo 7222.

El consistómetro presurizado está equipado con un contenedor de cemento cilíndrico rotatorio que posee un ensamblaje de paleta estacionario, el cual se introduce en una cámara diseñada para trabajar a una presión de hasta 22000 psi y una temperatura máxima de 400 °F. La presión es incorporada a la cámara por una bomba hidráulica de aire y la temperatura es generada por un calentador tubular interno a una tasa de al menos 5 °F por minuto. Posee una termocupla con la que se controla la temperatura de la lechada. El contenedor gira a una velocidad constante de 150 +/- 15 rpm. La viscosidad de la lechada es reportada en Bc (Unidades Bearden), la cual es obtenida

mediante un potenciómetro instalado dentro del contenedor presurizado. La fuerza de rotación es proporcional a la consistencia de la lechada.



Figura 4.4. Consistómetro Presurizado Marca Chandler Engineering Modelo 7222.

4.5.6.5. Cilindro Graduado

Es un instrumento utilizado para determinar la cantidad de fluido libre en la lechada de cemento, de acuerdo con la Norma API Spec. 10A. En la Figura 4.5 se observa un cilindro graduado de 250 mL marca Halliburton.



Figura 4.5. Cilindro Graduado 250 mL. Marca Halliburton.

4.5.6.6. Cámara de Curado Atmosférica

Es un equipo utilizado para acondicionar muestras de cemento a una temperatura específica y presión atmosférica, de acuerdo con la Norma API Spec. 10A. En la Figura 4.6 se observa una cámara de curado atmosférica marca Thermo Electron Corporation, modelo WB1110A-1.

La cámara de curado atmosférica está equipada con bomba interna que permite la circulación del agua para mantener uniforme la temperatura del baño. Las muestras se pueden acondicionar en un rango de temperatura desde 5 °C (40 °F) más que la temperatura ambiente hasta 100 °C (215 °F). La cámara posee esquinas redondeadas para una mejor circulación del agua y está fabricada en acero resistente a la corrosión.



Figura 4.6. Cámara de Curado Atmosférica Marca Thermo Electron Modelo WB1110A-1.

4.5.6.7. Cámara de Curado Presurizada

Es un equipo utilizado para acondicionar muestras de cemento a temperatura y presión de pozo, de acuerdo con la Norma API Spec. 10A. En la Figura 4.7 se observa una cámara de curado HPHT marca OFI Testing Equipment, modelo 200.

Este equipo tiene dos cámaras independientes dentro de las cuales se colocan los moldes con la lechada preparada. La presión máxima de operación dentro de la cámara es de 5000 psi y aumenta gracias a la acción de una bomba hidráulica

accionada por aire. La temperatura máxima de operación es 600 °F y es regulada por un controlador de temperatura que acciona el calentador. Posee un sistema de enfriamiento el cual permite disminuir la temperatura una vez finalizada la prueba.



Figura 4.7. Cámara de Curado HPHT Marca OTI Modelo 200.

4.5.6.8.Prensa Mecánica

Es un equipo utilizado para determinar las propiedades mecánicas como resistencia a la compresión, tensión y flexión de muestras de cemento a presión atmosférica, de acuerdo con la Norma API Spec. 10A. En la Figura 4.8 se observa una prensa mecánica marca Shimadzu, modelo UH-20A.

La prensa mecánica tiene un sistema de carga hidráulico. Una vez aplicada la carga a la muestra, ésta produce una variación de presión en el cilindro con aceite. Con el uso de una celda de presión de alta precisión y un amplificador de alto desempeño, ésta variación de presión se transforma en una señal de voltaje. Posteriormente, se convierte en una señal digital y la misma es mostrada en la pantalla en unidades de

toneladas-fuerzas. El equipo trabaja con una velocidad de viaje para la carga de 1mm/min y una velocidad de carga de 2,8 kgf/mm²/s.



Figura 4.8. Prensa Mecánica Marca Shimadzu Modelo UH-20A.

4.5.6.9. Analizador de Propiedades Mecánicas

Es un equipo que permite medir de forma constante las propiedades mecánicas elásticas como la relación de Poisson, el módulo de Young, el módulo de Bulk y la resistencia a la compresión de una lechada de cemento a condiciones de alta presión y temperatura, de acuerdo con la Norma API Spec. 10A. En la Figura 4.9 se observa un analizador de propiedades mecánicas marca Chandler Engineering, modelo 6265 MPRO.

El analizador de propiedades mecánicas incluye un contenedor de curado para la lechada de cemento, lo que permite preservar las condiciones de presión y temperatura del ensayo, evitando separar los procedimientos de curado y medición de las propiedades. El equipo registra las velocidades longitudinales y de cizallamiento a través de la muestra de cemento. El *software* asociado produce en tiempo real las

gráficas de las diferentes propiedades mecánicas. La presión máxima de operación es de 7500 psi y aumenta gracias a la acción de una bomba hidráulica accionada por aire y nitrógeno. La temperatura máxima de operación es 400 °F y es regulada por un controlador que permite mantenerla constante.



Figura 4.9. Analizador de Propiedades Mecánicas Marca Chandler Engineering Modelo 6265 MPRO.

4.6. Metodología del Proyecto de Investigación

En la Figura 4.10 se observa una representación esquemática de las fases que se llevarán a cabo para la ejecución del presente trabajo de investigación.

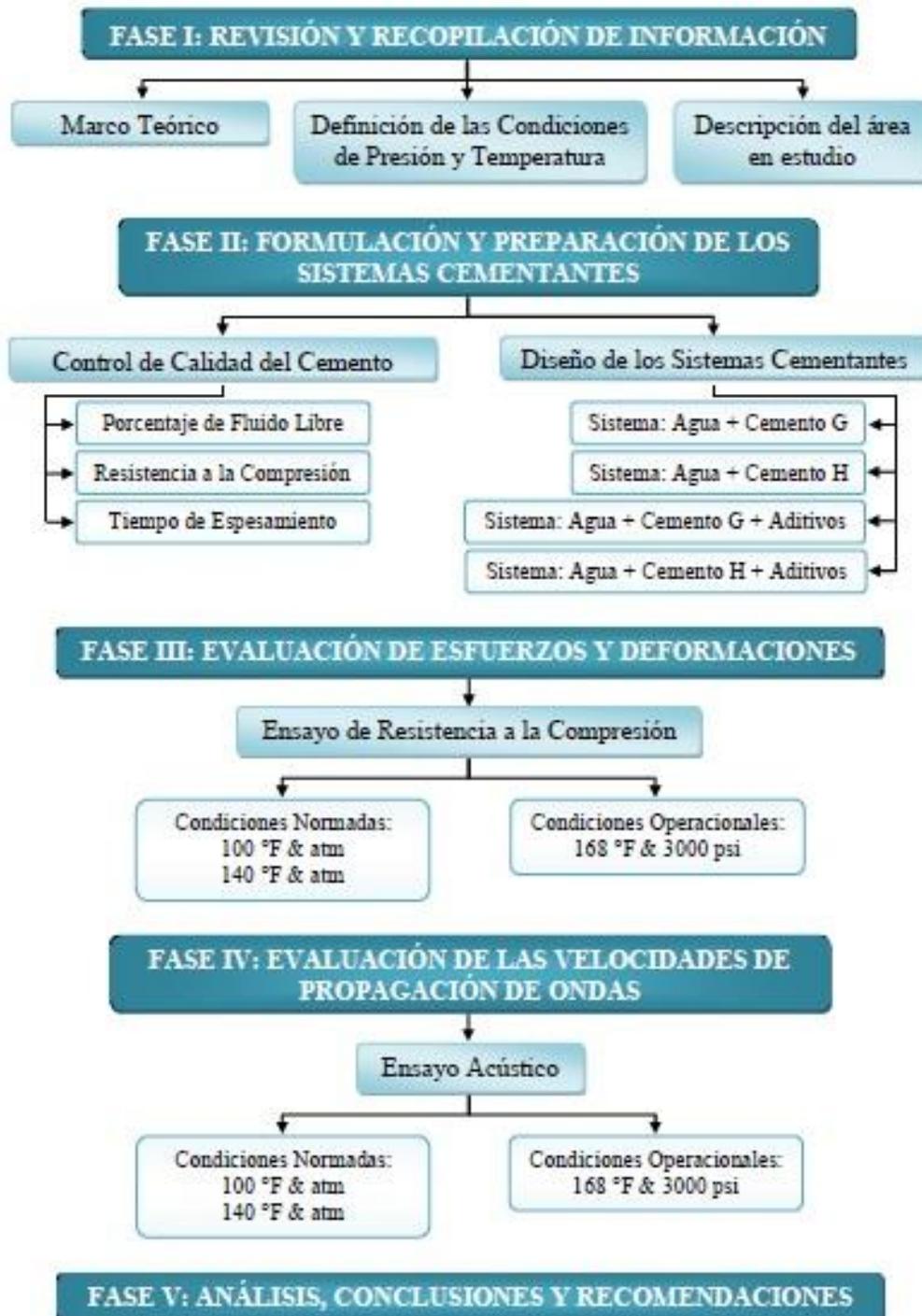


Figura 4.10. Esquema Metodológico.

4.6.1. Fase I: Revisión y Recopilación de Información

Se realiza una revisión bibliográfica referente a los fundamentos teóricos importantes para el desarrollo de la investigación como es la cementación de pozos y las propiedades elásticas de los materiales. De igual forma, se recopila información relacionada con el área en estudio como su ubicación, características geológicas, procesos de cementación, entre otras para determinar las condiciones operacionales de presión y temperatura. Asimismo, se revisan las normas necesarias para la preparación y evaluación de los sistemas cementantes.

4.6.2. Fase II: Formulación y Preparación de los Sistemas Cementantes

En esta fase se desarrolla el objetivo 1 de esta investigación. En primer lugar se realiza el control de calidad de los lotes de cemento G y H que se van a utilizar en los diferentes ensayos, para verificar si los mismos cumplen con los requerimientos necesarios establecidos en la Norma API Spec. 10A.

Los ensayos para el control de calidad son: porcentaje de fluido libre, resistencia a la compresión y tiempo de espesamiento. A continuación se detallan los requerimientos de aceptación y los procedimientos de cada uno de los ensayos.

4.6.2.1. Preparación de la Lechada

Cada una de las lechadas que se van a utilizar en los ensayos de control de calidad tienen unos requerimientos específicos, tal como se muestra en la Tabla 4.2. Los cementos que se van a emplear en esta investigación son: Cemento Clase G y H. En el laboratorio de cementación se encuentran disponibles el lote 139 para cemento clase G y el lote 174 para el cemento clase H, cada uno de ellos con características diferentes.

Tabla 4.2. Requerimientos para la preparación de la lechada

Componentes	Cemento Clase G Masa [g]	Cemento Clase H Masa [g]
Agua para la mezcla	349 ± 0,5	327 ± 0,5
Cemento	792 ± 0,5	860 ± 0,5

A continuación se describe el procedimiento para la preparación de la lechada según lo establecido en la Norma API Spec. 10A:

- Se pesa la muestra de cemento y el agua destilada como se especifica en la Tabla 3.2.
- Se vierte el agua destilada requerida en el contenedor de la mezcladora.
- Se coloca el contenedor en la base del motor, se prende y se mantiene encendido a 4000 ± 200 rpm.
- Se agrega uniformemente la cantidad de la muestra de cemento en un lapso no mayor a 15 s.
- Se coloca la tapa a la mezcladora y se aumenta la velocidad a 12000 ± 500 rpm. por un tiempo de 35 ± 1 s.
- Se apaga el motor de la mezcladora, la cual contiene la lechada a ser utilizada en los diferentes ensayos.

4.6.2.2. Ensayo de Fluido Libre

El fluido libre es la fase acuosa que se separa de una lechada de cemento cuando se deja estática. En operaciones de cementación, el fluido libre es indeseable, ya que existe una tendencia a la formación de canales a través del cemento fraguado, lo que proporciona trayectos potenciales para la migración. Así pues, los lotes de cementos G y H deben cumplir con los requerimientos de porcentaje de fluido libre, como se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Requerimientos de aceptación para el porcentaje de fluido libre.

Cemento	Fluido Libre [%]
Clase G & H	$\leq 5,9$

A continuación se describe el procedimiento para el porcentaje de fluido libre según lo establecido en la Norma API Spec. 10A:

- Se prepara la lechada de cemento de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente.

-
- Se vierte la lechada en el contenedor limpio y seco del consistómetro al nivel apropiado.
 - Se coloca el contenedor de la lechada en el consistómetro atmosférico y se enciende el motor. El intervalo entre la preparación de la lechada y el encendido del consistómetro no debe exceder 1 min.
 - Se mezcla la lechada en el consistómetro por un período de $20 \text{ min} \pm 30 \text{ s}$. La temperatura de curado durante el tiempo de mezclado debe ser $80 \pm 3 \text{ }^\circ\text{F}$.
 - Se transfiere $760 \pm 5 \text{ g}$ de lechada Clase G ó $790 \pm 5 \text{ g}$ de lechada Clase H a un matraz de 500 mL. en un lapso no mayor a un 1 min.
 - Se registra la masa real transferida.
 - Se sella el matraz con papel parafinado para prevenir la evaporación.
 - Se coloca el matraz con la lechada sobre una superficie que esté nivelada y libre de vibración por un tiempo $2 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$. La temperatura del aire a la que está expuesta el matraz lleno debe ser de $73 \pm 5 \text{ }^\circ\text{F}$.
 - Se remueve el fluido libre con una pipeta o jeringa.
 - Se registra el volumen de fluido libre con una precisión de $\pm 0,1 \text{ mL}$.
 - Se procede al cálculo del porcentaje de fluido libre, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% FL = \frac{V_{FL} \rho}{m_i} 100 \quad (2.20)$$

donde,

% FL: Porcentaje de fluido libre [%]

V_{FL} : Volumen de fluido libre [mL]

ρ : Densidad de la lechada [g/cc]

m_i : Masa inicial registrada [g]

4.6.2.3. Ensayo de Resistencia a la Compresión

Los lotes de cementos G y H también deben cumplir con los requerimientos de resistencia a la compresión, como se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Requerimientos de aceptación para la resistencia a la compresión.

Cemento	Tiempo de Curado 8 h ± 15 min Resistencia a la compresión [psi]	
	T = 100 °F	T = 140 °F
Clase G & H	≥ 300	≥ 1500

A continuación se describe el procedimiento para el ensayo de resistencia a la compresión según lo establecido en la Norma API Spec. 10A:

- Se engrasan las caras interiores de los moldes cúbicos y las superficies de contacto de las placas donde se va a verter la lechada de cemento.
- Se precalienta la cámara de curado a la temperatura indicada en la Tabla 3.4.
- Se prepara la lechada de cemento de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente.
- Se vierte la lechada en cada compartimiento de los moldes cúbicos engrasados, en una capa aproximadamente la mitad de la profundidad del molde y se agita la lechada con una varilla 27 veces por espécimen.
- Se terminan de llenar los moldes hasta rebosar, se elimina el exceso de lechada nivelándolos con la parte alta del molde usando un borde recto. Se descartan los especímenes de los moldes que fuguen.
- Se coloca la cubierta seca y limpia encima del molde. Para cada determinación de la prueba, deben ser usados no menos de tres especímenes.
- Se colocan los especímenes en la cámara de curado atmosférica previamente precalentada a la temperatura del ensayo (100 °F ó 140 °F) que se desea realizar por un periodo de 8 h. El tiempo de curado empieza cuando los especímenes son colocados inicialmente en la cámara precalentada.

- Los especímenes se sacan del baño de curado 45 ± 5 min antes del tiempo en el que serán probados, se remueven de sus moldes y se colocan en un baño de agua a 80 ± 5 °F por un periodo de 40 ± 5 min.
- Se sacan los especímenes de la cámara de curado y se limpia cualquier residuo de grasa o agua que presenten.
- Se miden las aristas de cada cubo donde las caras estén más paralelas y se calcula el área de dicha cara.
- Se enciende la prensa mecánica y se verifica que no existan residuos de pruebas anteriores
- Se enciende la computadora, se abre el programa con el *software* para realizar el ensayo de resistencia a la compresión y se llenan los datos de entrada en el *software*.
- Se introduce los datos del espécimen al que se le realizará la prueba.
- Se coloca este mismo cubo en la prensa debajo del bloque del soporte superior y desde el programa se inicia la prueba.
- Se repiten los dos últimos pasos para cada uno de los especímenes.
- Se registra y promedia la resistencia a la compresión de todos los especímenes de prueba de la misma muestra de lechada y probados en el mismo período.

4.6.2.4. Ensayo de Tiempo de Espesamiento

El tiempo de espesamiento es el tiempo en que una lechada de cemento permanece en estado fluido y puede ser bombeada, se evalúa a condiciones de temperatura y presión de fondo de pozo utilizando un consistómetro presurizado que representa gráficamente la consistencia. Así pues, los lotes de cementos G y H también deben cumplir con los requerimientos de tiempo de espesamiento, como se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Requerimientos de aceptación para el tiempo de espesamiento.

Cemento	Tiempo de Espesamiento [min]	
	Mínimo	Máximo
Clase G & H	90	120

A continuación se describe el procedimiento para el ensayo de tiempo de espesamiento según lo establecido en la Norma API Spec. 10A:

- Se engrasa el interior del contenedor de la lechada del consistómetro presurizado y se coloca la tapa con la paleta previamente engrasada.
- Se prepara la lechada de cemento de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente.
- Se vierte la lechada en el contenedor invertido previamente engrasado.
- Se golpea el exterior del contenedor del consistómetro cuando el mismo está lleno de lechada para quitar el aire entrampado.
- Se asegura la base del contenedor de la lechada en su lugar y se coloca en la base móvil del equipo.
- Se inicia la rotación del contenedor de la lechada para colocar el potenciómetro y acoplar la paleta.
- Se inicia el llenado del recipiente con aceite, que permitirá el calentamiento de la lechada.
- Se enrosca el cabezal del recipiente y se coloca la termocupla dentro del eje de las paletas en el contenedor de la lechada, de tal manera que quede entre 45 y 89 mm sobre el mismo.
- Se enciende la computadora y se abre el programa con el *software* para realizar el ensayo de tiempo de espesamiento.
- Se llenan los datos de entrada en el *software*, de tal manera que la temperatura de 125 °F sea alcanzada en 30 min. a una presión de 100 psi.
- Se reporta la consistencia máxima de la lechada alcanzada durante los 15 a 30 min. del inicio de la prueba, la cual no debe exceder 30 Bc.
- Se registra como tiempo de espesamiento de la prueba, al tiempo transcurrido entre la aplicación inicial de la presión y temperatura del consistómetro presurizado, y el tiempo en que se alcanza una consistencia de 100 Bc. en un lapso entre 90 y 120 min.

4.6.2.5. Diseño de los Sistemas Cementantes

Los sistemas cementantes a evaluar en los objetivos 2 y 3 de esta investigación son:

- Sistema 1: Agua + Cemento G. Densidad de la lechada: 15,8 lpg.
- Sistema 2: Agua + Cemento H. Densidad de la lechada: 16,5 lpg.
- Sistema 3: Agua + Cemento G + Aditivos. Densidad de la lechada: 15,6 lpg.
- Sistema 4: Agua + Cemento H + Aditivos. Densidad de la lechada: 15,6 lpg.

El diseño de las lechadas de los sistemas 1 y 2 están especificados en la Tabla 4.2. Mientras que, el diseño de los sistemas 3 y 4, lechadas antimigratorias, se detalla en la Tabla 4.6 y Tabla 4.7 para un volumen de 600 cc.

Tabla 4.6. Diseño del sistema cementante 3.

Función	Componente	Diseño	Masa [g]	Volumen [mL]
	Agua	100 %	351,17	351,17
	Cemento G	100 %	766,51	244,11
Antimigratorio (Sólido)	CG-400	0,30 %	2,30	1,76
Dispersante (Sólido)	CD-61	0,15 %	1,15	0,73
Retardador (Sólido)	CR-24	0,25 %	1,92	1,56
Antiespumante (Líquido)	CA-91L	0,01 GPS	0,60	0,68

Tabla 4.7. Diseño del sistema cementante 4.

Función	Componente	Diseño	Masa [g]	Volumen [mL]
	Agua	100 %	351,17	351,17
	Cemento H	100 %	766,51	244,11
Antimigratorio (Sólido)	CG-400	0,30 %	2,30	1,76
Dispersante (Sólido)	CD-61	0,15 %	1,15	0,73
Retardador (Sólido)	CR-24	0,25 %	1,92	1,56
Antiespumante (Líquido)	CA-91L	0,01 GPS	0,60	0,68

Se evaluarán los sistemas cementantes bajo las condiciones normadas establecidas en el control de calidad y las condiciones operacionales del Campo Travi.

4.6.3. Fase III: Evaluación de los Esfuerzos y Deformaciones de los Sistemas Cementantes

En esta fase se desarrolla el objetivo 2 de esta investigación. La evaluación de los esfuerzos y deformaciones de los sistemas cementantes se realiza a través del ensayo destructivo de resistencia a la compresión descrito anteriormente.

El tiempo de curado para los diferentes sistemas cementantes en el ensayo de resistencia a la compresión será 4, 8, 12, 16, 20, 24 y 48 h. Sin embargo, primero se debe realizar el ensayo de tiempo de bombeabilidad a los diferentes sistemas, bajo las condiciones normadas y operacionales de temperatura y presión, para verificar si el ensayo a un tiempo de curado de 4 h es viable. Si el tiempo de espesamiento a una consistencia de 70 Bc es superior a 4 h, no se realiza el ensayo de resistencia a la compresión para esas condiciones de presión y temperatura, ya que los especímenes cúbicos no tendrán la consistencia necesaria para poder realizar la prueba.

Después que se realice el ensayo de tiempo de espesamiento y se determine los tiempos de curado viables, se procede con el ensayo de resistencia a la compresión bajo las siguientes condiciones:

- El sistema 1 (Cemento G + Agua) se evaluará a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica (Sistema 1A); posteriormente a 140 °F y presión atmosférica (Sistema 1B).
- El sistema 2 (Cemento H + Agua) se evaluará a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica (Sistema 2A); posteriormente a 140 °F y presión atmosférica (Sistema 2B).
- El sistema 3 (Cemento G + Aditivos + Agua) se evaluará a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica (Sistema 3A); posteriormente a 140 °F y presión atmosférica (Sistema 3B) y finalmente a 168 °F y 3000 psi (Sistema 3C).
- El sistema 4 (Cemento H + Aditivos + Agua) se evaluará a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica (Sistema 4A); posteriormente a 140 °F y presión atmosférica (Sistema 4B) y finalmente a 168 °F y 3000 psi (Sistema 4C).

Una vez finalizado el ensayo de resistencia a la compresión, se procede a descargar la data cruda del *software*: carga aplicada y desplazamiento del pistón. Con los datos de carga aplicada y el área de la cara del cubo, se calcula el esfuerzo para cada punto, y con los valores de desplazamientos del pistón, se calcula la deformación axial del cubo.

Luego se procede a graficar para cada cubo los esfuerzos y las deformaciones y se coloca la curva de mejor ajuste con la que se determina el módulo de Young y la energía de deformación.

Posteriormente se realiza un promedio entre los resultados de los 4 especímenes cúbicos. Finalmente se grafican los resultados de resistencia a la compresión promediados para cada uno de los tiempos de curado a los que se realizó el ensayo.

4.6.4. Fase IV: Evaluación de las Velocidades de Propagación de Ondas de los Sistemas Cementantes

En esta fase se desarrolla el objetivo 3 de esta investigación. La evaluación de las velocidades de propagación de ondas de los sistemas cementantes se realiza a través del ensayo acústico.

A continuación se describe el procedimiento para el ensayo acústico:

- Se engrasa el interior, la tapa y la base del contenedor de la lechada del analizador de propiedades mecánicas.
- Se enrosca la base al contenedor verificando que no existan residuos de grasa en el transductor.
- Se prepara la lechada de cemento de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente.
- Se vierte la lechada hasta el nivel marcado en el contenedor.
- Se verifica que no existan residuos de grasa en el transductor de la tapa y se enrosca la misma al contenedor.
- Se engrasa la termocupla y se inserta dentro del eje de la tapa.

-
- Se coloca el contenedor en la base del analizador y se conectan los cables que emiten las señales en la tapa y en la base del contenedor.
 - Se enciende la computadora y se abre el programa con el *software* para realizar el ensayo acústico.
 - Se introducen los datos de presión y temperatura a las cuales se desea realizar el ensayo.

El tiempo de curado para los diferentes sistemas cementantes en el ensayo acústico será 4, 8, 12, 16, 20, 24 y 48 h. Sin embargo, como el equipo permite obtener los datos en tiempo real se deja correr la prueba por 48 h para cada sistema cementante.

Los ensayos acústicos se realizarán bajo las siguientes condiciones:

- El sistema 1 (Cemento G + Agua) se evaluará a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica (Sistema 1A); posteriormente a 140 °F y presión atmosférica (Sistema 1B).
- El sistema 2 (Cemento H + Agua) se evaluará a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica (Sistema 2A); posteriormente a 140 °F y presión atmosférica (Sistema 2B).
- El sistema 3 (Cemento G + Aditivos + Agua) se evaluará a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica (Sistema 3A); posteriormente a 140 °F y presión atmosférica (Sistema 3B) y finalmente a 168 °F y 3000 psi (Sistema 3C).
- El sistema 4 (Cemento H + Aditivos + Agua) se evaluará a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica (Sistema 4A); posteriormente a 140 °F y presión atmosférica (Sistema 4B) y finalmente a 168 °F y 3000 psi (Sistema 4C).

Una vez finalizado el ensayo acústico, se procede a descargar la data cruda del programa. Con estos datos y las relaciones de las constantes elásticas de la Tabla 2.1 se procede a calcular las propiedades mecánicas dinámicas.

Luego se procede a graficar para cada sistema cementante las propiedades mecánicas dinámicas reales y calculadas para su posterior interpretación y análisis.

4.6.5. Fase V: Análisis, Conclusiones y Recomendaciones

Una vez se procesen los datos y se obtengan los resultados de los diferentes ensayos realizados en el laboratorio de cementación, se procede al análisis e interpretación de los mismos haciendo uso de tablas y gráficas, dando cumplimiento con lo propuesto en el objetivo 4.

Posteriormente se señalan las conclusiones y recomendaciones pertinentes para esta investigación.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo, mediante el uso de gráficos y tablas, se presentan los valores obtenidos a partir de los ensayos realizados en el laboratorio de cementación de las propiedades elásticas de los sistemas cementantes seleccionados. Asimismo, se realiza una comparación y análisis de dichos resultados.

5.1. Evaluación de las Propiedades de Control de Calidad del Cemento

Los cementos que se utilizaron para el desarrollo de esta investigación fueron: Cemento Clase G Lote 139 y el Cemento Clase H Lote 174. Se realizaron las correspondientes pruebas para determinar si los mismos cumplen con los requerimientos de control de calidad según la Norma API 10A: porcentaje de fluido libre, resistencia a la compresión y tiempo de espesamiento.

En la Tabla 5.1 se observan los resultados obtenidos en la prueba de fluido libre para los cementos clase G y H.

Tabla 5.1. Porcentaje de Fluido Libre a una Temperatura de 80 °F y Presión Atmosférica.

	Cemento	
	Clase G	Clase H
Volumen de Fluido Libre [mL]	7,3	5,1
Masa Inicial de Lechada [g]	756,88	791,44
Fluido Libre [%]	1,84	1,28

El porcentaje de fluido libre se calculó con la Ecuación 2.20 para un volumen de lechada inicial de 400 mL. Como ambos porcentajes de fluido libre determinados son inferiores al 5,9% que exige la Norma API 10A, se tiene que las dos clases de cementos se encuentran dentro del rango permitido y cumplen con este requerimiento de control de calidad.

En la Tabla 5.2 se observan los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la compresión para el cemento clase G. Los especímenes cúbicos fueron curados por 8 horas a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica.

Tabla 5.2. Resistencia a la Compresión a una Temperatura de 100 °F y Presión Atmosférica para el Cemento Clase G. 8 horas de curado.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]
1	49,88	50,80	2534	324,431	364,759
2	49,91	50,93	2542	371,530	
3	50,20	50,86	2553	376,615	
4	50,91	50,89	2591	386,462	

En la Tabla 5.3 se observan los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la compresión para el cemento clase G. Los especímenes cúbicos fueron curados por 8 horas a una temperatura de 140 °F y presión atmosférica.

Tabla 5.3. Resistencia a la Compresión a una Temperatura de 140 °F y Presión Atmosférica para el Cemento Clase G. 8 horas de curado.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]
1	51,13	51,28	2622	1442,946	1580,582
2	50,89	51,04	2597	1690,150	
3	51,41	50,90	2617	1666,363	
4	50,95	50,82	2589	1522,868	

En la Tabla 5.4 se observan los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la compresión para el cemento clase H. Los especímenes cúbicos fueron curados por 8 horas a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica.

Tabla 5.4. Resistencia a la Compresión a una Temperatura de 100 °F y Presión Atmosférica para el Cemento Clase H. 8 horas de curado.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]
1	50,81	50,87	2585	455,587	454,305
2	50,33	50,83	2558	448,163	
3	51,12	50,86	2600	459,523	
4	50,90	50,36	2563	453,948	

En la Tabla 5.5 se observan los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la compresión para el cemento clase H. Los especímenes cúbicos fueron curados por 8 horas a una temperatura de 140 °F y presión atmosférica.

Tabla 5.5. Resistencia a la Compresión a una Temperatura de 140 °F y Presión Atmosférica para el Cemento Clase H. 8 horas de curado.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]
1	50,67	50,93	2581	1830,682	1868,592
2	50,79	50,85	2583	1883,228	
3	50,94	50,83	2589	1926,110	
4	50,87	51,04	2596	1834,349	

La Norma API 10A establece que para una temperatura de 100 °F la resistencia a la compresión debe ser mayor o igual a 300 psi y para una temperatura de 140 °F debe ser mayor o igual a 1500 psi para los cementos clase G y H. En las tablas 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 se tienen los valores promedios de la resistencia a la compresión para las dos temperaturas de curado, observando que ambas lechadas cumplen con los requerimientos de control de calidad.

En la Figura 5.1 se observa que tiempo de espesamiento de la lechada con cemento clase G es de 1 h y 56 min lo que equivale a 116 min.

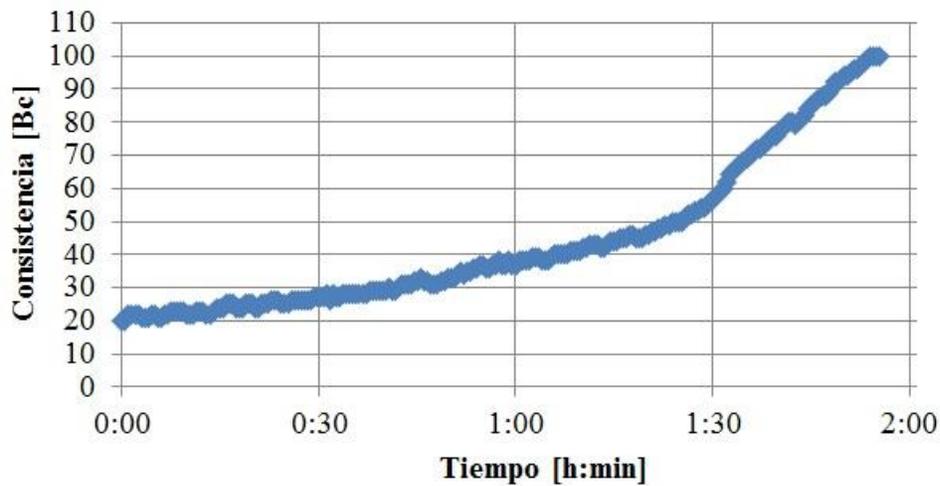


Figura 5.1. Tiempo de Espesamiento para la lechada de Cemento Clase G.

En la figura 5.2 se observa que el tiempo de espesamiento de la lechada con cemento clase H es de 1 h y 51 min lo que equivale a 111 min.

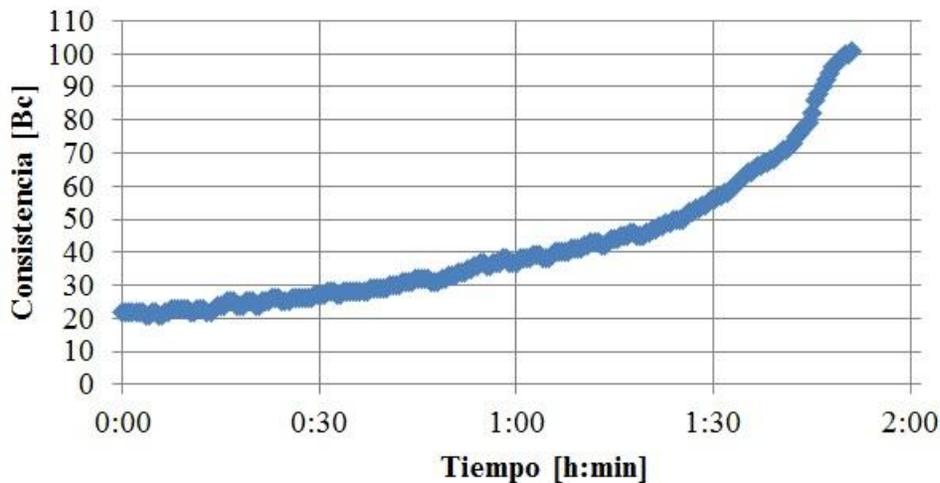


Figura 5.2. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase H.

La Norma API 10A establece que el tiempo de espesamiento para los cementos clase G y H debe estar entre 90 y 120 min, para alcanzar una consistencia de 100 Bc, asimismo se debe cumplir que en los primeros 30 min del ensayo la consistencia no debe ser mayor a 30 Bc. En las figuras 5.1 y 5.2 se tienen los valores para el tiempo

de espesamiento, observando que ambas lechadas cumplen con los requerimientos de control de calidad.

Finalmente se tiene que ambos cementos clase G lote 139 y clase H lote 175 cumplen con todos los requerimientos de control de calidad establecidos en la Norma API 10A.

5.2. Evaluación de los Esfuerzos y Deformaciones de los Sistemas Cementantes

La determinación de los esfuerzos y deformaciones de los diferentes sistemas cementantes se realiza a través del ensayo de resistencia a la compresión destructivo. A continuación se presentan los resultados y el análisis para cada sistema bajo las condiciones de temperatura y presión expuestas anteriormente.

5.2.1. Sistema 1A: Cemento Clase G + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica

Es necesario determinar los tiempos de curado viables para la prueba de resistencia a la compresión, es por ello, que se realiza primero el ensayo de tiempo de espesamiento a 100 °F y presión atmosférica.

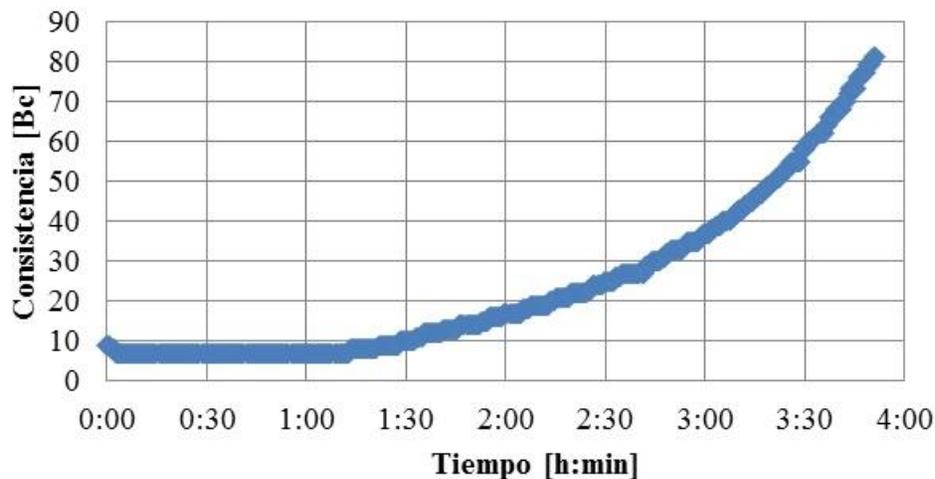


Figura 5.3. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase G. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.

En la Figura 5.3 se observa que el tiempo de espesamiento para el sistema 1A es de 3 h y 42 min, por lo tanto, los tiempos de curados viables para el ensayo de resistencia a la compresión son: 8, 12, 16, 20, 24 y 48 h.

Continuando con la evaluación de este sistema, en la Tabla 5.6 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión y su respectiva desviación estándar.

Tabla 5.6. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase G.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
8 horas						
1	49,88	50,80	2534	324,43	364,76	27,591
2	49,91	50,93	2542	371,53		
3	50,20	50,86	2553	376,62		
4	50,91	50,89	2591	386,42		
12 horas						
1	51,05	50,76	2591	894,791	919,573	40,398
2	50,75	50,81	2579	953,001		
3	51,08	50,87	2598	954,791		
4	50,40	50,86	2563	875,709		
16 horas						
1	49,73	51,12	2542	1693,147	1636,406	62,694
2	50,23	50,61	2542	1554,382		
3	50,78	50,92	2586	1621,437		
4	50,40	50,94	2567	1676,657		
20 horas						
1	50,85	50,88	2587	2000,173	2017,847	157,362
2	50,73	50,96	2585	1842,155		
3	50,87	50,76	2582	2004,046		
4	50,75	50,83	2580	2225,013		
24 horas						
1	50,32	50,89	2561	2214,862	2249,105	50,846
2	50,51	50,87	2569	2253,365		
3	50,04	50,96	2550	2208,799		
4	50,31	51,02	2567	2319,394		

Tabla 5.6. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase G. (Continuación)

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
48 horas						
1	50,54	50,83	2569	3448,146	3694,161	260,134
2	50,64	50,80	2573	3506,910		
3	49,21	50,95	2507	3828,441		
4	49,49	50,89	2519	3993,147		

En la Figura 5.4 se representa los valores promedios de la resistencia a la compresión a los diferentes tiempos de curado.

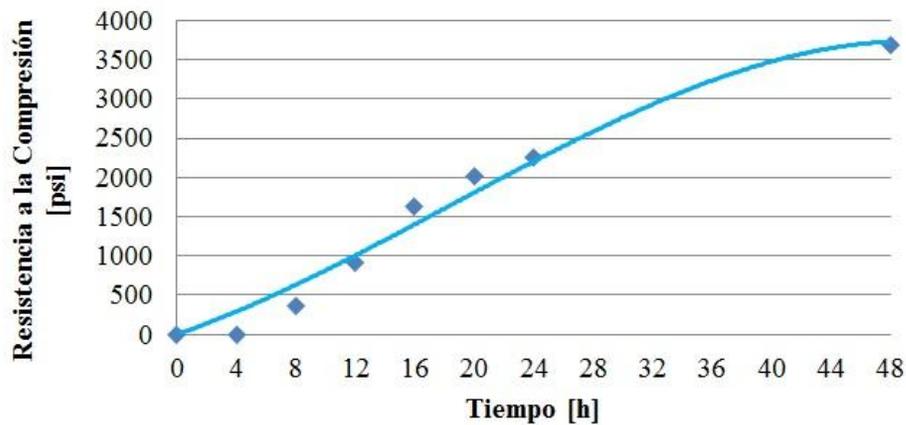


Figura 5.4. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.

En función de los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión, se graficaron los esfuerzos y deformaciones para cada uno de los especímenes cúbicos a los diferentes tiempos de curado, como se aprecia en las Figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10.

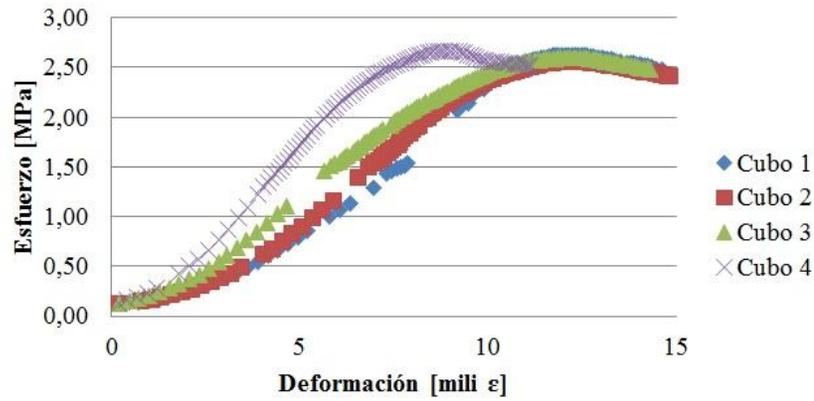


Figura 5.5. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 8 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

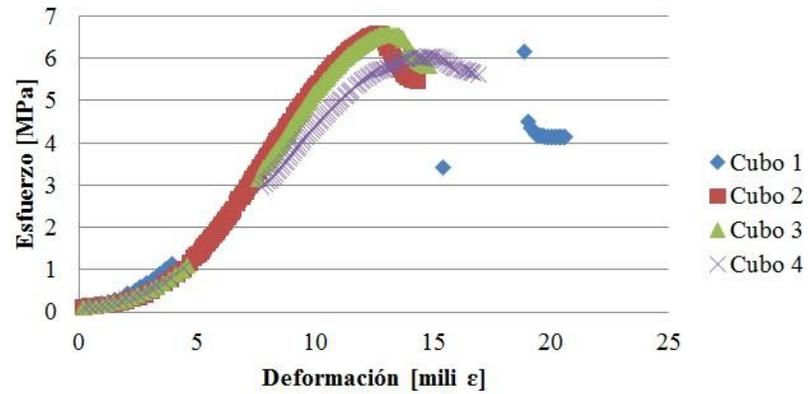


Figura 5.6. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 12 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

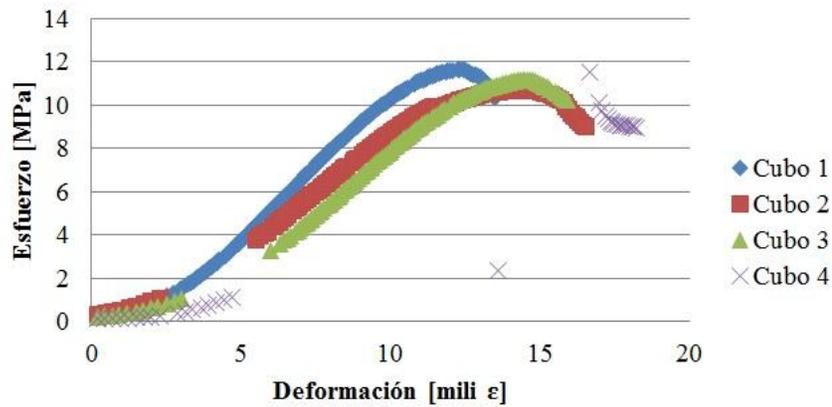


Figura 5.7. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 16 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

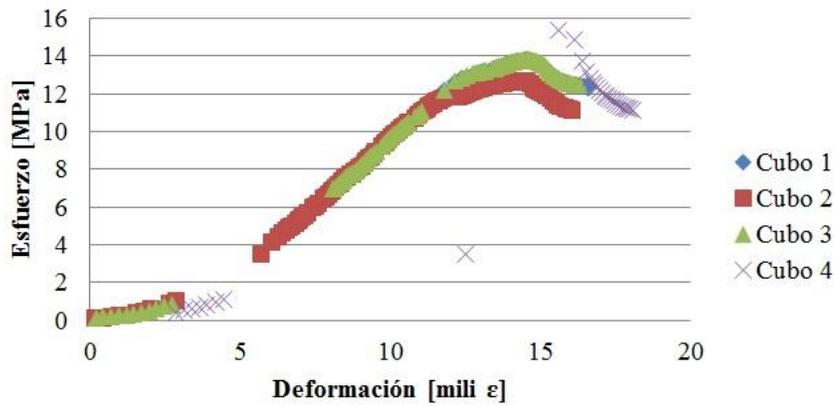


Figura 5.8. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 20 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

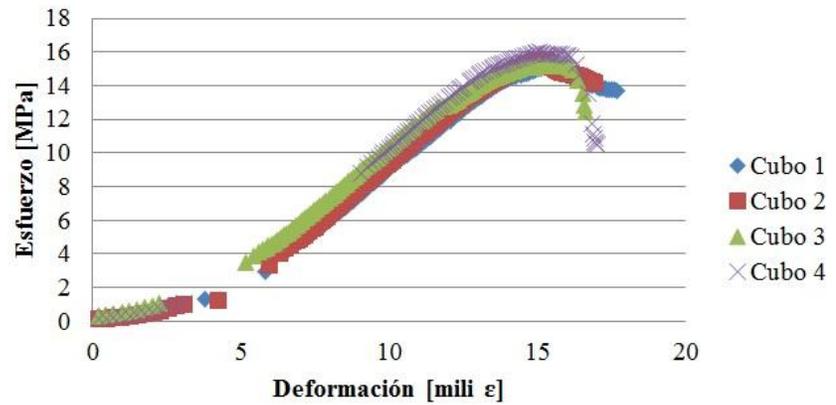


Figura 5.9. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 24 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

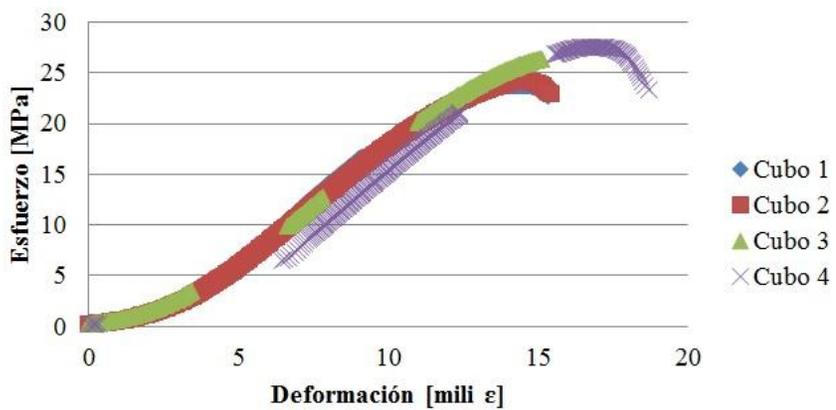


Figura 5.10. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 48 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

En base a las gráficas obtenidas anteriormente, se calculó el módulo de Young y la energía necesaria para deformar cada uno de los especímenes cúbicos del sistema cementante 1A. A continuación se muestran los resultados calculados en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G.
Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
8 horas						
1	14,58	14,83	1,91	0,2424	0,3315	0,0837
2	15,42			0,3089		
3	16,96			0,3313		
4	12,38			0,4435		
12 horas						
1	-	38,92	5,38	-	0,6858	0,1041
2	35,08			0,7917		
3	36,61			0,6823		
4	43,09			0,5835		
16 horas						
1	67,01	74,30	6,87	1,4149	1,2352	0,1576
2	80,64			1,1205		
3	75,26			1,1701		
4	-			-		
20 horas						
1	89,15	88,47	1,77	1,2509	1,3543	0,0930
2	86,46			1,4310		
3	89,79			1,3811		
4	-			-		
24 horas						
1	101,54	105,90	6,21	1,4785	1,4936	0,0232
2	101,00			1,5281		
3	114,39			1,4844		
4	106,67			1,4832		
48 horas						
1	168,74	180,66	15,91	2,4240	2,4352	0,0885
2	166,04			2,3173		
3	188,86			2,4380		
4	199,00			2,5314		

5.2.2. Sistema 1B: Cemento Clase G + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica

Es necesario determinar los tiempos de curado viables para la prueba de resistencia a la compresión, es por ello, que se realiza primero el ensayo de tiempo de espesamiento a 140 °F y presión atmosférica.

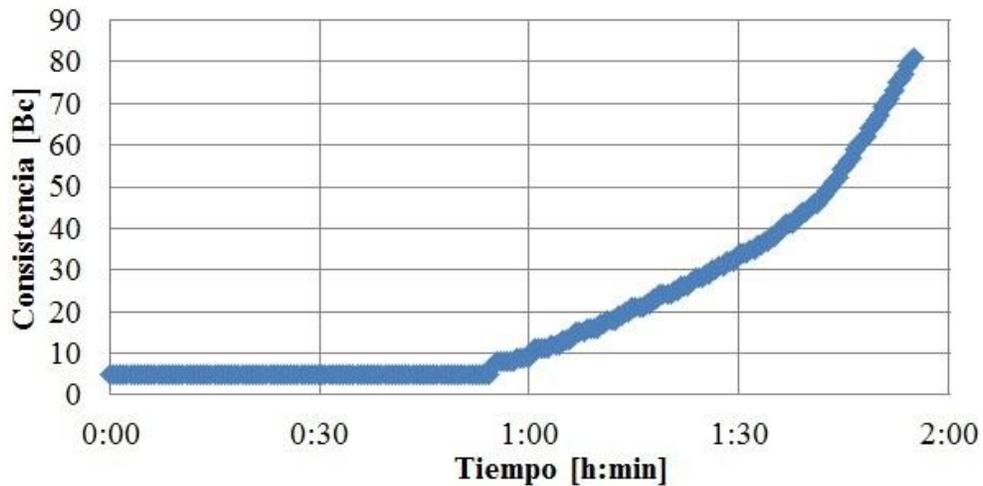


Figura 5.11. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase G. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.

En la Figura 5.11 se observa que el tiempo de espesamiento para el sistema 1B es de 1 h y 51 min, por lo tanto, los tiempos de curados viables para el ensayo de resistencia a la compresión son: 4, 8, 12, 16, 20, 24 y 48 h.

Continuando con la evaluación de este sistema, en la Tabla 5.8 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión y su respectiva desviación estándar.

Tabla 5.8. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 140 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase G.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
4 horas						
1	50,99	50,85	2593	374,096	414,052	32,053
2	51,20	50,94	2608	406,848		
3	50,94	51,12	2604	424,952		
4	50,93	50,86	2590	450,314		
8 horas						
1	51,13	51,28	2622	1442,946	1580,582	117,810
2	50,89	51,04	2597	1690,150		
3	51,41	50,90	2617	1666,363		
4	50,95	50,82	2589	1522,868		
12 horas						
1	51,53	51,34	2646	1955,573	2014,468	90,943
2	50,75	51,00	2588	2119,210		
3	50,80	50,94	2588	1968,623		
4	-	-	-	-		
16 horas						
1	51,17	51,13	2616	3053,448	2906,338	135,082
2	51,11	51,05	2609	2908,995		
3	51,27	50,87	2608	2726,865		
4	51,27	50,70	2615	2936,043		
20 horas						
1	51,81	50,94	2639	3108,759	3035,966	46,294
2	51,05	50,83	2595	738,846		
3	51,38	50,85	2613	3424,920		
4	51,17	50,89	2604	3051,133		
24 horas						
1	50,96	50,80	2589	3652,247	3560,716	66,591
2	50,11	51,01	2556	3530,234		
3	49,83	50,87	2535	3562,845		
4	50,31	50,93	2562	3497,549		
48 horas						
1	50,73	50,93	2584	5308,427	5310,607	46,818
2	50,45	50,86	2566	5245,891		
3	50,94	50,83	2589	5335,533		
4	50,35	51,01	2568	5352,579		

En la Figura 5.12 se representa los valores promedios de la resistencia a la compresión a los diferentes tiempos de curado.

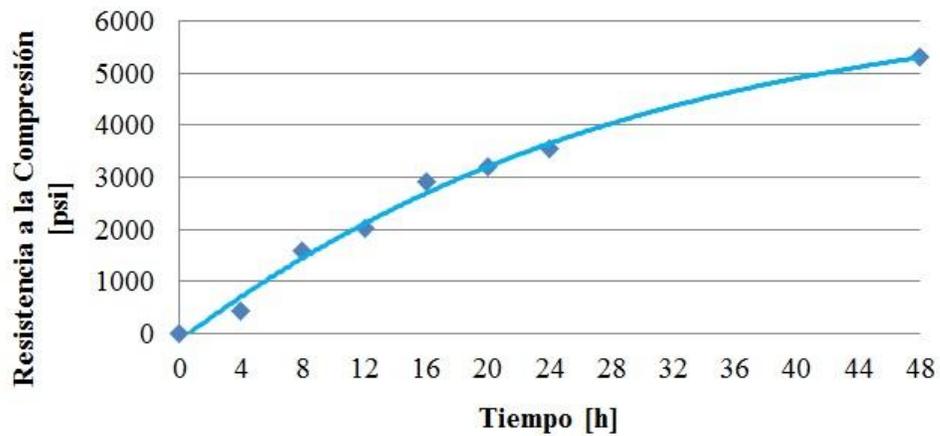


Figura 5.12. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.

En función de los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión, se graficaron los esfuerzos y deformaciones para cada uno de los especímenes cúbicos a los diferentes tiempos de curado, como se aprecia en las Figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 y 5.19.

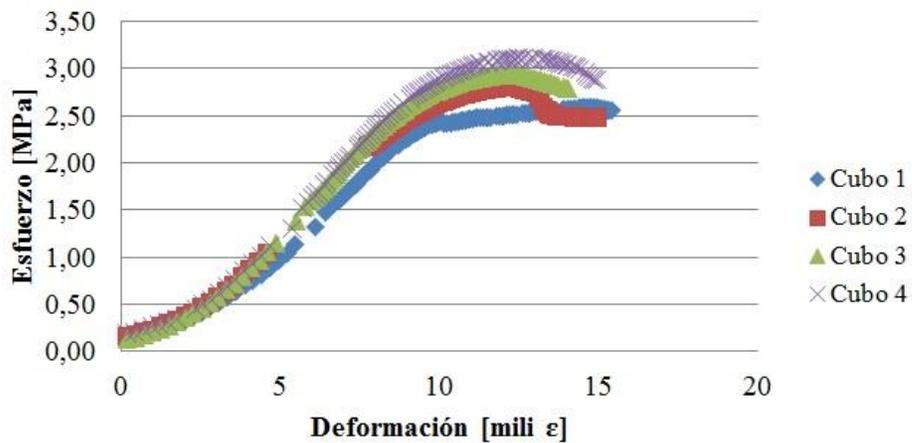


Figura 5.13. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 4 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

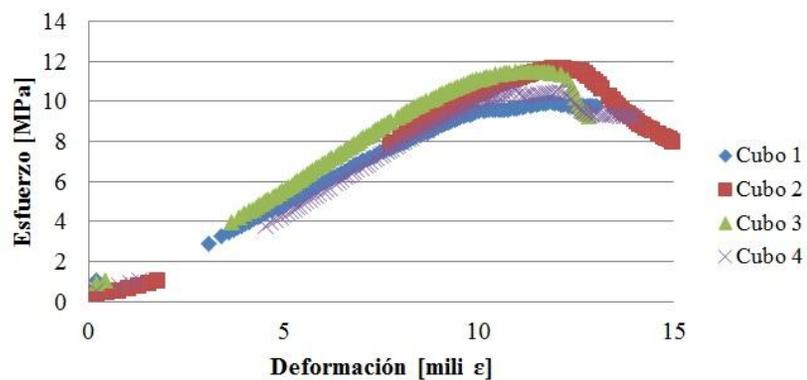


Figura 5.14. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 8 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

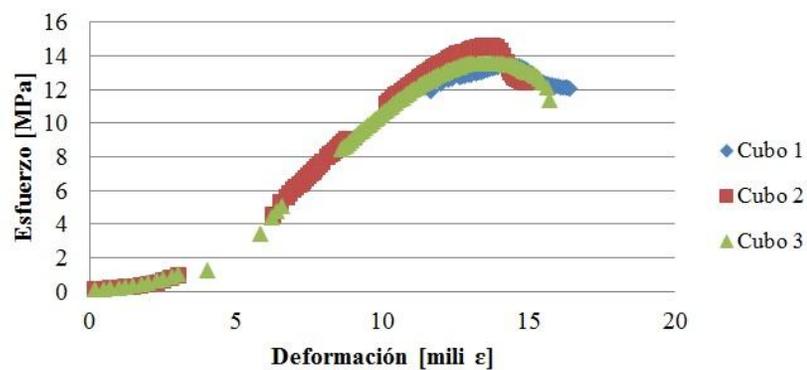


Figura 5.15. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 12 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

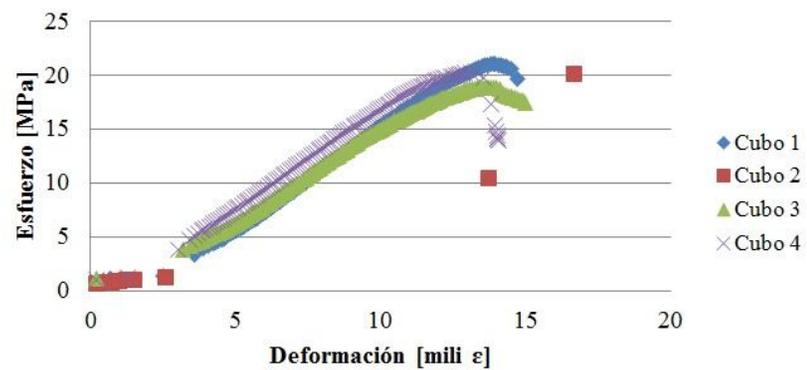


Figura 5.16. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 16 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

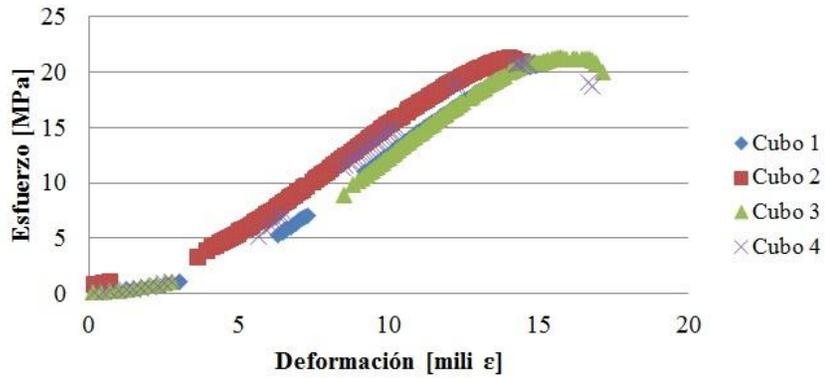


Figura 5.17. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 20 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

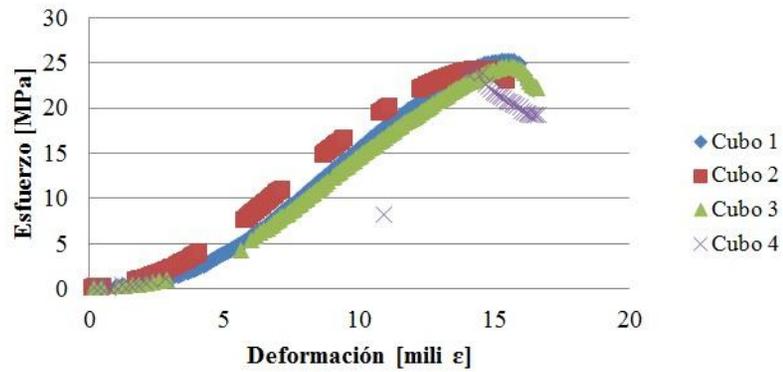


Figura 5.18. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 24 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

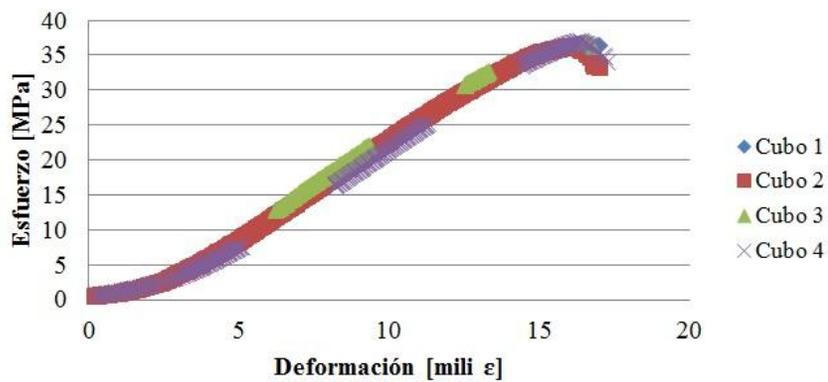


Figura 5.19. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G. Curados por 48 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

En base a las gráficas obtenidas anteriormente, se calculó el módulo de Young y la energía necesaria para deformar cada uno de los especímenes cúbicos del sistema cementante 1B. A continuación se muestran los resultados calculados en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G.
Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
4 horas						
1	21,87	19,72	2,,22	0,3184	0,3545	0,0248
2	16,95			0,3577		
3	18,96			0,3720		
4	21,10			0,3697		
8 horas						
1	67,88	68,86	1,93	1,1044	1,1793	0,0617
2	69,97			1,1548		
3	70,92			1,2413		
4	66,67			1,2165		
12 horas						
1	91,77	84,89	7,74	1,2367	1,4930	0,2287
2	86,40			1,6764		
3	76,51			1,5658		
4	-			-		
16 horas						
1	136,24	136,49	4,86	1,9766	1,9295	0,0771
2	-			-		
3	131,76			1,8406		
4	141,47			1,9714		
20 horas						
1	160,41	143,30	4,35	1,7063	2,0720	0,0387
2	-			-		
3	197,29			1,8459		
4	181,28			1,8494		

Tabla 5.9. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G.
Curados a 140 °F y Presión Atmosférica. (Continuación)

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
24 horas						
1	171,80	168,39	3,06	2,5048	2,4606	0,0452
2	167,49			2,4627		
3	165,89			2,4144		
4	-			-		
48 horas						
1	295,45	282,36	11,34	2,9226	2,9016	0,0313
2	276,17			2,8657		
3	-			-		
4	275,47			2,9166		

5.2.3. Sistema 2A: Cemento Clase H + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica

Es necesario determinar los tiempos de curado viables para la prueba de resistencia a la compresión, es por ello, que se realiza primero el ensayo de tiempo de espesamiento a 100 °F y presión atmosférica.

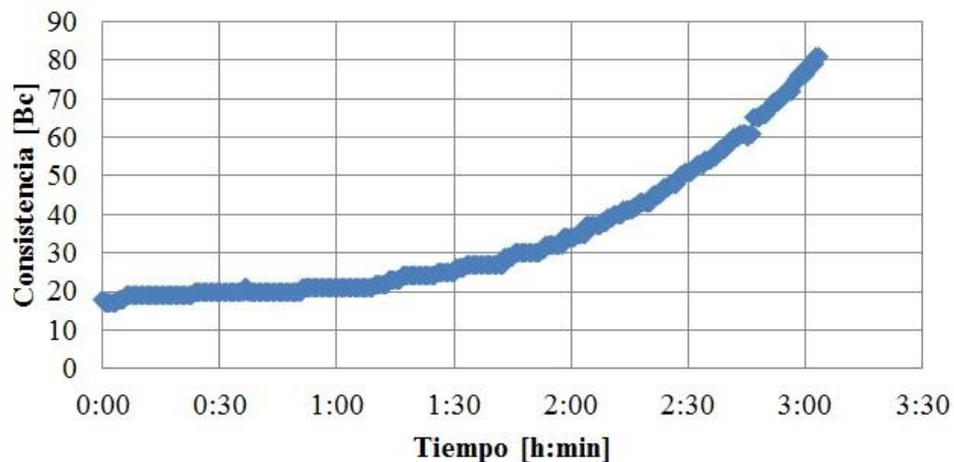


Figura 5.20. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase H. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.

En la Figura 5.20 se observa que el tiempo de espesamiento para el sistema 2A es de 2 h y 54 min, por lo tanto, los tiempos de curados viables para el ensayo de resistencia a la compresión son: 4, 8, 12, 16, 20, 24 y 48 h.

Continuando con la evaluación de este sistema, en la Tabla 5.10 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión y su respectiva desviación estándar. Los especímenes curados por 4 h no estaban totalmente fraguados, presentaban consistencia líquida en la parte superior, por tanto, no se realizó el ensayo de resistencia a la compresión.

Tabla 5.10. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
8 horas						
1	50,81	50,87	2585	455,587	454,305	4,717
2	50,33	50,83	2558	448,163		
3	51,12	50,86	2600	459,523		
4	50,90	50,36	2563	453,948		
12 horas						
1	50,80	50,83	2582	1102,831	1095,488	10,426
2	50,11	50,87	2549	1080,281		
3	50,61	50,91	2577	1101,659		
4	50,11	51,06	2559	1097,180		
16 horas						
1	50,06	50,80	2543	2098,542	1912,430	151,440
2	50,64	51,01	2583	1800,630		
3	50,55	51,49	2603	1778,052		
4	49,74	50,88	2531	1972,496		
20 horas						
1	50,63	50,99	2582	2194,645	2319,977	104,368
2	50,48	50,82	2565	2280,168		
3	50,60	50,83	2572	2432,122		
4	50,52	50,49	2551	2372,970		

Tabla 5.10. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H. (Continuación)

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
24 horas						
1	49,88	50,90	2539	2517,512	2493,744	105,201
2	49,44	51,10	2528	2489,082		
3	49,63	50,87	2525	2356,847		
4	49,73	51,03	2538	2611,533		
48 horas						
1	50,51	51,07	2580	3823,759	3949,150	116,217
2	50,23	51,04	2564	4031,792		
3	50,85	50,84	2585	4062,864		
4	50,62	50,95	2579	3878,187		

En la Figura 5.21 se representa los valores promedios de la resistencia a la compresión a los diferentes tiempos de curado.

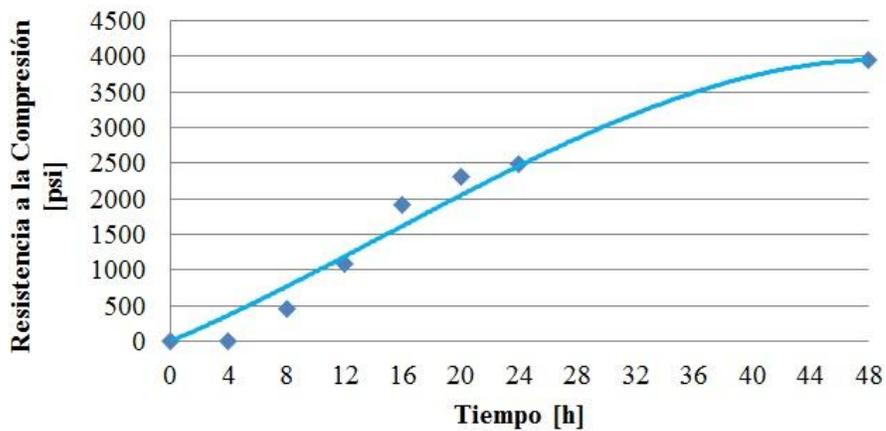


Figura 5.21. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.

En función de los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión, se graficaron los esfuerzos y deformaciones para cada uno de los especímenes cúbicos a los diferentes tiempos de curado, como se aprecia en las Figuras 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 y 5.27.

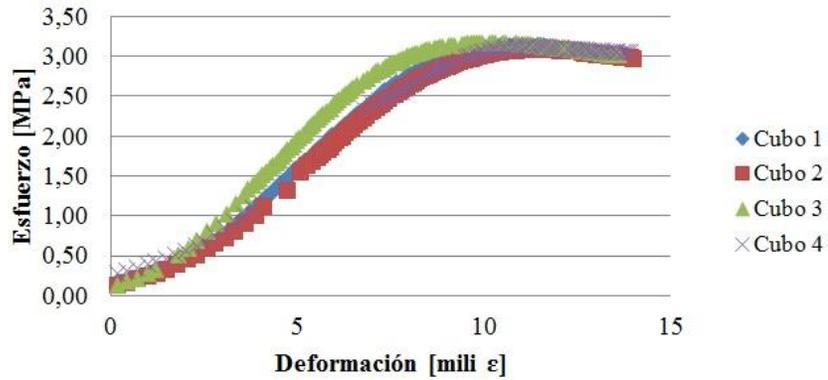


Figura 5.22. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 8 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

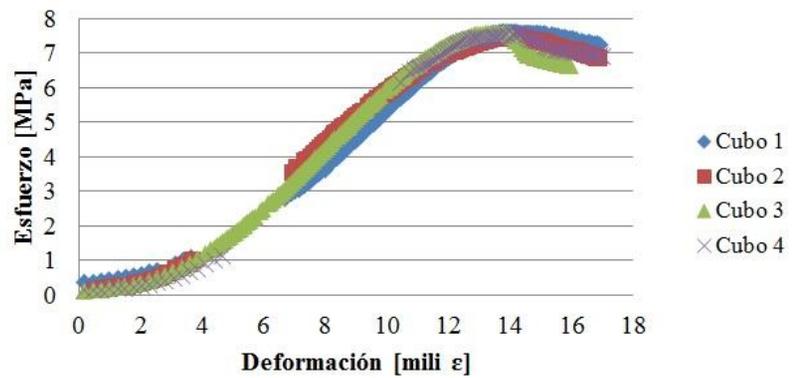


Figura 5.23. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 12 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

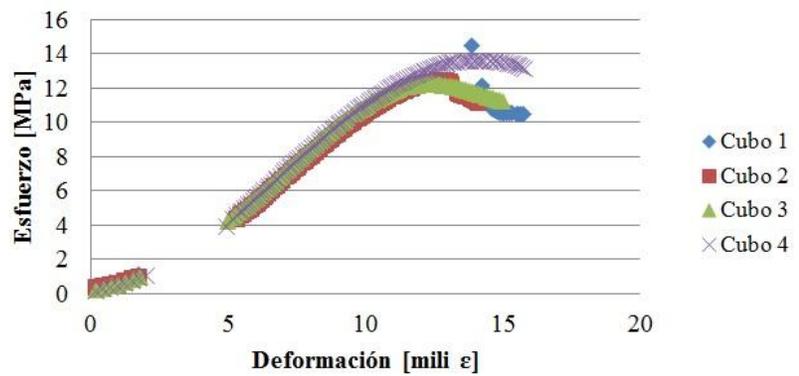


Figura 5.24. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 16 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

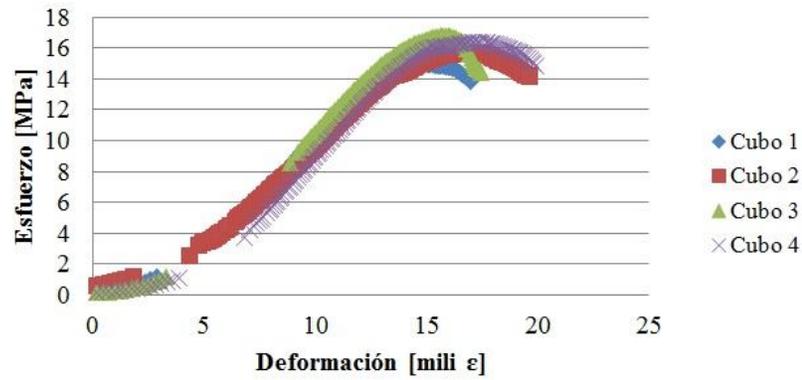


Figura 5.25. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 20 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

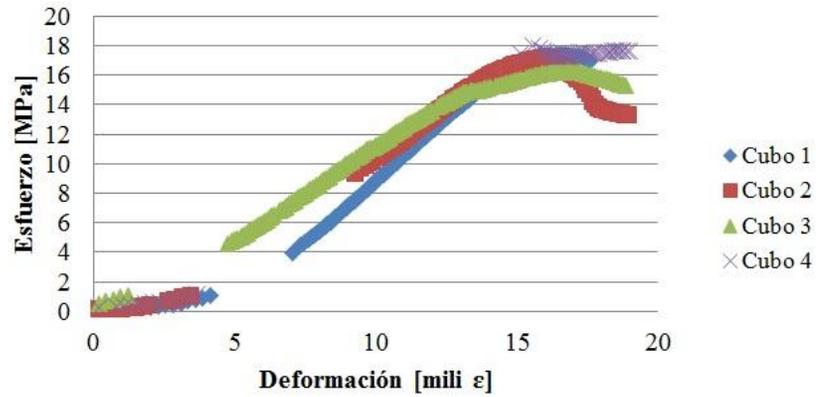


Figura 5.26. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 24 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

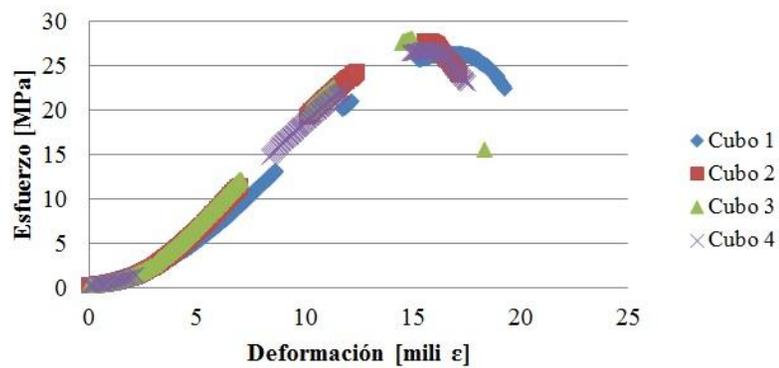


Figura 5.27. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 48 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

En base a las gráficas obtenidas anteriormente, se calculó el módulo de Young y la energía necesaria para deformar cada uno de los especímenes cúbicos del sistema cementante 2A. A continuación se muestran los resultados calculados en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase H.
Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
8 horas						
1	19,22	19,06	0,49	0,4193	0,4131	0,0064
2	18,57			0,4052		
3	18,77			0,4171		
4	19,66			0,4107		
12 horas						
1	45,21	47,50	2,20	0,7672	0,8250	0,0585
2	48,36			0,7840		
3	46,28			0,8876		
4	50,16			0,8612		
16 horas						
1	-	81,00	10,55	-	1,4644	0,0261
2	76,34			1,4343		
3	73,59			1,4795		
4	93,07			1,4795		
20 horas						
1	96,55	122,90	20,40	1,3957	1,5326	0,1225
2	131,44			1,4665		
3	119,12			1,6081		
4	144,49			1,6599		
24 horas						
1	113,51	127,95	17,72	1,7476	1,4188	0,2917
2	122,61			1,3173		
3	147,72			1,1914		
4	-			-		

Tabla 5.11. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase H.
Curados a 100 °F y Presión Atmosférica. (Continuación)

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
48 horas						
1	208,88	209,57	6,39	2,0220	2,3654	0,2635
2	210,77			2,5667		
3	201,56			2,5775		
4	217,08			2,2955		

5.2.4. Sistema 2B: Cemento Clase H + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica

Es necesario determinar los tiempos de curado viables para la prueba de resistencia a la compresión, es por ello, que se realiza primero el ensayo de tiempo de espesamiento a 140 °F y presión atmosférica.

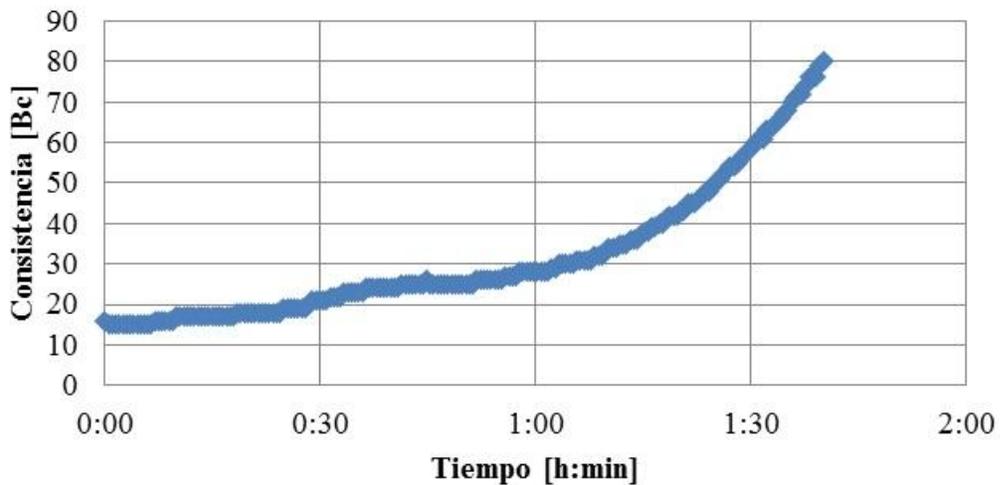


Figura 5.28. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase H. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.

En la Figura 5.28 se observa que el tiempo de espesamiento para el sistema 2B es de 1 h y 36 min, por lo tanto, los tiempos de curados viables para el ensayo de resistencia a la compresión son: 4, 8, 12, 16, 20, 24 y 48 h.

Continuando con la evaluación de este sistema, en la Tabla 5.12 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión y su respectiva desviación estándar.

Tabla 5.12. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 140 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
4 horas						
1	50,10	50,41	2526	465,102	499,828	32,644
2	49,83	50,05	2494	481,335		
3	49,47	50,29	2488	515,653		
4	49,64	50,25	2494	537,224		
8 horas						
1	50,67	50,93	2581	1830,682	1868,592	45,212
2	50,79	50,85	2583	1883,228		
3	50,94	50,83	2589	1926,110		
4	50,87	51,04	2596	1834,349		
12 horas						
1	50,90	51,06	2599	2623,572	2583,930	58,903
2	51,01	50,95	2599	2592,925		
3	51,32	50,85	2610	2498,074		
4	51,26	50,89	2609	2621,148		
16 horas						
1	51,04	51,06	2606	3240,910	3152,362	162,466
2	50,55	50,78	2567	2936,643		
3	50,71	50,92	2582	3307,392		
4	50,64	50,98	2582	3124,505		
20 horas						
1	51,27	50,87	2608	3832,881	3863,365	254,221
2	52,23	50,88	2657	3733,289		
3	51,89	50,84	2638	4229,256		
4	52,45	50,95	2672	3658,035		

Tabla 5.12. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 140 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H. (Continuación)

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
24 horas						
1	50,99	50,90	2595	4081,190	4000,333	71,803

2	51,01	50,81	2592	3964,094		
3	50,87	50,83	2586	3920,490		
4	50,56	50,92	2575	4035,558		
48 horas						
1	51,18	50,99	2610	5534,563	5851,427	225,080
2	51,16	50,88	2603	5855,442		
3	51,17	50,81	2600	5971,609		
4	51,00	50,94	2598	6044,093		

En la Figura 5.29 se representa los valores promedios de la resistencia a la compresión a los diferentes tiempos de curado.

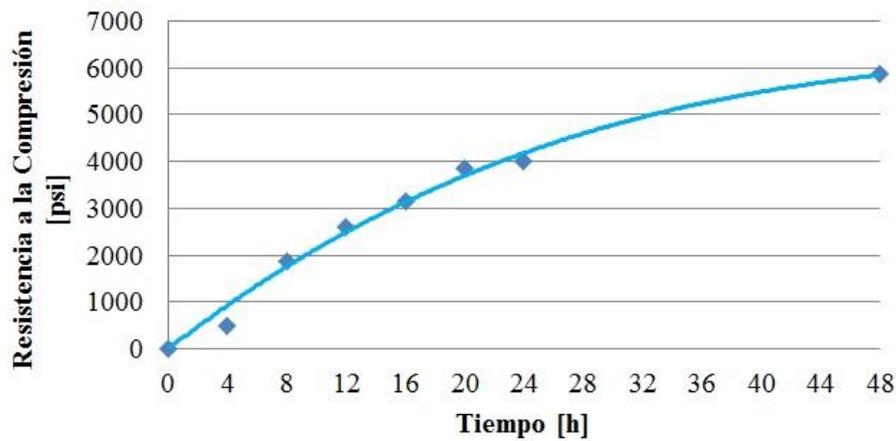


Figura 5.29. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.

En función de los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión, se graficaron los esfuerzos y deformaciones para cada uno de los especímenes cúbicos a los diferentes tiempos de curado, como se aprecia en las Figuras 5.30, 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35 y 5.36.

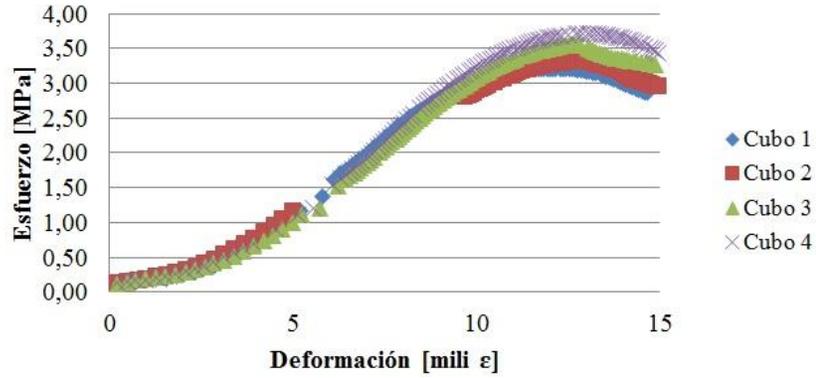


Figura 5.30. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 4 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

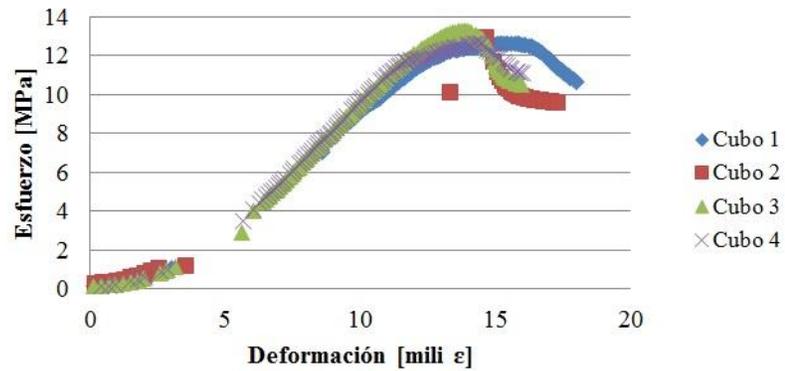


Figura 5.31. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 8 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

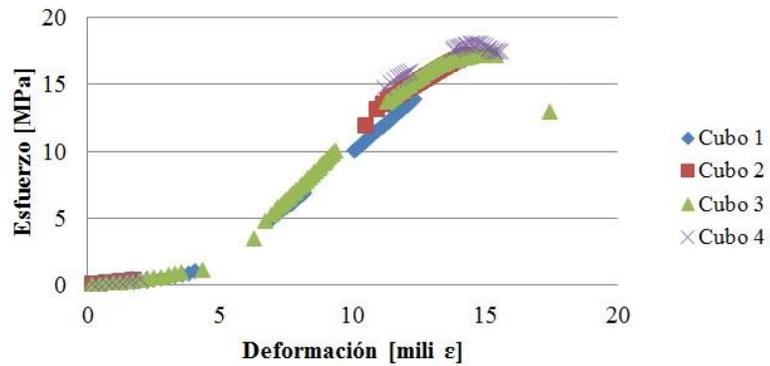


Figura 5.32. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 12 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

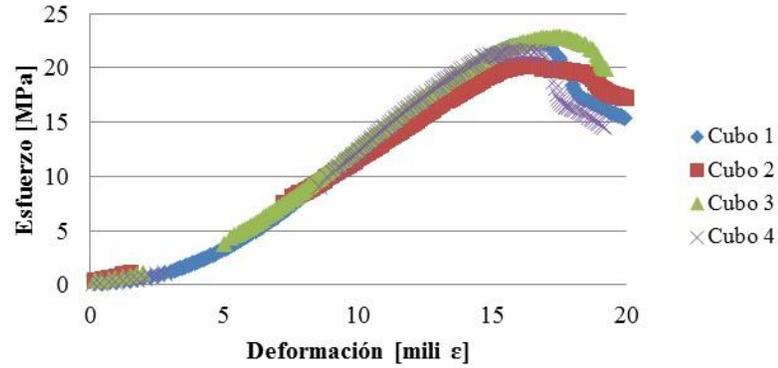


Figura 5.33. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 16 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

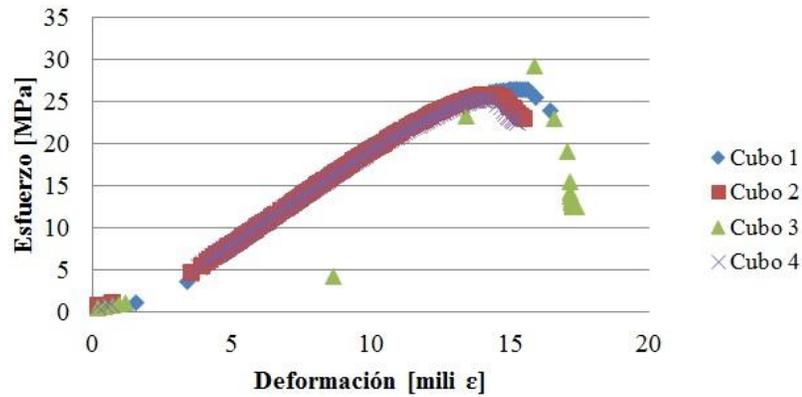


Figura 5.34. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 20 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

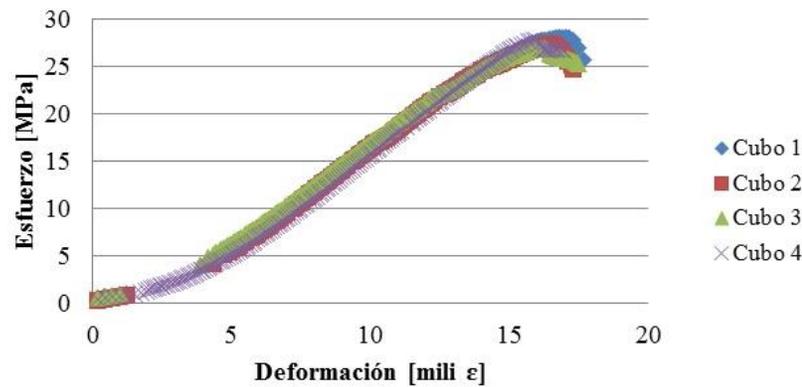


Figura 5.35. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 24 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

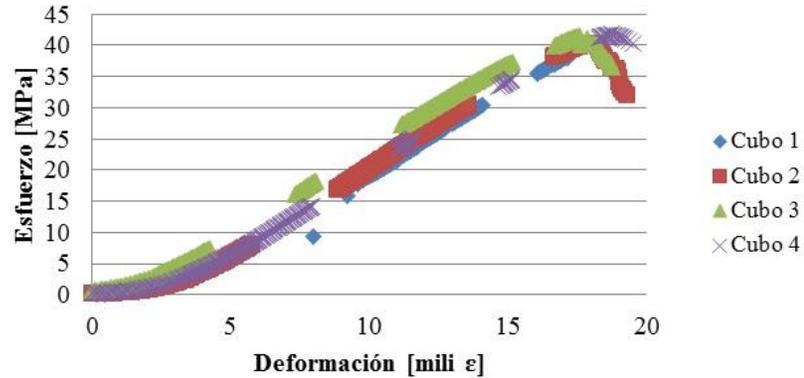


Figura 5.36. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H. Curados por 48 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

En base a las gráficas obtenidas anteriormente, se calculó el módulo de Young y la energía necesaria para deformar cada uno de los especímenes cúbicos del sistema cementante 2B. A continuación se muestran los resultados calculados en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase H. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
4 horas						
1	18,40	20,81	1,76	0,4398	0,4320	0,0291
2	21,06			0,3927		
3	21,16			0,4328		
4	22,61			0,4626		
8 horas						
1	95,84	87,12	8,06	1,1204	1,3093	0,1644
2	-			-		
3	79,93			1,3867		
4	85,59			1,4207		
12 horas						
1	121,34	118,29	8,02	1,6972	1,6615	0,4211
2	124,33			1,2236		
3	109,19			2,0636		
4	-			-		

Tabla 5.13. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase H.
Curados a 140 °F y Presión Atmosférica. (Continuación)

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
16 horas						
1	165,97	163,24	18,07	2,0182	1,9084	0,2760
2	152,47			1,5201		
3	187,56			1,9317		
4	146,96			2,1634		
20 horas						
1	208,11	189,10	16,93	2,3015	2,2251	0,0671
2	183,55			2,1757		
3	-			-		
4	175,64			2,1982		
24 horas						
1	229,33	207,90	16,95	2,2040	2,2589	0,0408
2	213,64			2,2778		
3	194,20			2,2548		
4	194,41			2,2989		
48 horas						
1	-	349,24	24,83	-	2,9175	0,0233
2	321,46			2,9444		
3	369,27			2,9050		
4	357,00			2,9020		

5.2.5. Sistema 3A: Cemento Clase G + Aditivos + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica

Es necesario determinar los tiempos de curado viables para la prueba de resistencia a la compresión, es por ello, que se realiza primero el ensayo de tiempo de espesamiento a 100 °F y presión atmosférica.

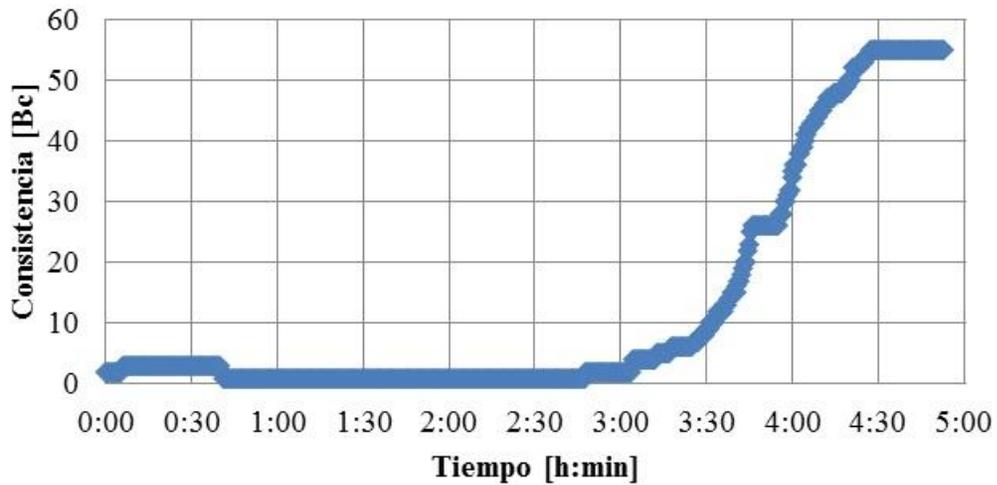


Figura 5.37. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.

En la Figura 5.37 se observa el comportamiento del tiempo de espesamiento para el sistema 3A, no pudiendo determinarse el tiempo de espesamiento real ya que a partir de 4 h y 27 min se mantuvo una consistencia constante de 55 Bc. Al desmontar el equipo se observó que las paletas junto con el cemento estaban deslizando sin poder registrarse la consistencia. Se repitió el ensayo nuevamente observando el mismo comportamiento. Los tiempos de curados viables para el ensayo de resistencia a la compresión son: 8, 12, 16, 20, 24 y 48 h.

Continuando con la evaluación de este sistema, en la Tabla 5.14 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión y su respectiva desviación estándar. Los especímenes curados por 8 h no estaban totalmente fraguados, presentaban consistencia líquida en la parte superior, por tanto, no se realizó el ensayo de resistencia a la compresión.

Tabla 5.14. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H + Aditivos.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
12 horas						
1	51,08	51,20	2615	484,083	489,947	23,570
2	51,12	50,93	2604	503,606		
3	51,39	50,97	2619	459,448		
4	51,51	50,63	2608	512,651		
16 horas						
1	50,92	50,83	25,88	774,918	809,321	57,942
2	51,14	51,17	26,17	752,200		
3	51,06	50,79	25,93	828,277		
4	51,25	51,05	26,16	881,890		
20 horas						
1	50,46	51,05	2576	1239,020	1219,252	24,056
2	50,75	51,11	2594	1189,847		
3	50,91	51,28	2611	1209,337		
4	50,87	51,19	2604	1238,806		
24 horas						
1	51,31	50,86	2610	1504,076	1509,878	27,545
2	51,21	50,96	2610	1487,729		
3	51,14	50,88	2602	1497,768		
4	50,97	50,95	2597	1549,943		
48 horas						
1	50,92	50,84	2589	2118,391	2159,748	107,324
2	51,54	50,97	2627	2263,171		
3	51,19	50,90	2606	2028,161		
4	50,02	50,91	2547	2229,270		

En la Figura 5.38 se representa los valores promedios de la resistencia a la compresión a los diferentes tiempos de curado.

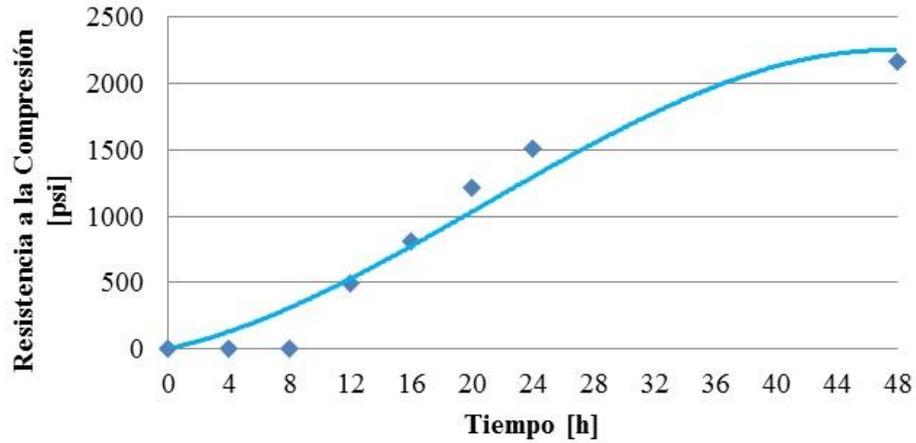


Figura 5.38. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.

En función de los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión, se graficaron los esfuerzos y deformaciones para cada uno de los especímenes cúbicos a los diferentes tiempos de curado, como se aprecia en las Figuras 5.39, 5.40, 5.41, 5.42 y 5.43.

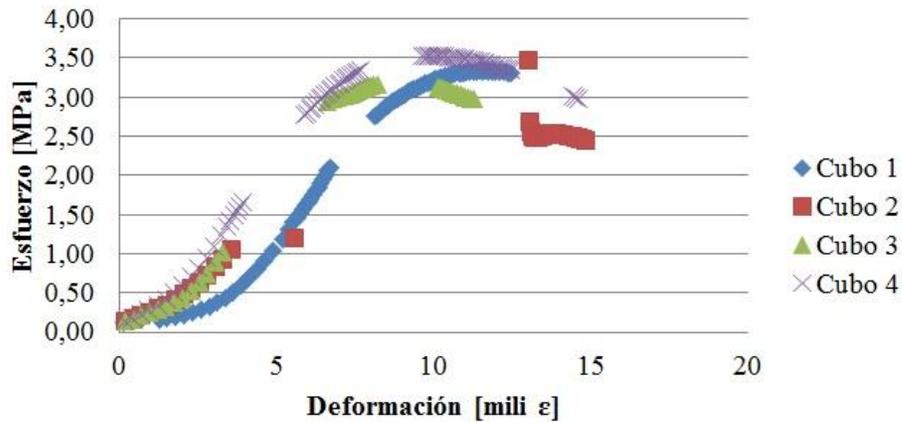


Figura 5.39. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 12 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

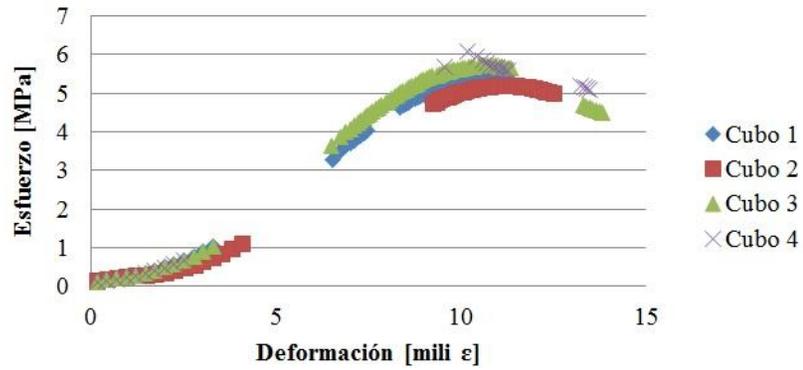


Figura 5.40. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos.
Curados por 16 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

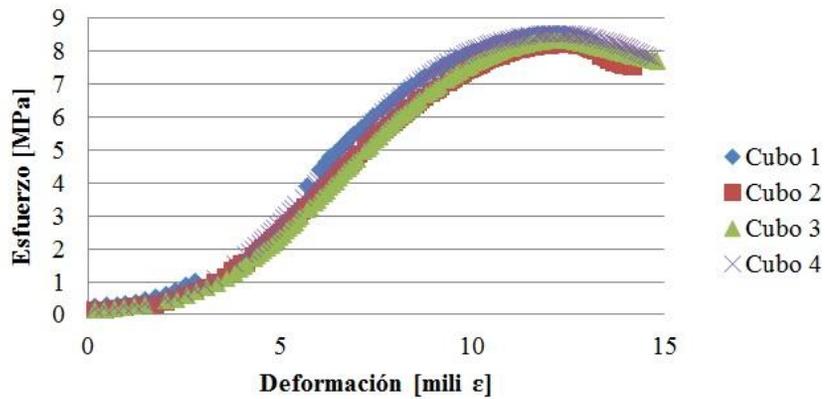


Figura 5.41. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos.
Curados por 20 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

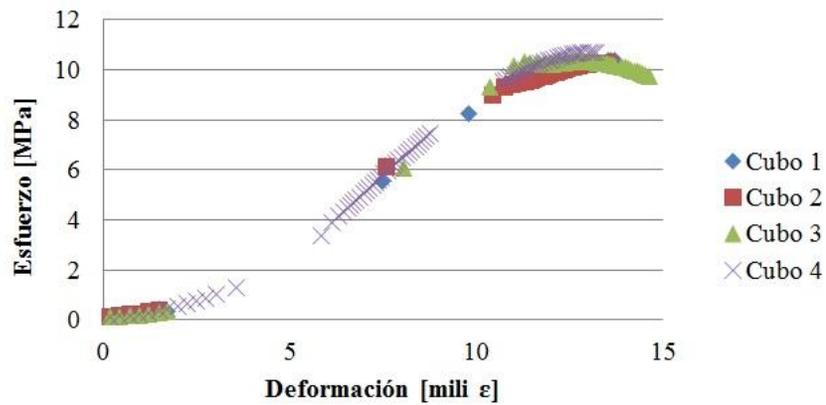


Figura 5.42. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos.
Curados por 24 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

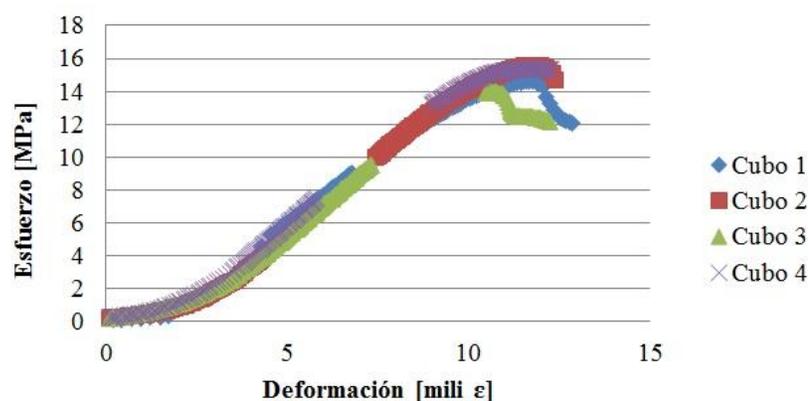


Figura 5.43. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 48 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

En base a las gráficas obtenidas anteriormente, se calculó el módulo de Young y la energía necesaria para deformar cada uno de los especímenes cúbicos del sistema cementante 3B. A continuación se muestran los resultados calculados en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
12 horas						
1	18,57	16,94	3,56	0,6335	0,6093	0,0328
2	-			-		
3	12,86			0,5720		
4	19,39			0,6223		
16 horas						
1	27,25	27,83	1,41	0,7535	0,7586	0,0541
2	26,46			0,7073		
3	29,30			0,8151		
4	-			-		
20 horas						
1	52,71	50,92	2,99	1,0808	1,1501	0,0610
2	53,70			1,1173		
3	46,97			1,1960		
4	50,30			1,2064		

Tabla 5.15. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica. (Continuación)

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
24 horas						
1	69,74	65,48	4,05	1,1648	1,2327	0,1922
2	67,96			0,9914		
3	61,05			1,3979		
4	63,15			1,3766		
48 horas						
1	83,96	81,03	9,42	1,6912	1,8216	0,0956
2	84,97			1,8088		
3	67,15			1,8951		
4	88,05			1,8914		

5.2.6. Sistema 3B: Cemento Clase G + Aditivos + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica

Es necesario determinar los tiempos de curado viables para la prueba de resistencia a la compresión, es por ello, que se realiza primero el ensayo de tiempo de espesamiento a 140 °F y presión atmosférica.

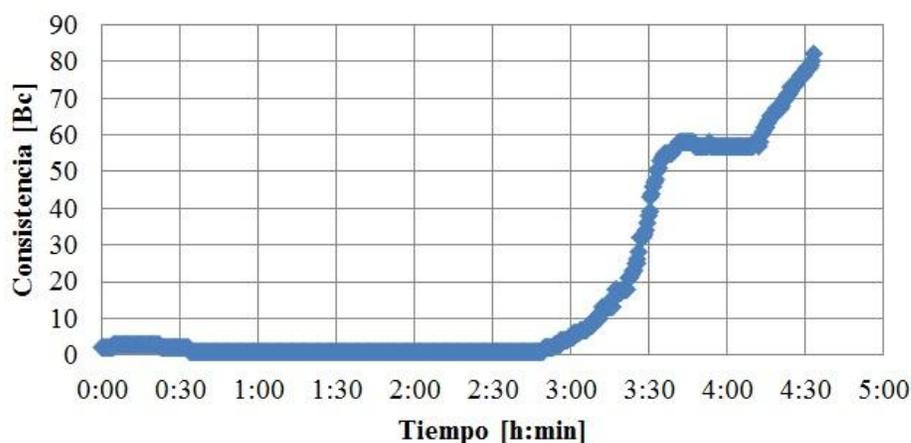


Figura 5.44. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.

En la Figura 5.44 se observa que el tiempo de espesamiento para el sistema 3B es de 4 h y 22 min, por lo tanto, los tiempos de curados viables para el ensayo de resistencia a la compresión son: 8, 12, 16, 20, 24 y 48 h.

Continuando con la evaluación de este sistema, en la Tabla 5.16 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión y su respectiva desviación estándar.

Tabla 5.16. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 140 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase G + Aditivos.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
8 horas						
1	50,83	50,98	2591	461,119	487,865	20,948
2	49,84	50,85	2534	488,330		
3	50,63	51,06	2585	489,701		
4	49,72	50,93	2532	512,309		
12 horas						
1	51,05	50,81	2594	1097,729	1073,227	25,369
2	50,73	50,86	2580	1039,736		
3	51,29	50,93	2612	1086,897		
4	50,60	50,92	2577	1068,543		
16 horas						
1	50,96	50,82	2590	1515,690	1585,327	114,820
2	51,32	50,85	2610	1487,727		
3	51,08	50,93	2602	1743,751		
4	49,54	51,02	2525	1594,139		
20 horas						
1	50,81	50,94	2588	2310,466	2219,232	92,377
2	50,97	50,99	2599	2259,095		
3	51,46	50,89	2619	2094,125		
4	51,54	50,88	2622	2213,241		
24 horas						
1	51,32	51,96	2667	2556,679	2567,424	20,049
2	51,38	50,82	2611	2581,008		
3	51,53	51,04	2630	2587,239		
4	51,10	51,24	2618	2544,769		

Tabla 5.16. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 140 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase G + Aditivos. (Continuación)

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
48 horas						
1	51,25	50,89	2608	3835,063	3833,901	51,752
2	51,09	50,90	2600	3776,840		
3	50,93	50,88	2591	3907,945		
4	50,25	50,98	2562	3821,756		

En la Figura 5.45 se representa los valores promedios de la resistencia a la compresión a los diferentes tiempos de curado.

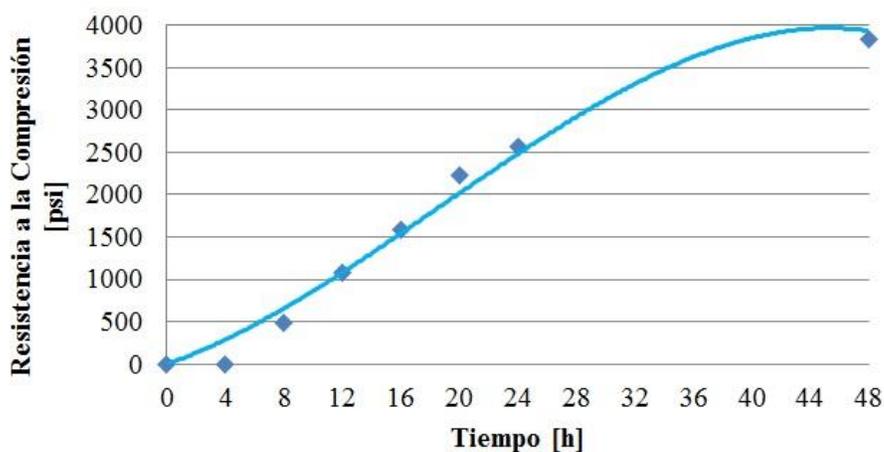


Figura 5.45. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.

En función de los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión, se graficaron los esfuerzos y deformaciones para cada uno de los especímenes cúbicos a los diferentes tiempos de curado, como se aprecia en las Figuras 5.46, 5.47, 5.48, 5.49, 5.50 y 5.51.

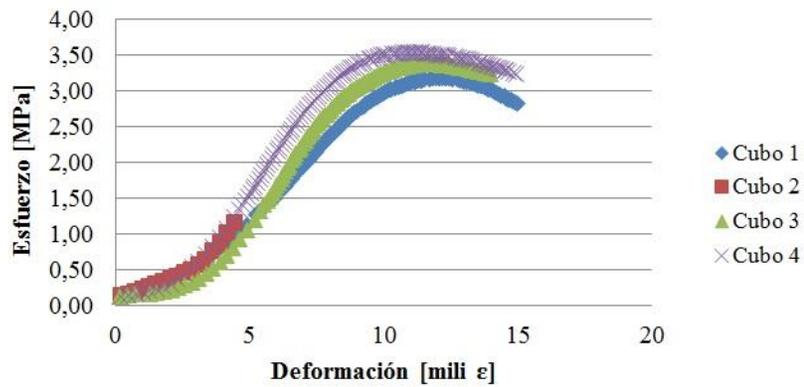


Figura 5.46. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos.
Curados por 8 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

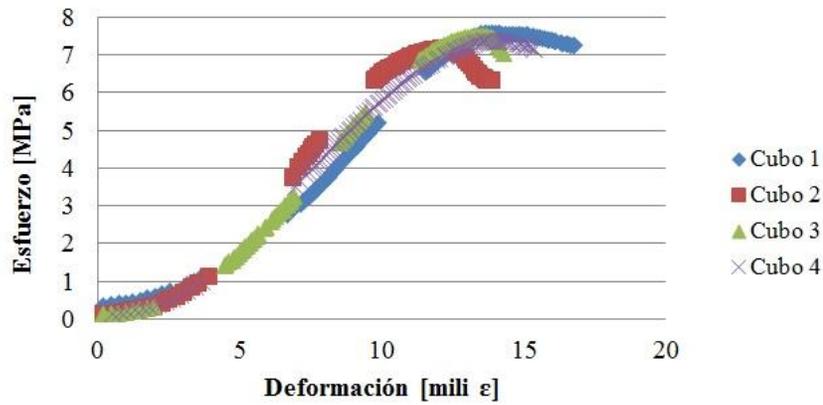


Figura 5.47. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos.
Curados por 12 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

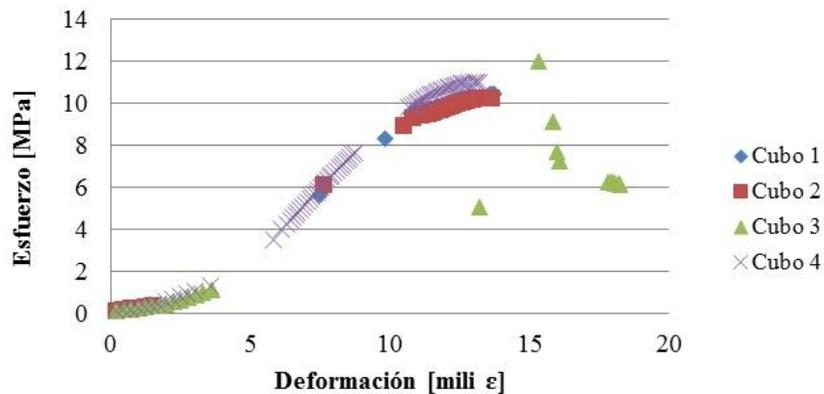


Figura 5.48. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos.
Curados por 16 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

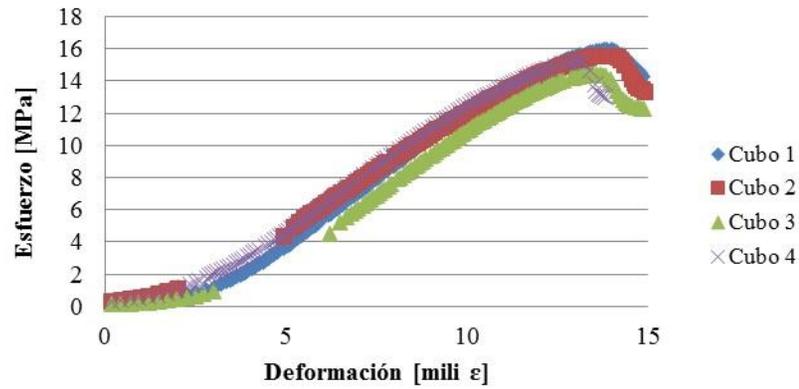


Figura 5.49. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 20 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

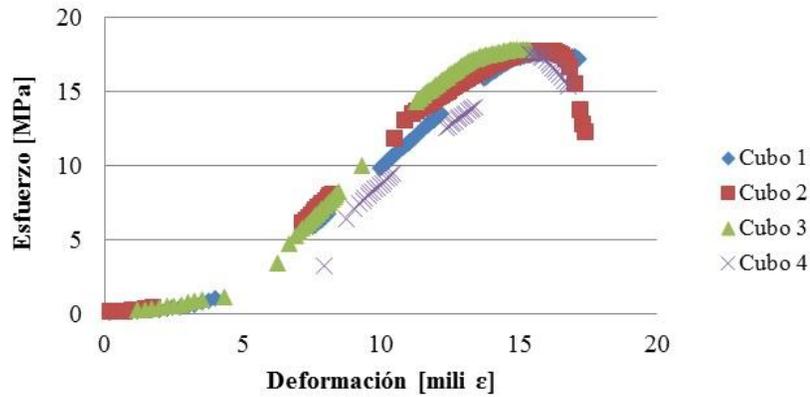


Figura 5.50. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 24 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

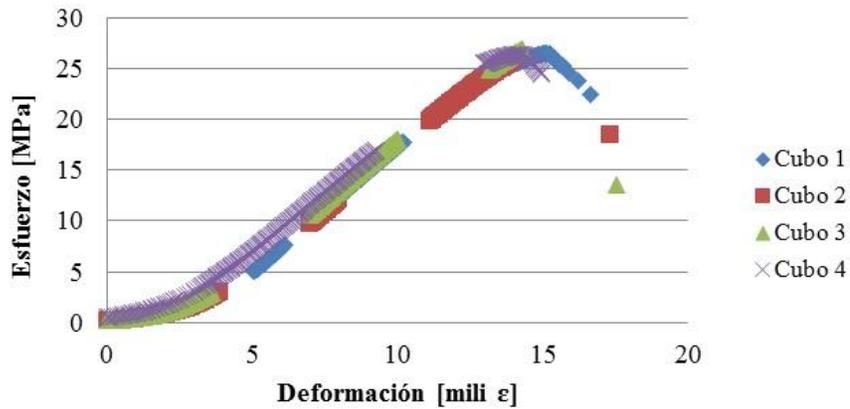


Figura 5.51. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados por 48 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

En base a las gráficas obtenidas anteriormente, se calculó el módulo de Young y la energía necesaria para deformar cada uno de los especímenes cúbicos del sistema cementante 3B. A continuación se muestran los resultados calculados en la Tabla 5.17.

Tabla 5.17. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
8 horas						
1	19,54	19,08	0,52	0,4202	0,4776	0,0594
2	-			-		
3	18,52			0,5389		
4	19,19			0,4738		
12 horas						
1	45,08	44,62	3,44	0,8286	0,8704	0,0967
2	40,11			1,0061		
3	44,83			0,8651		
4	48,48			0,7816		
16 horas						
1	70,22	67,88	2,48	1,1692	1,2013	0,2323
2	69,14			0,9867		
3	-			-		
4	65,29			1,4479		
20 horas						
1	101,57	96,82	8,63	1,6978	1,6556	0,0897
2	104,58			1,5291		
3	84,98			1,7301		
4	96,17			1,6602		
24 horas						
1	116,55	118,87	7,30	1,6556	1,8119	0,1377
2	127,05			1,9553		
3	113,02			1,8647		
4	-			-		

Tabla 5.17. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica. (Continuación)

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
48 horas						
1	181,10	169,05	12,35	2,4030	2,4233	0,0480
2	152,55			2,4401		
3	167,40			2,4808		
4	175,15			2,3694		

5.2.7. Sistema 3C: Cemento Clase G + Aditivos + Agua. Curado a 168 °F y 3000 psi

Es necesario determinar los tiempos de curado viables para la prueba de resistencia a la compresión, es por ello, que se realiza primero el ensayo de tiempo de espesamiento a 168 °F y 3000 psi.

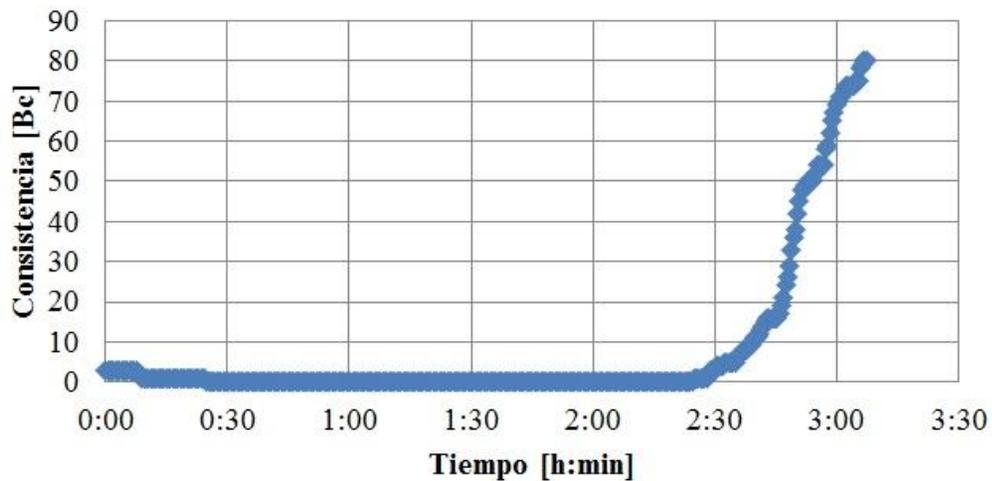


Figura 5.52. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 168 °F y 3000 psi.

En la Figura 5.52 se observa que el tiempo de espesamiento para el sistema 3C es de 3 h y 01 min, por lo tanto, los tiempos de curados viables para el ensayo de resistencia a la compresión son: 4, 8, 12, 16, 20, 24 y 48 h.

Continuando con la evaluación de este sistema, en la Tabla 5.18 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión y su respectiva desviación estándar. Los especímenes curados por 4 h no estaban totalmente fraguados, presentaban consistencia líquida en la parte superior, por tanto, no se realizó el ensayo de resistencia a la compresión.

Tabla 5.18. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 168 °F y 3000 psi para el Cemento Clase G + Aditivos.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
8 horas						
1	50,89	51,05	2598	771,936	792,849	29,716
2	50,51	50,97	2574	764,766		
3	50,93	50,82	2588	806,795		
4	50,57	50,96	2577	827,900		
12 horas						
1	50,79	50,91	2586	1082,425	1073,284	19,025
2	51,16	50,94	2606	1056,652		
3	50,69	51,12	2591	1095,707		
4	50,83	50,82	2583	1058,352		
16 horas						
1	50,60	50,88	2575	1894,602	1812,863	60,065
2	50,73	50,80	2577	1795,992		
3	50,58	50,85	2572	1750,818		
4	50,45	50,90	2568	1810,040		
20 horas						
1	51,01	51,07	2605	2534,537	2606,825	78,169
2	51,43	51,03	2624	2670,136		
3	50,99	51,02	2602	2544,018		
4	50,88	51,18	2604	2678,617		

Tabla 5.18. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 168 °F y 3000 psi para el Cemento Clase G + Aditivos. (Continuación)

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
24 horas						

1	50,42	50,98	2568	3184,740	3121,309	56,035
2	50,35	50,87	2561	3150,125		
3	50,38	51,01	2570	3062,719		
4	50,55	51,41	2599	3087,649		
48 horas						
1	50,66	50,95	2581	3843,219	3789,448	75,315
2	50,61	50,86	2574	3703,370		
3	50,44	50,84	2562	3821,756		
4	-	-	-	-		

En la Figura 5.53 se representa los valores promedios de la resistencia a la compresión a los diferentes tiempos de curado.

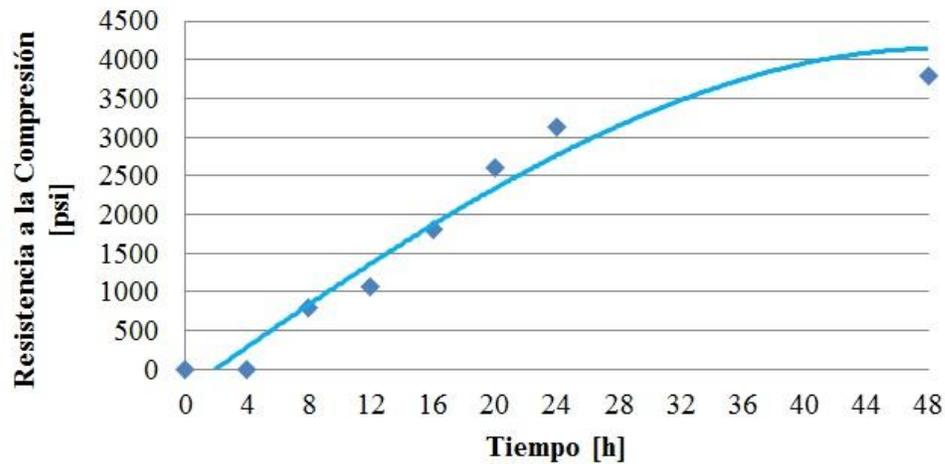


Figura 5.53. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 168 °F y 3000 psi.

En función de los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión, se graficaron los esfuerzos y deformaciones para cada uno de los especímenes cúbicos a los diferentes tiempos de curado, como se aprecia en las Figuras 5.54, 5.55, 5.56, 5.57, 5.58 y 5.59.

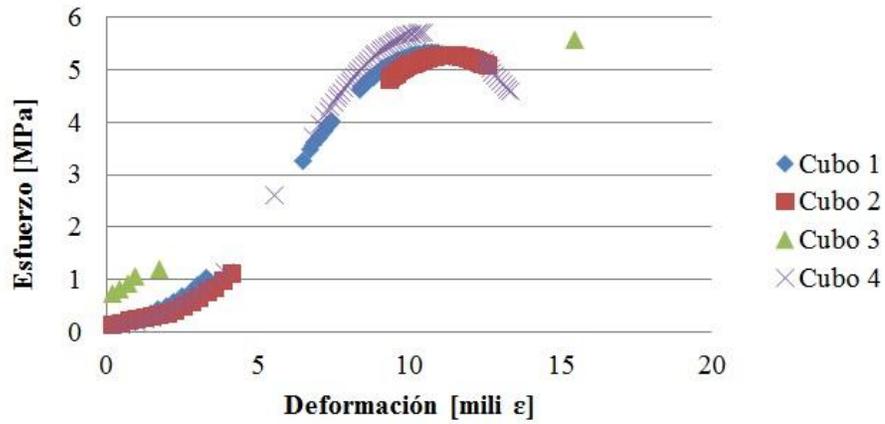


Figura 5.54. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos.
Curados por 8 horas a 168 °F y 3000 psi.

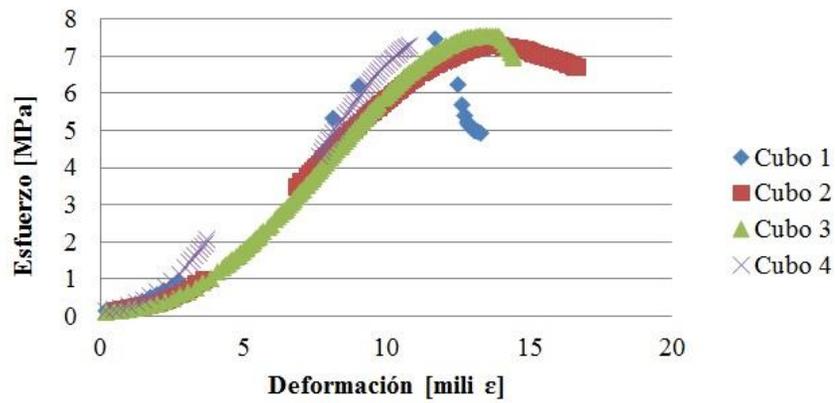


Figura 5.55. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos.
Curados por 12 horas a 168 °F y 3000 psi.

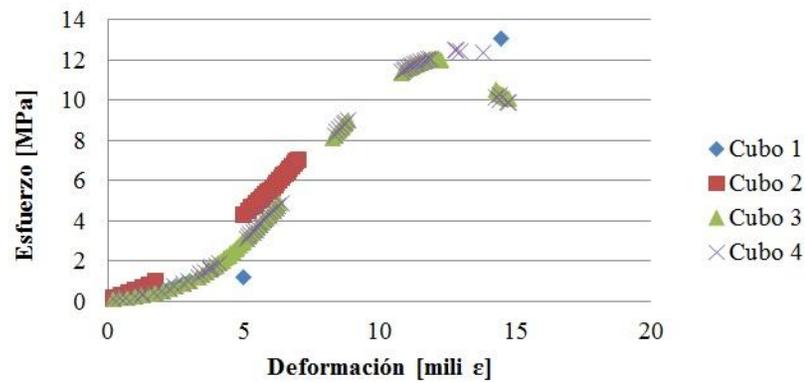


Figura 5.56. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos.
Curados por 16 horas a 168 °F y 3000 psi.

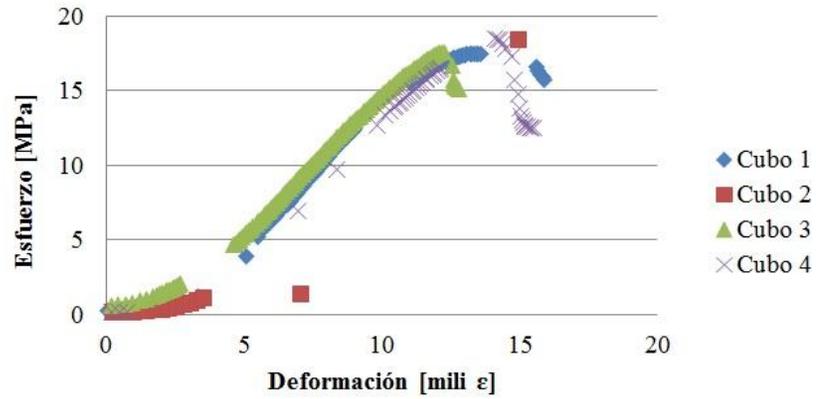


Figura 5.57. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos.
Curados por 20 horas a 168 °F y 3000 psi.

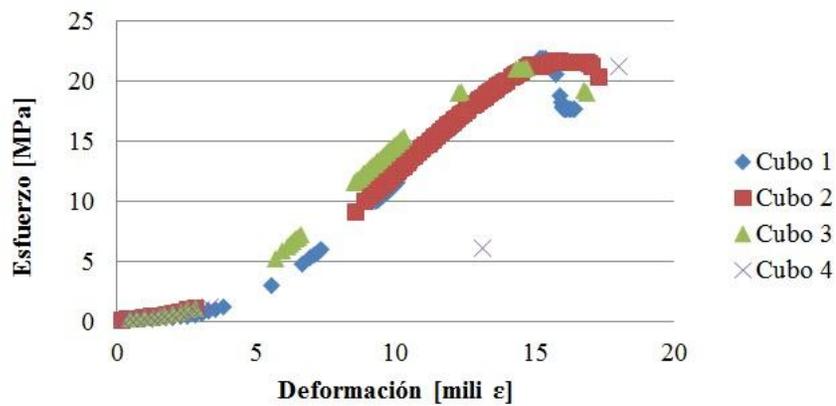


Figura 5.58. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos.
Curados por 24 horas a 168 °F y 3000 psi.

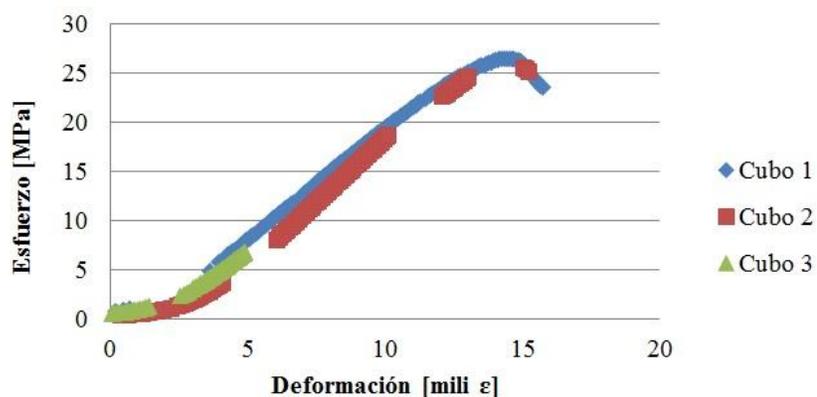


Figura 5.59. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos.
Curados por 48 horas a 168 °F y 3000 psi.

En base a las gráficas obtenidas anteriormente, se calculó el módulo de Young y la energía necesaria para deformar cada uno de los especímenes cúbicos del sistema cementante 3C. A continuación se muestran los resultados calculados en la Tabla 5.19.

Tabla 5.19. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 168 °F y 3000 psi.

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
8 horas						
1	27,16	27,15	0,06	0,6961	0,7636	0,1025
2	27,19			0,7132		
3	-			-		
4	27,08			0,8815		
12 horas						
1	41,68	44,73	2,70	0,9942	0,8894	0,1062
2	46,53			0,7818		
3	46,02			0,8923		
4	-			-		

Tabla 5.19. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curados a 168 °F y 3000 psi. (Continuación)

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
16 horas						
1	-	69,59	6,48	-	1,4794	0,0777
2	74,34			1,4748		
3	62,22			1,5593		
4	72,23			1,4042		
20 horas						
1	112,49	107,28	8,86	2,1468	2,0462	0,0883
2	-			-		
3	97,05			1,9816		
4	112,33			2,0101		
24 horas						
1	125,74	138,15	11,39	2,0447	2,2351	0,2815
2	148,13			2,1021		
3	140,59			2,5585		
4	-			-		
48 horas						
1	192,21	183,98	9,02	2,2842	2,3888	0,1867
2	185,39			2,6044		
3	174,34			2,2779		
4	-			-		

5.2.8. Sistema 4A: Cemento Clase H + Aditivos + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica

Es necesario determinar los tiempos de curado viables para la prueba de resistencia a la compresión, es por ello, que se realiza primero el ensayo de tiempo de espesamiento a 100 °F y presión atmosférica.

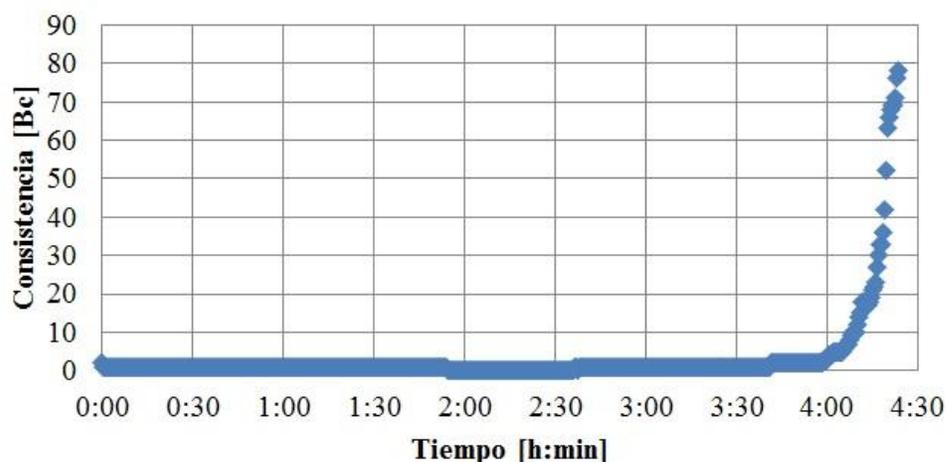


Figura 5.60. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.

En la Figura 5.60 se observa que el tiempo de espesamiento para el sistema 4A es de 4 h y 23 min, por lo tanto, los tiempos de curados viables para el ensayo de resistencia a la compresión son: 8, 12, 16, 20, 24 y 48 h.

Continuando con la evaluación de este sistema, en la Tabla 5.20 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión y su respectiva desviación estándar. Los especímenes curados por 8 h no estaban totalmente fraguados, presentaban consistencia líquida en la parte superior, por tanto, no se realizó el ensayo de resistencia a la compresión.

Tabla 5.20. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H + Aditivos.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
12 horas						
1	50,67	50,87	2578	72,827	76,381	2,570
2	50,53	50,93	2573	78,496		
3	49,43	50,91	2516	78,013		
4	49,63	51,15	2539	76,186		

Tabla 5.20. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 100 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H + Aditivos. (Continuación)

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
16 horas						
1	50,83	50,81	2583	365,633	365,827	17,975
2	50,88	50,82	2586	343,208		
3	51,43	50,74	2610	367,300		
4	51,64	50,79	2623	387,169		
20 horas						
1	50,10	50,92	2551	762,741	770,267	23,070
2	50,49	50,87	2568	773,200		
3	50,15	50,93	2554	745,137		
4	51,11	50,91	2602	800,267		
24 horas						
1	50,74	50,94	2585	1404,175	1402,474	64,869
2	49,76	50,89	2532	1437,059		
3	50,75	50,94	2585	1365,659		
4	49,83	50,89	2536	1493,001		
48 horas						
1	51,84	51,24	2656	2071,379	2078,220	52,008
2	51,63	51,17	2642	2097,429		
3	51,53	50,84	2621	2133,770		
4	51,40	50,88	2615	2010,303		

En la Figura 5.61 se representa los valores promedios de la resistencia a la compresión a los diferentes tiempos de curado.

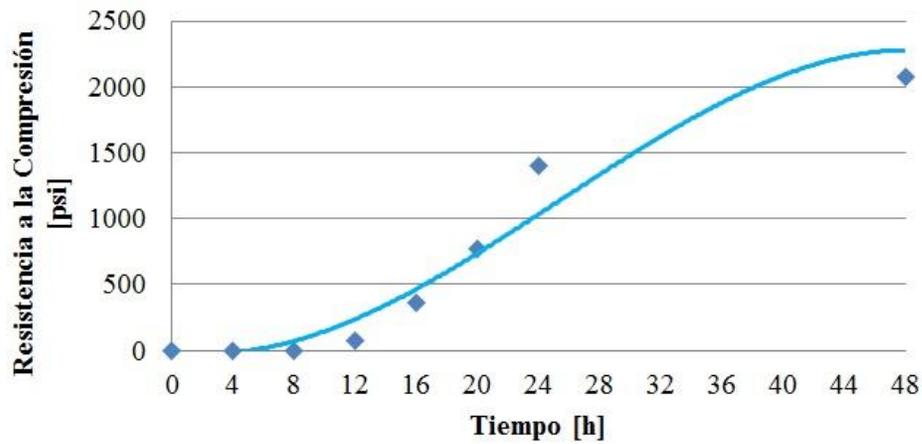


Figura 5.61. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.

En función de los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión, se graficaron los esfuerzos y deformaciones para cada uno de los especímenes cúbicos a los diferentes tiempos de curado, como se aprecia en las Figuras 5.62, 5.63, 5.64, 5.65 y 5.66.

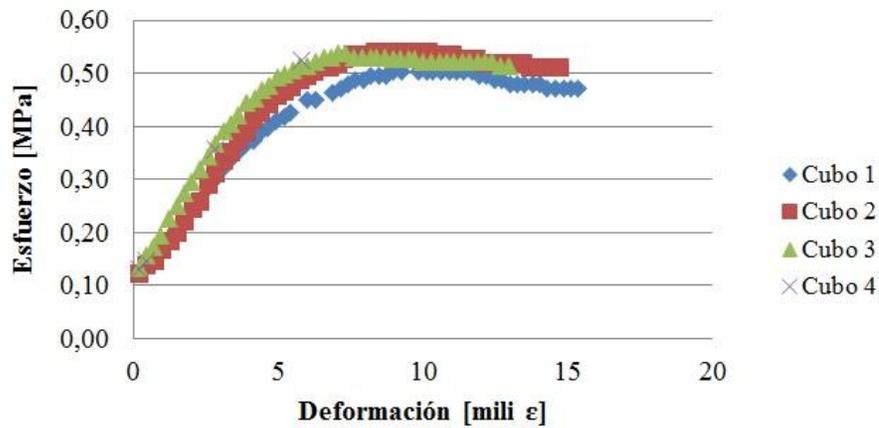


Figura 5.62. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 12 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

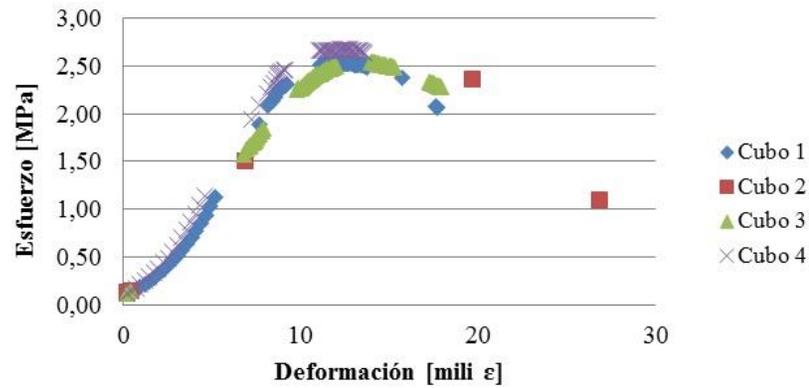


Figura 5.63. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 16 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

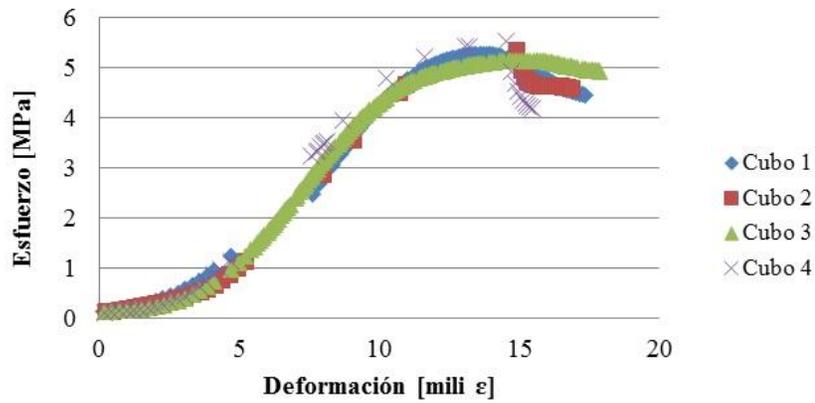


Figura 5.64. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 20 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

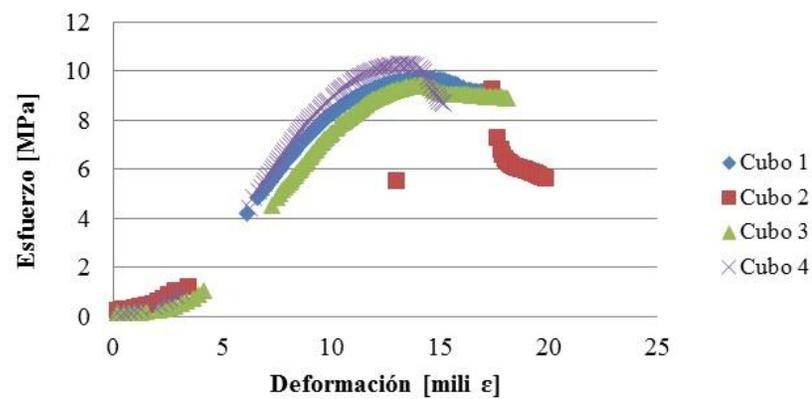


Figura 5.65. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 24 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

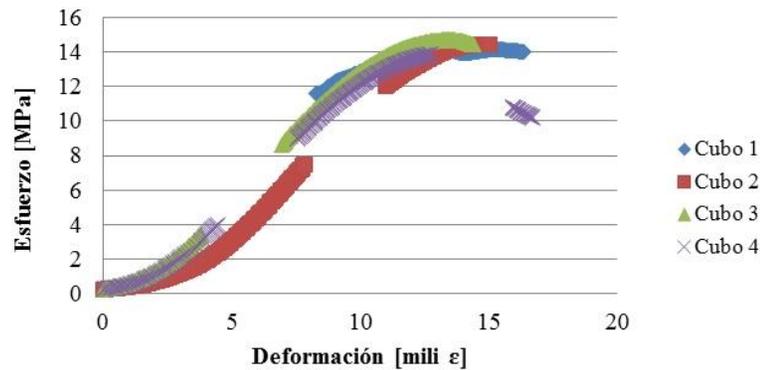


Figura 5.66. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 48 horas a 100 °F y Presión Atmosférica.

En base a las gráficas obtenidas anteriormente, se calculó el módulo de Young y la energía necesaria para deformar cada uno de los especímenes cúbicos del sistema cementante 4A. A continuación se muestran los resultados calculados en la Tabla 5.21.

Tabla 5.21. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica.

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
12 horas						
1	3,21	3,19	0,06	0,0486	0,0537	0,0066
2	3,13			0,0513		
3	3,24			0,0611		
4	-			-		
16 horas						
1	17,10	18,99	2,01	0,2304	0,2533	0,0335
2	-			-		
3	21,10			0,2377		
4	18,76			0,2918		
20 horas						
1	35,30	38,89	2,65	0,7344	0,6439	0,0648
2	39,20			0,6308		
3	39,37			0,6303		
4	41,71			0,5802		

Tabla 5.21. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 100 °F y Presión Atmosférica. (Continuación)

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
24 horas						
1	71,99	67,65	5,02	0,7344	1,0004	0,2332
2	-			-		
3	62,15			1,0972		
4	68,80			1,1695		
48 horas						
1	87,27	95,17	8,37	1,0007	1,4281	0,3004
2	99,11			1,6831		
3	105,02			1,5785		
4	89,26			1,4501		

5.2.9. Sistema 4B: Cemento Clase H + Aditivos + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica

Es necesario determinar los tiempos de curado viables para la prueba de resistencia a la compresión, es por ello, que se realiza primero el ensayo de tiempo de espesamiento a 140 °F y presión atmosférica.

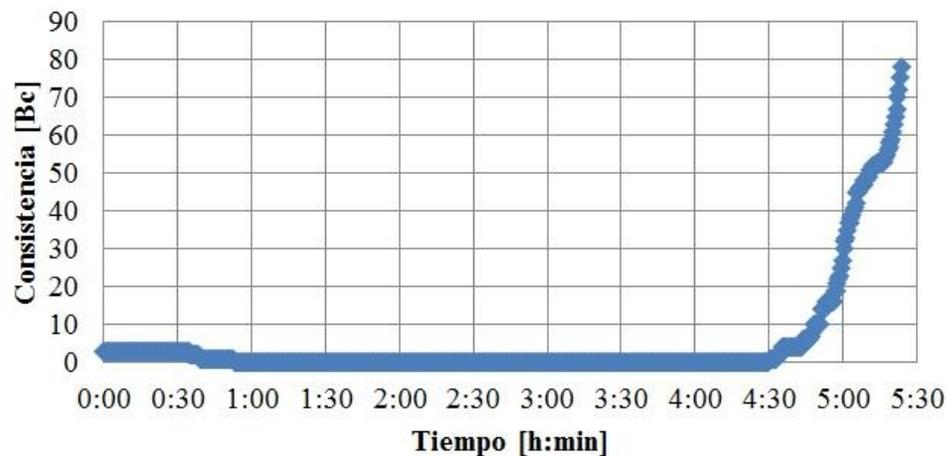


Figura 5.67. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.

En la Figura 5.67 se observa que el tiempo de espesamiento para el sistema 4B es de 5 h y 23 min, por lo tanto, los tiempos de curados viables para el ensayo de resistencia a la compresión son: 8, 12, 16, 20, 24 y 48 h.

Continuando con la evaluación de este sistema, en la Tabla 5.22 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión y su respectiva desviación estándar. Los especímenes curados por 8 h no estaban totalmente fraguados, presentaban consistencia líquida en la parte superior, por tanto, no se realizó el ensayo de resistencia a la compresión.

Tabla 5.22. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 140 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H + Aditivos.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
12 horas						
1	51,48	51,08	2630	447,791	447,822	3,749
2	50,93	50,86	2590	446,626		
3	50,61	50,94	2578	451,306		
4	50,82	50,92	2588	449,563		
16 horas						
1	50,67	50,83	2576	981,719	959,106	50,500
2	51,33	50,62	2598	990,925		
3	50,80	51,21	2601	883,695		
4	50,92	50,84	2589	980,086		
20 horas						
1	50,11	50,88	2550	1483,688	1461,440	39,420
2	50,18	51,10	2564	1493,338		
3	51,06	50,91	2599	1463,377		
4	50,99	50,94	2597	1405,354		
24 horas						
1	49,78	50,57	2517	1847,846	1854,416	26,142
2	50,01	50,59	2530	1833,734		
3	49,74	50,44	2509	1859,407		
4	49,94	50,54	2524	1886,676		

Tabla 5.22. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 140 °F y presión atmosférica para el Cemento Clase H + Aditivos. (Continuación)

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
48 horas						
1	50,68	50,91	2580	3096,054	3055,788	40,704
2	50,56	51,14	2586	3080,071		
3	51,13	50,97	2606	3005,128		
4	49,94	50,54	2524	3041,898		

En la Figura 5.68 se representa los valores promedios de la resistencia a la compresión a los diferentes tiempos de curado.

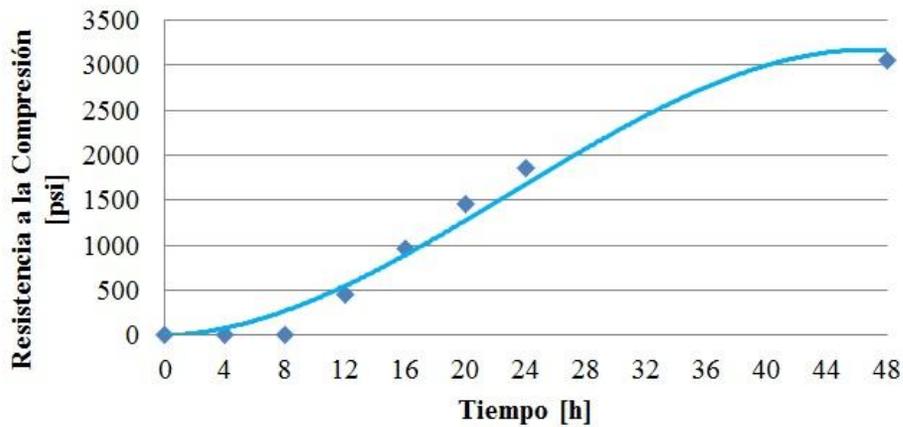


Figura 5.68. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.

En función de los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión, se graficaron los esfuerzos y deformaciones para cada uno de los especímenes cúbicos a los diferentes tiempos de curado, como se aprecia en las Figuras 5.69, 5.70, 5.71, 5.72 y 5.73.

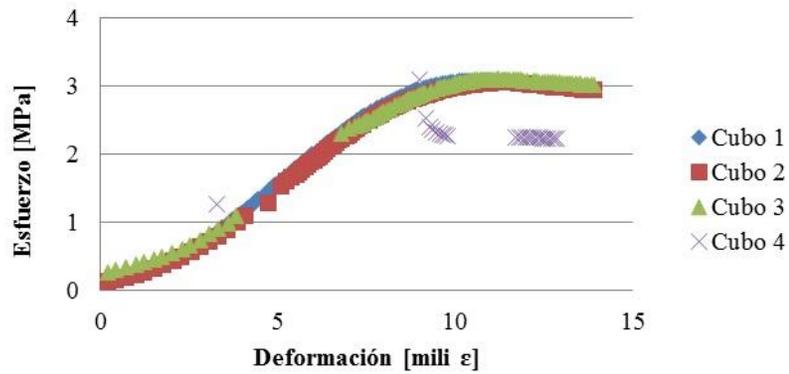


Figura 5.69. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 12 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

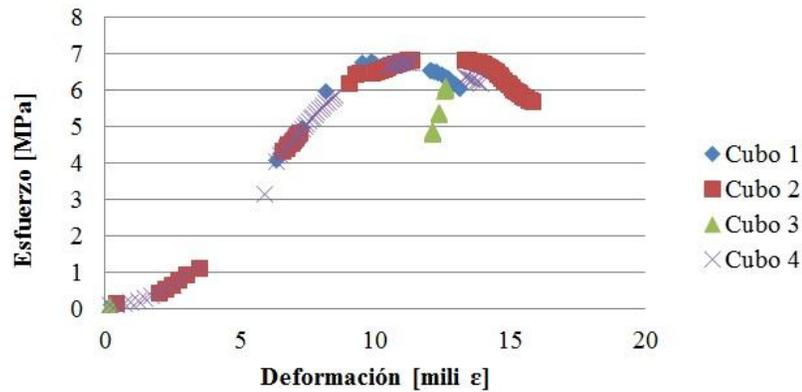


Figura 5.70. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 16 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

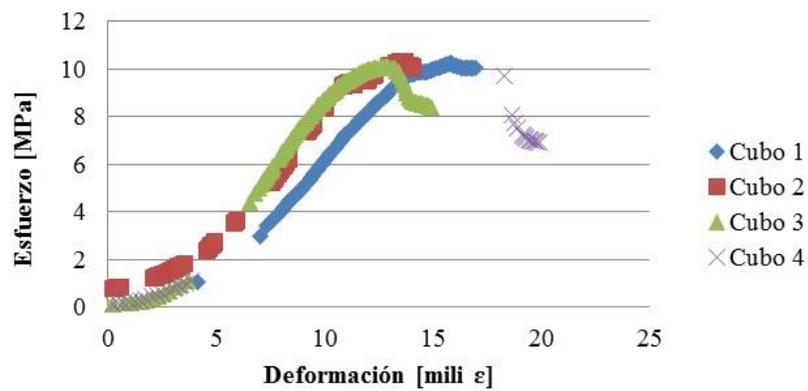


Figura 5.71. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 20 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

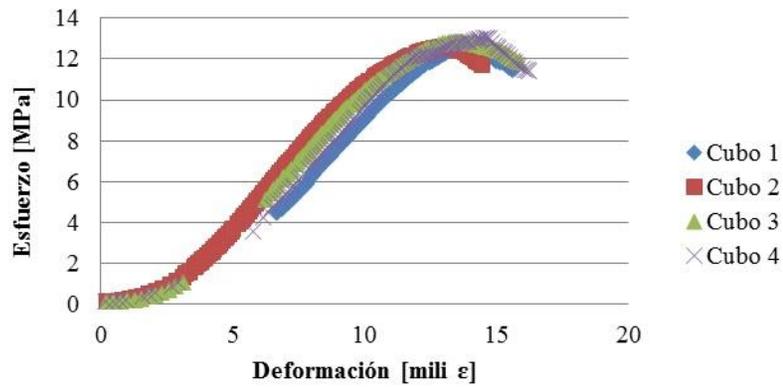


Figura 5.72. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 24 horas a 140 °F y Presión Atmosférica.

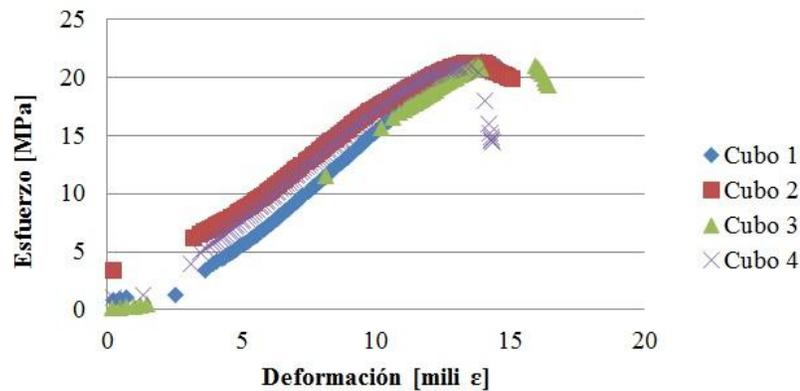


Figura 5.73. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 48 horas a 140 °F y Presión Atmosférica

En base a las gráficas obtenidas anteriormente, se calculó el módulo de Young y la energía necesaria para deformar cada uno de los especímenes cúbicos del sistema cementante 4B. A continuación se muestran los resultados calculados en la Tabla 5.23.

Tabla 5.23. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 140 °F y Presión Atmosférica.

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
12 horas						
1	18,02	17,82	0,66	0,4192	0,4112	0,0073
2	17,09			0,4048		
3	18,37			0,4095		
4	-			-		
16 horas						
1	35,67	37,48	1,55	0,8544	0,8393	0,0307
2	38,30			0,8040		
3	-			-		
4	38,40			0,8595		
20 horas						
1	76,40	68,10	8,26	0,9490	1,1630	0,1905
2	68,02			1,2257		
3	59,88			1,3142		
4	-			-		
24 horas						
1	81,07	83,27	3,99	1,4619	1,4381	0,0165
2	80,28			1,4249		
3	82,66			1,4362		
4	89,07			1,4295		
48 horas						
1	139,41	147,45	15,12	2,0396	1,9167	0,1341
2	166,57			1,8192		
3	132,06			2,0245		
4	151,75			1,7836		

5.2.10. Sistema 4C: Cemento Clase H + Aditivos + Agua. Curado a 168 °F y 3000 psi

Es necesario determinar los tiempos de curado viables para la prueba de resistencia a la compresión, es por ello, que se realiza primero el ensayo de tiempo de espesamiento a 168 °F y 3000 psi.

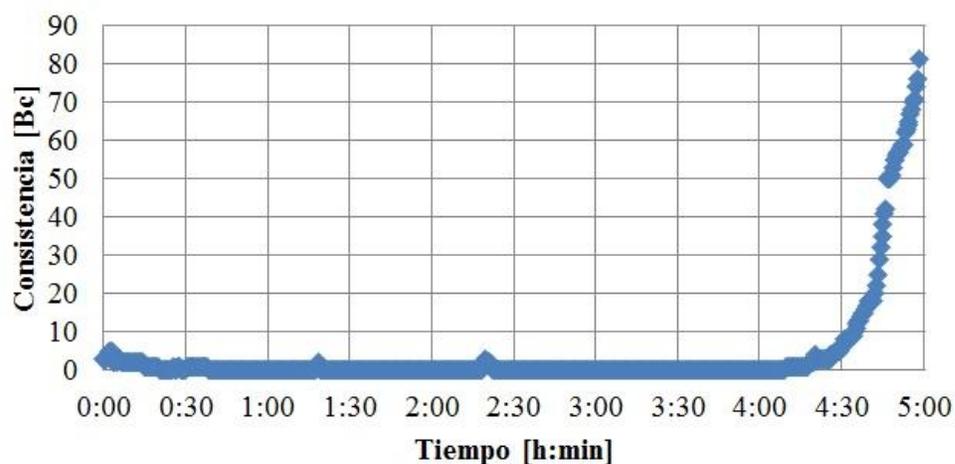


Figura 5.74. Tiempo de Espesamiento para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 168 °F y 3000 psi.

En la Figura 5.74 se observa que el tiempo de espesamiento para el sistema 4C es de 4 h y 57 min, por lo tanto, los tiempos de curados viables para el ensayo de resistencia a la compresión son: 8, 12, 16, 20, 24 y 48 h.

Continuando con la evaluación de este sistema, en la Tabla 5.24 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión y su respectiva desviación estándar.

Tabla 5.24. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 168 °F y 3000 psi para el Cemento Clase H + Aditivos.

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
8 horas						
1	51,40	51,36	2640	813,531	819,685	21,804
2	50,25	50,96	2561	838,626		
3	51,05	50,97	2602	791,521		
4	51,20	50,90	2606	835,061		

Tabla 5.24. Resistencia a la Compresión a una temperatura de 168 °F y 3000 psi para el Cemento Clase H + Aditivos. (Continuación)

Cubo	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	Área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]	Desviación Estándar
12 horas						
1	50,37	50,95	2566	957,830	944,553	22,842
2	50,11	50,91	2551	948,965		
3	50,75	50,90	2583	960,336		
4	51,01	51,05	2604	911,079		
16 horas						
1	51,02	51,09	2607	1784,054	1934,057	180,099
2	50,87	51,02	2595	1774,164		
3	50,52	51,04	2579	2060,424		
4	50,66	51,01	2584	2116,986		
20 horas						
1	51,16	51,09	2614	2522,546	2554,319	28,080
2	51,08	51,15	2613	2543,107		
3	50,01	51,00	2551	2588,188		
4	49,92	51,07	2549	2563,435		
24 horas						
1	50,98	50,94	2597	2973,918	2959,549	26,261
2	50,50	50,90	2570	2987,452		
3	50,40	51,07	2574	2982,209		
4	50,20	50,92	2556	2948,168		
48 horas						
1	50,84	50,97	2591	3113,651	3097,038	28,894
2	50,52	50,90	2571	3061,528		
3	50,16	51,08	2563	3086,623		
4	50,20	50,89	2555	3126,348		

En la Figura 5.75 se representa los valores promedios de la resistencia a la compresión a los diferentes tiempos de curado.

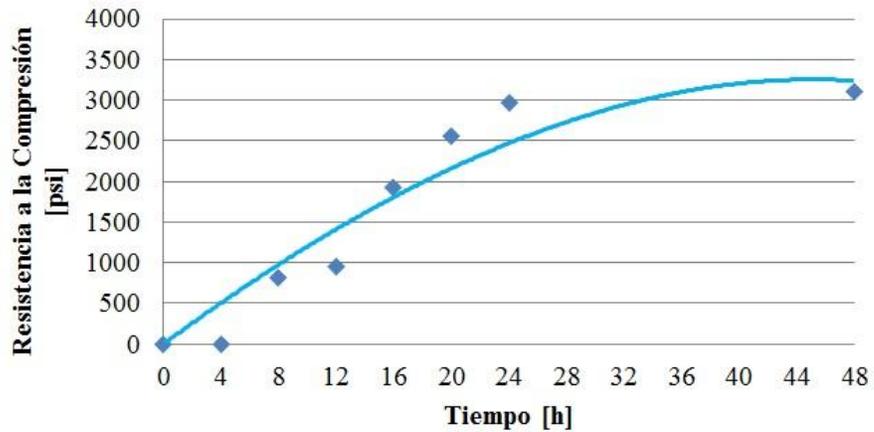


Figura 5.75. Resistencia a la Compresión en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 168 °F y 3000 psi.

En función de los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión, se graficaron los esfuerzos y deformaciones para cada uno de los especímenes cúbicos a los diferentes tiempos de curado, como se aprecia en las Figuras 5.76, 5.77, 5.78, 5.79, 5.80 y 5.81.

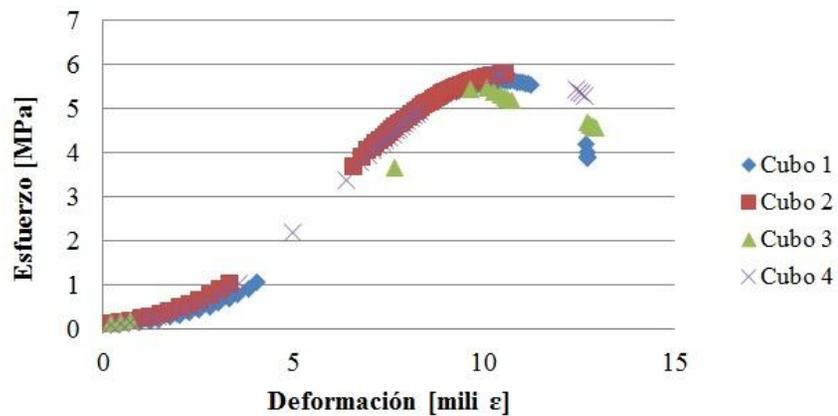


Figura 5.76. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados por 8 horas a 168 °F y 3000 psi.

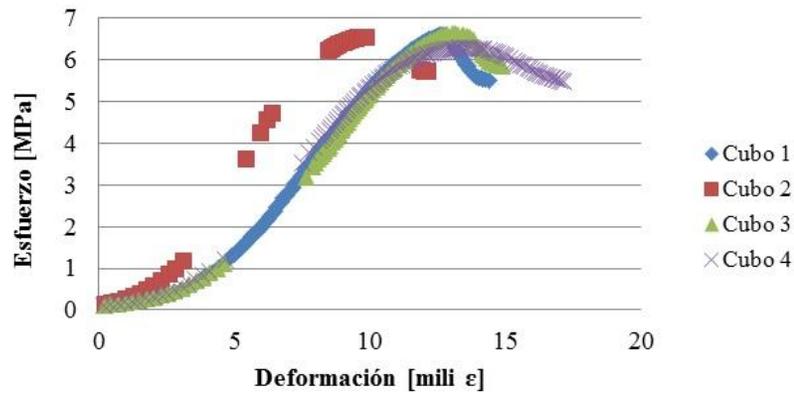


Figura 5.77. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos.
Curados por 12 horas a 168 °F y 3000 psi.

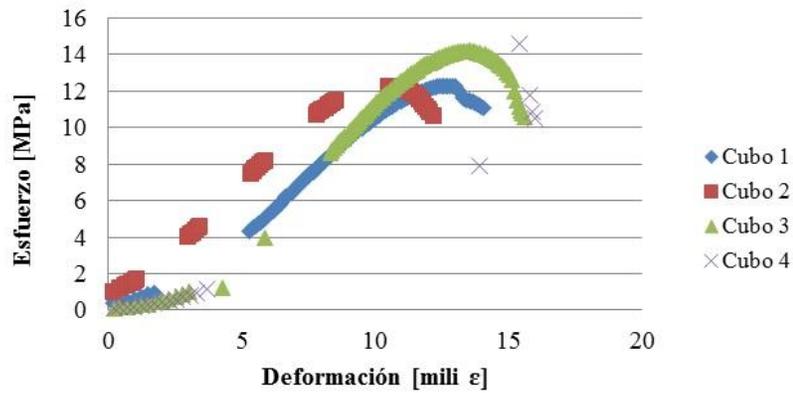


Figura 5.78. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos.
Curados por 16 horas a 168 °F y 3000 psi.

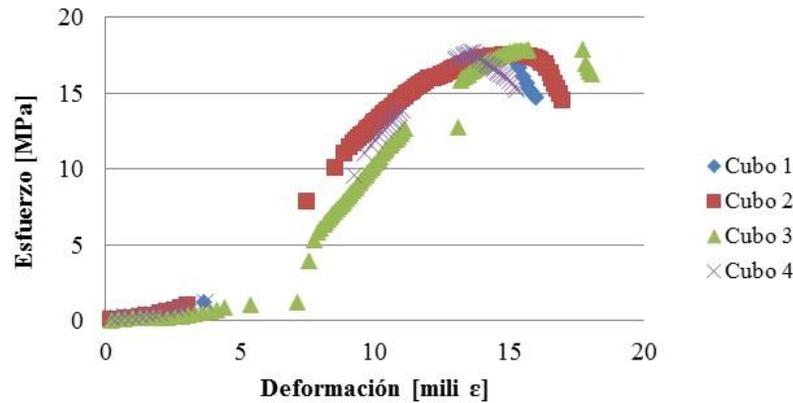


Figura 5.79. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos.
Curados por 20 horas a 168 °F y 3000 psi.

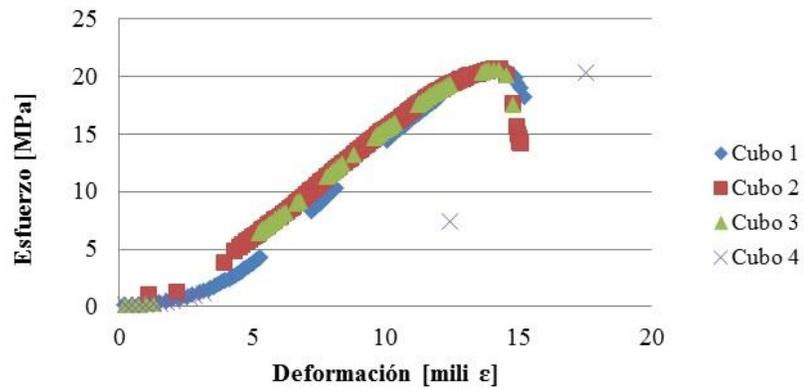


Figura 5.80. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos.
Curados por 24 horas a 168 °F y 3000 psi.

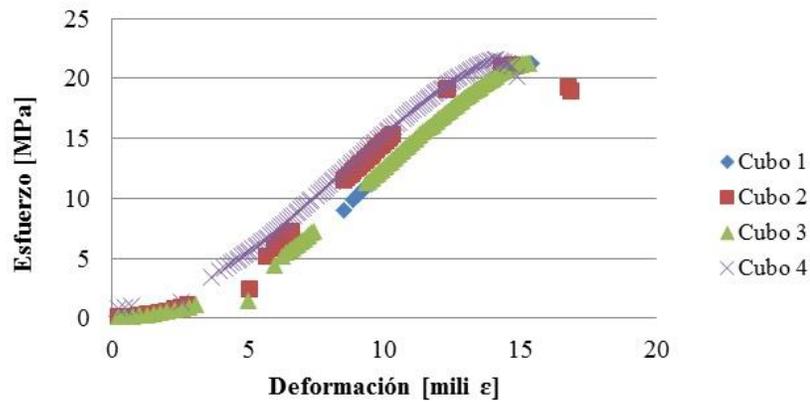


Figura 5.81. Curva de Esfuerzo – Deformación para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos.
Curados por 48 horas a 168 °F y 3000 psi.

En base a las gráficas obtenidas anteriormente, se calculó el módulo de Young y la energía necesaria para deformar cada uno de los especímenes cúbicos del sistema cementante 4C. A continuación se muestran los resultados calculados en la Tabla 5.25.

Tabla 5.25. Energía de Deformación y Módulo de Young para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curados a 168 °F y 3000 psi.

Cubo	Energía de Deformación [J]	Energía de Deformación Promedio [J]	Desviación Estándar	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Young Promedio [MPa]	Desviación Estándar
8 horas						
1	26,90	28,15	1,50	0,7115	0,7259	0,0233
2	29,81			0,7528		
3	-			-		
4	27,74			0,7135		
12 horas						
1	35,21	36,62	4,76	0,8471	0,8935	0,1859
2	31,18			1,1671		
3	37,53			0,8008		
4	42,59			0,7590		
16 horas						
1	115,62	92,26	21,12	1,3445	1,4340	0,1253
2	74,51			1,3802		
3	86,64			1,5772		
4	-			-		
20 horas						
1	-	114,03	17,38	-	1,8549	0,1788
2	130,14			1,7084		
3	116,33			2,0542		
4	95,61			1,8021		
24 horas						
1	129,96	140,59	9,28	2,2250	2,0344	0,1744
2	144,72			1,8829		
3	147,08			1,9953		
4	-			-		
48 horas						
1	145,08	140,93	3,53	2,0560	2,0850	0,0294
2	140,18			2,1224		
3	135,60			2,0680		
4	141,85			2,0935		

5.3.Evaluación de las Velocidades de Propagación de Ondas de los Sistemas Cementantes

La determinación de los módulos elásticos dinámicos de los diferentes sistemas cementantes se realiza a través del ensayo acústico no destructivo, mediante el comportamiento de las velocidades de propagación de ondas. A continuación se presentan los resultados y el análisis para cada sistema bajo las condiciones de temperatura y presión expuestas anteriormente.

5.3.1. Sistema 1A: Cemento Clase G + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica

El equipo utilizado para el ensayo acústico permite registrar las velocidades de onda P y S cada 30 s, sin embargo se registran los resultados obtenidos cada 4 h hasta completar las 48 h para su análisis. En la Tabla 5.26 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo acústico para el sistema 1A: relación de Poisson (ν), módulo de Young (E), módulo de Bulk (K) y resistencia a la compresión (RC).

Tabla 5.26. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase G. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	V _P [pulg/ μ s]	V _S [pulg/ μ s]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	RC [psi]
0	0,0405	-	-	-	-	0
4	0,0713	-	-	-	-	253
8	0,0961	-	-	-	-	960
12	0,1047	0,0528	0,33	9,0666	8,8322	1391
16	0,1100	0,0564	0,32	10,2801	9,5975	1721
20	0,1136	0,0590	0,32	11,1764	10,0870	1971
24	0,1161	0,0608	0,31	11,8452	10,4525	2169
48	0,1240	0,0656	0,31	13,7344	11,7762	2864

En función de las velocidades de propagación de ondas P y S se calcularon: la relación de Poisson (ν), el módulo de Young (E) y el módulo de Bulk (K). Al compararlas con las obtenidas en el equipo (Tabla 5.26), se observa que las mismas

son muy similares a las calculadas en la Tabla 5.27. Asimismo, se calcularon las restantes constantes elásticas con las relaciones de la Tabla 2.1: primera constante de Lamé (λ) y módulo de corte (μ), como se aprecia en la Tabla 5.27.

Tabla 5.27. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase G. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	λ [GPa]	μ [GPa]
0	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
12	0,3289	9,0672	8,8330	6,5586	3,4115
16	0,3215	10,2776	9,5944	7,0020	3,8887
20	0,3154	11,1742	10,0882	7,2566	4,2475
24	0,3112	11,8442	10,4547	7,4436	4,5166
48	0,3056	13,7343	11,7752	8,2687	5,2598

En base a los resultados obtenidos en el ensayo acústico, se graficaron los módulos elásticos en función del tiempo, como se aprecia en la Figura 5.82.

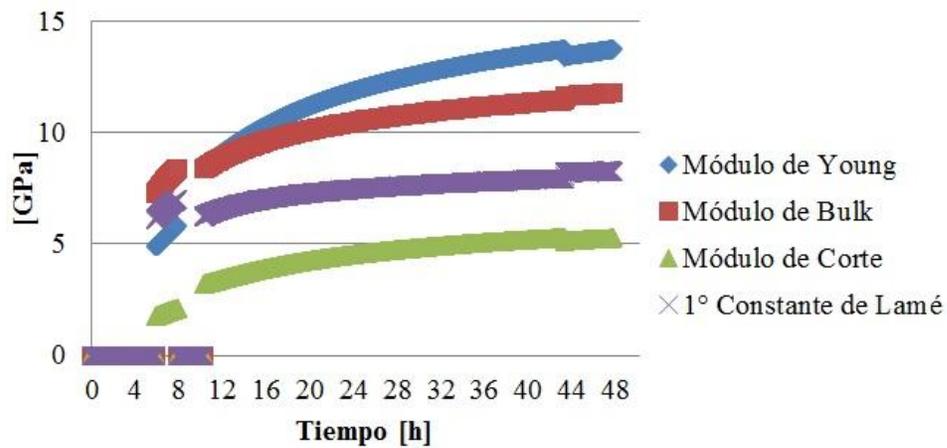


Figura 5.82. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.

5.3.2. Sistema 1B: Cemento Clase G + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica

El equipo utilizado para el ensayo acústico permite registrar las velocidades de onda P y S cada 30 s, sin embargo se registran los resultados obtenidos cada 4 h hasta completar las 48 h para su análisis. En la Tabla 5.28 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo acústico para el sistema 1B: relación de Poisson (ν), módulo de Young (E), módulo de Bulk (K) y resistencia a la compresión (RC).

Tabla 5.28. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase G. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	V _P [pulg/μs]	V _S [pulg/μs]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	RC [psi]
0	0,0434	-	-	-	-	0
4	0,0626	-	-	-	-	126
8	0,0858	-	-	-	-	577
12	0,1055	-	-	-	-	1431
16	0,1129	0,0435	0,41	6,5224	12,4933	1914
20	0,1171	0,0454	0,41	7,0947	13,3965	2236
24	0,1203	0,0466	0,41	7,5015	14,1274	2506
48	0,1294	0,0503	0,41	8,7357	16,3199	3414

En función de las velocidades de propagación de ondas P y S se calcularon: la relación de Poisson (ν), el módulo de Young (E) y el módulo de Bulk (K). Al compararlas con las obtenidas en el equipo (Tabla 5.28), se observa que las mismas son muy similares a las calculadas en la Tabla 5.29. Asimismo, se calcularon las restantes constantes elásticas con las relaciones de la Tabla 2.1: primera constante de Lamé (λ) y módulo de corte (μ), como se aprecia en la Tabla 5.29.

Tabla 5.29. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase G. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	λ [GPa]	μ [GPa]
0	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-
16	0,4130	6,5222	12,4898	10,9511	2,3080
20	0,4117	7,0939	13,3941	11,7191	2,5125
24	0,4115	7,5006	14,1240	12,3527	2,6570
48	0,4108	8,7370	16,3184	14,2541	3,0965

En base a los resultados obtenidos en el ensayo acústico, se graficaron los módulos elásticos en función del tiempo, como se aprecia en la Figura 5.83.

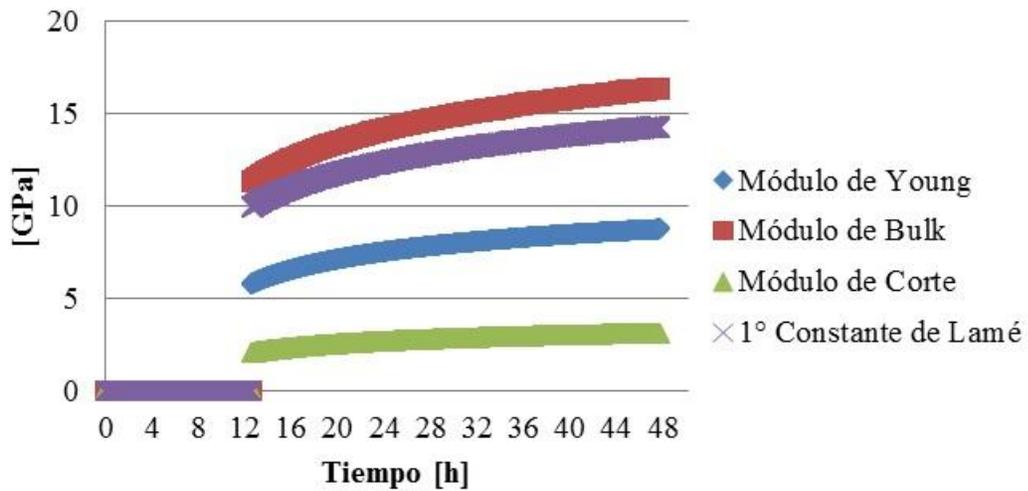


Figura 5.83. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.

5.3.3. Sistema 2A: Cemento Clase H + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica

El equipo utilizado para el ensayo acústico permite registrar las velocidades de onda P y S cada 30 s, sin embargo se registran los resultados obtenidos cada 4 h hasta completar las 48 h para su análisis. En la Tabla 5.30 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo acústico para el sistema 2A: relación de Poisson (ν), módulo de Young (E), módulo de Bulk (K) y resistencia a la compresión (RC).

Tabla 5.30. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase H. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	V _P [pulg/μs]	V _S [pulg/μs]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	RC [psi]
0	0,0529	-	-	-	-	0
4	0,0650	-	-	-	-	109
8	0,0836	-	-	-	-	469
12	0,0995	-	-	-	-	1068
16	0,1135	0,0594	0,31	11,7969	10,4525	1918
20	0,1195	0,0641	0,30	13,6034	11,2316	2396
24	0,1226	0,0666	0,29	14,5962	11,6521	2679
48	0,1319	0,0738	0,27	17,6782	12,9484	3665

En función de las velocidades de propagación de ondas P y S se calcularon: la relación de Poisson (ν), el módulo de Young (E) y el módulo de Bulk (K). Al compararlas con las obtenidas en el equipo (Tabla 5.30), se observa que las mismas son muy similares a las calculadas en la Tabla 5.31. Asimismo, se calcularon las restantes constantes elásticas con las relaciones de la Tabla 2.1: primera constante de Lamé (λ) y módulo de corte (μ), como se aprecia en la Tabla 5.31.

Tabla 5.31. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase H. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	λ [GPa]	μ [GPa]
0	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-
16	0,3119	11,7973	10,4504	7,4528	4,4964
20	0,2981	13,6044	11,2295	7,7361	5,2402
24	0,2912	14,5952	11,6493	7,8814	5,6519
48	0,2724	17,6754	12,9460	8,3157	6,9454

En base a los resultados obtenidos en el ensayo acústico, se graficaron los módulos elásticos en función del tiempo, como se aprecia en la Figura 5.84.

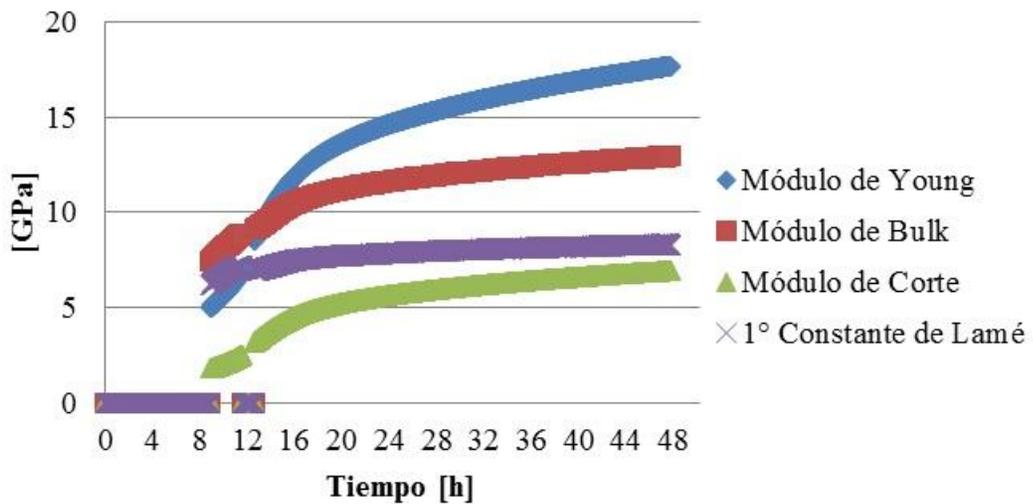


Figura 5.84. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.

5.3.4. Sistema 2B: Cemento Clase H + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica

El equipo utilizado para el ensayo acústico permite registrar las velocidades de onda P y S cada 30 s, sin embargo se registran los resultados obtenidos cada 4 h hasta completar las 48 h para su análisis. En la Tabla 5.32 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo acústico para el sistema 2B: relación de Poisson (ν), módulo de Young (E), módulo de Bulk (K) y resistencia a la compresión (RC).

Tabla 5.32. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase H. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	V_P [pulg/ μ s]	V_S [pulg/ μ s]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	RC [psi]
0	-	-	-	-	-	0
4	0,0699	-	-	-	-	151
8	0,1074	0,0559	0,31	10,4869	9,3907	1473
12	0,1156	0,0619	0,30	12,6864	10,5490	2050
16	0,1205	0,0655	0,29	14,1205	11,2316	2457
20	0,1240	0,0680	0,28	15,1754	11,7487	2785
24	0,1267	0,0700	0,28	16,0027	12,1348	3050
48	0,1350	0,0758	0,27	18,6227	13,4724	4013

En función de las velocidades de propagación de ondas P y S se calcularon: la relación de Poisson (ν), el módulo de Young (E) y el módulo de Bulk (K). Al compararlas con las obtenidas en el equipo (Tabla 5.32), se observa que las mismas son muy similares a las calculadas en la Tabla 5.33. Asimismo, se calcularon las restantes constantes elásticas con las relaciones de la Tabla 2.1: primera constante de Lamé (λ) y módulo de corte (μ), como se aprecia en la Tabla 5.33.

Tabla 5.33. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase H. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	λ [GPa]	μ [GPa]
0	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
8	0,3139	10,4859	9,3897	6,7294	3,9904
12	0,2996	12,6879	10,5512	7,2968	4,8815
16	0,2904	14,1205	11,2301	7,5826	5,4712
20	0,2847	15,1750	11,7457	7,8082	5,9062
24	0,2802	16,0004	12,1323	7,9661	6,2492
48	0,2695	18,6248	13,4696	8,5794	7,3352

En base a los resultados obtenidos en el ensayo acústico, se graficaron los módulos elásticos en función del tiempo, como se aprecia en la Figura 5.85.

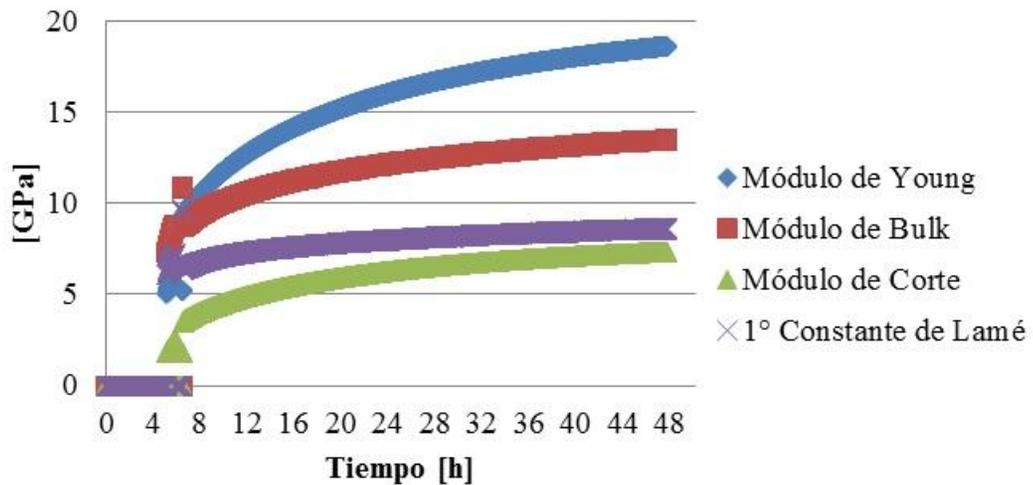


Figura 5.85. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.

5.3.5. Sistema 3A: Cemento Clase G + Aditivos + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica

El equipo utilizado para el ensayo acústico permite registrar las velocidades de onda P y S cada 30 s, sin embargo se registran los resultados obtenidos cada 4 h hasta completar las 48 h para su análisis. En la Tabla 5.34 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo acústico para el sistema 3A: relación de Poisson (ν), módulo de Young (E), módulo de Bulk (K) y resistencia a la compresión (RC).

Tabla 5.34. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	V _P [pulg/μs]	V _S [pulg/μs]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	RC [psi]
0	-	-	-	-	-	0
4	0,0447	-	-	-	-	12
8	0,0641	-	-	-	-	150
12	0,0823	-	-	-	-	484
16	0,0929	0,0425	0,37	5,9640	7,5084	929
20	0,0989	-	-	-	-	1090
24	0,1030	0,0393	0,41	5,2607	10,3215	1297
48	0,1153	0,0618	0,30	11,9486	9,9147	2105

En función de las velocidades de propagación de ondas P y S se calcularon: la relación de Poisson (ν), el módulo de Young (E) y el módulo de Bulk (K). Al compararlas con las obtenidas en el equipo (Tabla 5.34), se observa que las mismas son muy similares a las calculadas en la Tabla 5.35. Asimismo, se calcularon las restantes constantes elásticas con las relaciones de la Tabla 2.1: primera constante de Lamé (λ) y módulo de corte (μ), como se aprecia en la Tabla 5.35.

Tabla 5.35. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	λ [GPa]	μ [GPa]
0	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-
16	0,3676	5,9638	7,5754	6,0517	2,1804
20	-	-	-	-	-
24	0,4150	5,2635	10,3191	9,0792	1,8599
48	0,2991	11,9496	9,9114	6,8452	4,5993

En base a los resultados obtenidos en el ensayo acústico, se graficaron los módulos elásticos en función del tiempo, como se aprecia en la Figura 5.86.

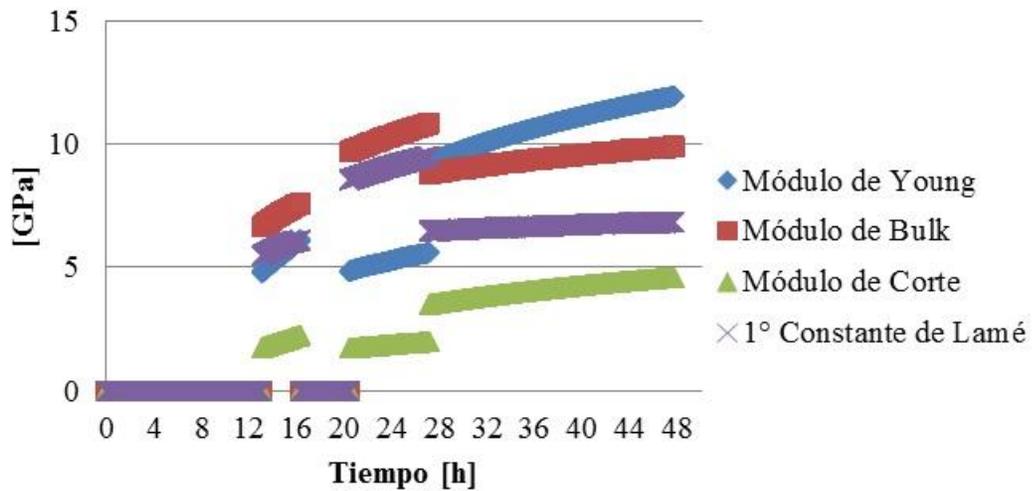


Figura 5.86. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.

5.3.6. Sistema 3B: Cemento Clase G + Aditivos + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica

El equipo utilizado para el ensayo acústico permite registrar las velocidades de onda P y S cada 30 s, sin embargo se registran los resultados obtenidos cada 4 h hasta completar las 48 h para su análisis. En la Tabla 5.36 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo acústico para el sistema 3B: relación de Poisson (ν), módulo de Young (E), módulo de Bulk (K) y resistencia a la compresión (RC).

Tabla 5.36. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	V _P [pulg/ μ s]	V _S [pulg/ μ s]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	RC [psi]
0	0,0598	-	-	-	-	0
4	0,0608	-	-	-	-	10
8	0,0822	-	-	-	-	378
12	0,0928	0,0397	0,39	5,2676	7,8462	718
16	0,0994	-	-	-	-	1008
20	0,1039	0,0379	0,42	4,9435	10,7076	1243
24	0,1071	0,0543	0,33	9,4320	9,1011	1430
48	0,1179	0,0623	0,31	12,2382	10,5214	2206

En función de las velocidades de propagación de ondas P y S se calcularon: la relación de Poisson (ν), el módulo de Young (E) y el módulo de Bulk (K). Al compararlas con las obtenidas en el equipo (Tabla 5.36), se observa que las mismas son muy similares a las calculadas en la Tabla 5.37. Asimismo, se calcularon las restantes constantes elásticas con las relaciones de la Tabla 2.1: primera constante de Lamé (λ) y módulo de corte (μ), como se aprecia en la Tabla 5.37.

Tabla 5.37. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	λ [GPa]	μ [GPa]
0	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
12	0,3881	5,2677	7,8461	6,5811	1,8974
16	-	-	-	-	-
20	0,4231	4,9411	10,7115	9,5541	1,7360
24	0,3273	9,4311	9,0993	6,7307	3,5529
48	0,3061	12,2368	10,5169	7,3939	4,6845

En base a los resultados obtenidos en el ensayo acústico, se graficaron los módulos elásticos en función del tiempo, como se aprecia en la Figura 5.87.

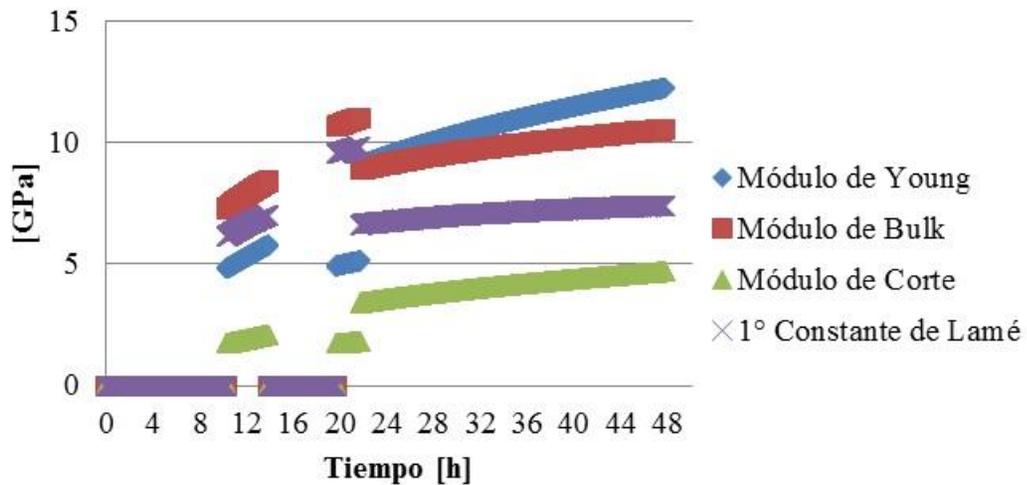


Figura 5.87. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.

5.3.7. Sistema 3C: Cemento Clase G + Aditivos + Agua. Curado a 168 °F y 3000 psi

El equipo utilizado para el ensayo acústico permite registrar las velocidades de onda P y S cada 30 s, sin embargo se registran los resultados obtenidos cada 4 h hasta completar las 48 h para su análisis. En la Tabla 5.38 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo acústico para el sistema 3C: relación de Poisson (ν), módulo de Young (E), módulo de Bulk (K) y resistencia a la compresión (RC).

Tabla 5.38. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 168 °F y 3000 psi.

Tiempo [h]	V _P [pulg/μs]	V _S [pulg/μs]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	RC [psi]
0	0,0605	-	-	-	-	0
4	0,0735	-	-	-	-	178
8	0,1012	-	-	-	-	1090
12	0,1102	0,0579	0,31	10,5903	9,2597	1623
16	0,1147	0,0610	0,30	11,6935	9,8871	1944
20	0,1176	0,0629	0,30	12,3968	10,3146	2171
24	0,1193	0,0636	0,30	12,6864	10,6731	2318
48	0,1247	0,0677	0,29	14,2584	11,3832	2815

En función de las velocidades de propagación de ondas P y S se calcularon: la relación de Poisson (ν), el módulo de Young (E) y el módulo de Bulk (K). Al compararlas con las obtenidas en el equipo (Tabla 5.38), se observa que las mismas son muy similares a las calculadas en la Tabla 5.39. Asimismo, se calcularon las restantes constantes elásticas con las relaciones de la Tabla 2.1: primera constante de Lamé (λ) y módulo de corte (μ), como se aprecia en la Tabla 5.39.

Tabla 5.39. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 168 °F y 3000 psi.

Tiempo [h]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	λ [GPa]	μ [GPa]
0	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
12	0,3094	10,5925	9,2602	6,5636	4,0449
16	0,3028	11,6935	9,8840	6,8921	4,4878
20	0,2995	12,3985	10,3080	7,1277	4,7704
24	0,3019	12,6843	10,6699	7,4222	4,8716
48	0,2912	14,2590	11,3832	7,7022	5,5215

En base a los resultados obtenidos en el ensayo acústico, se graficaron los módulos elásticos en función del tiempo, como se aprecia en la Figura 5.88.

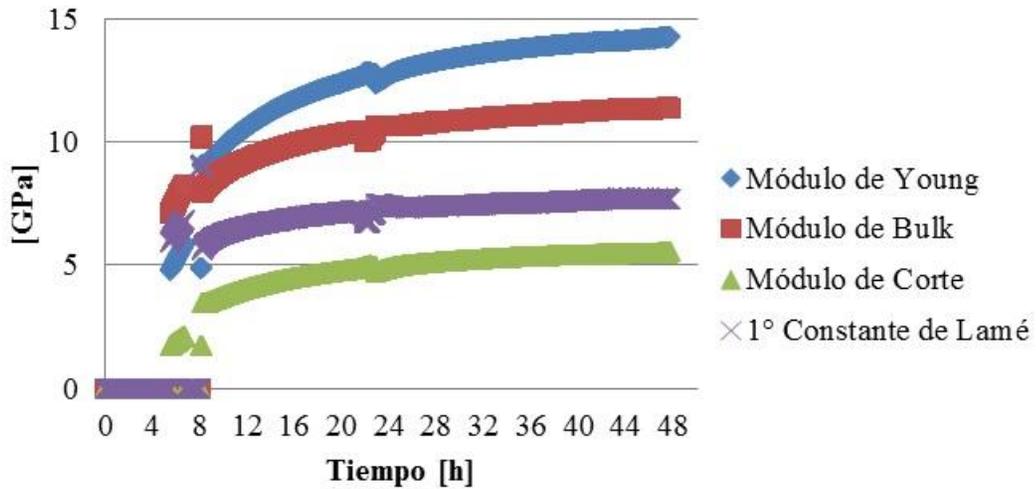


Figura 5.88. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase G + Aditivos. Curada a 168 °F y 3000 psi.

5.3.8. Sistema 4A: Cemento Clase H + Aditivos + Agua. Curado a 100 °F y Presión Atmosférica

El equipo utilizado para el ensayo acústico permite registrar las velocidades de onda P y S cada 30 s, sin embargo se registran los resultados obtenidos cada 4 h hasta completar las 48 h para su análisis. En la Tabla 5.40 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo acústico para el sistema 4A: relación de Poisson (ν), módulo de Young (E), módulo de Bulk (K) y resistencia a la compresión (RC).

Tabla 5.40. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	V _P [pulg/ μ s]	V _S [pulg/ μ s]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	RC [psi]
0	-	-	-	-	-	0
4	0,0605	-	-	-	-	33
8	0,0604	-	-	-	-	33
12	0,0666	-	-	-	-	104
16	0,0783	-	-	-	-	308
20	0,0907	0,0391	0,39	5,1228	7,4532	667
24	0,0986	0,0458	0,36	6,9017	8,3427	995
48	0,1108	0,0565	0,32	10,1973	9,6802	1696

En función de las velocidades de propagación de ondas P y S se calcularon: la relación de Poisson (ν), el módulo de Young (E) y el módulo de Bulk (K). Al compararlas con las obtenidas en el equipo (Tabla 5.40), se observa que las mismas son muy similares a las calculadas en la Tabla 5.41. Asimismo, se calcularon las restantes constantes elásticas con las relaciones de la Tabla 2.1: primera constante de Lamé (λ) y módulo de corte (μ), como se aprecia en la Tabla 5.41.

Tabla 5.41. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	λ [GPa]	μ [GPa]
0	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-
20	0,3854	5,1213	7,4502	6,2180	1,8483
24	0,3622	6,9001	8,3430	6,6545	2,5328
48	0,3244	10,1954	9,6777	7,1117	3,8490

En base a los resultados obtenidos en el ensayo acústico, se graficaron los módulos elásticos en función del tiempo, como se aprecia en la Figura 5.89.

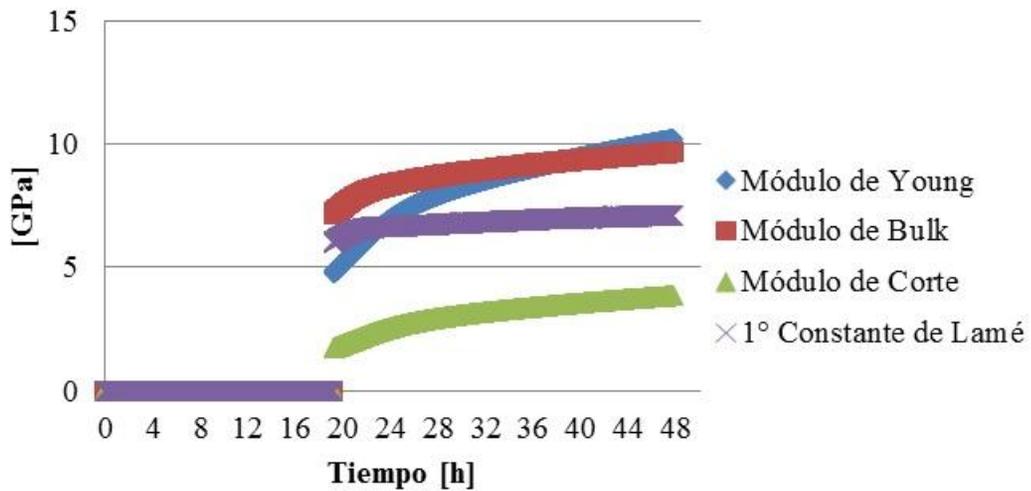


Figura 5.89. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 100 °F y Presión Atmosférica.

5.3.9. Sistema 4B: Cemento Clase H + Aditivos + Agua. Curado a 140 °F y Presión Atmosférica

El equipo utilizado para el ensayo acústico permite registrar las velocidades de onda P y S cada 30 s, sin embargo se registran los resultados obtenidos cada 4 h hasta completar las 48 h para su análisis. En la Tabla 5.42 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo acústico para el sistema 4B: relación de Poisson (ν), módulo de Young (E), módulo de Bulk (K) y resistencia a la compresión (RC).

Tabla 5.42. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	V _P [pulg/ μ s]	V _S [pulg/ μ s]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	RC [psi]
0	-	-	-	-	-	0
4	0,0625	-	-	-	-	55
8	0,0860	-	-	-	-	515
12	0,0955	0,0405	0,39	5,4951	8,3633	858
16	0,1010	-	-	-	-	1113
20	0,1048	0,0541	0,32	9,3217	8,5357	1321
24	0,1081	0,0558	0,32	9,8940	9,1011	1521
48	0,1175	0,0622	0,31	12,1692	10,4318	2198

En función de las velocidades de propagación de ondas P y S se calcularon: la relación de Poisson (ν), el módulo de Young (E) y el módulo de Bulk (K). Al compararlas con las obtenidas en el equipo (Tabla 5.42), se observa que las mismas son muy similares a las calculadas en la Tabla 5.43. Asimismo, se calcularon las restantes constantes elásticas con las relaciones de la Tabla 2.1: primera constante de Lamé (λ) y módulo de corte (μ), como se aprecia en la Tabla 5.43.

Tabla 5.43. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.

Tiempo [h]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	λ [GPa]	μ [GPa]
0	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
12	0,3905	5,4949	8,3671	7,0499	1,9758
16	-	-	-	-	-
20	0,3179	9,3202	8,5309	6,1736	3,5360
24	0,3189	9,8916	9,1009	6,6009	3,7501
48	0,3055	12,1689	10,4268	7,3197	4,6607

En base a los resultados obtenidos en el ensayo acústico, se graficaron los módulos elásticos en función del tiempo, como se aprecia en la Figura 5.90.

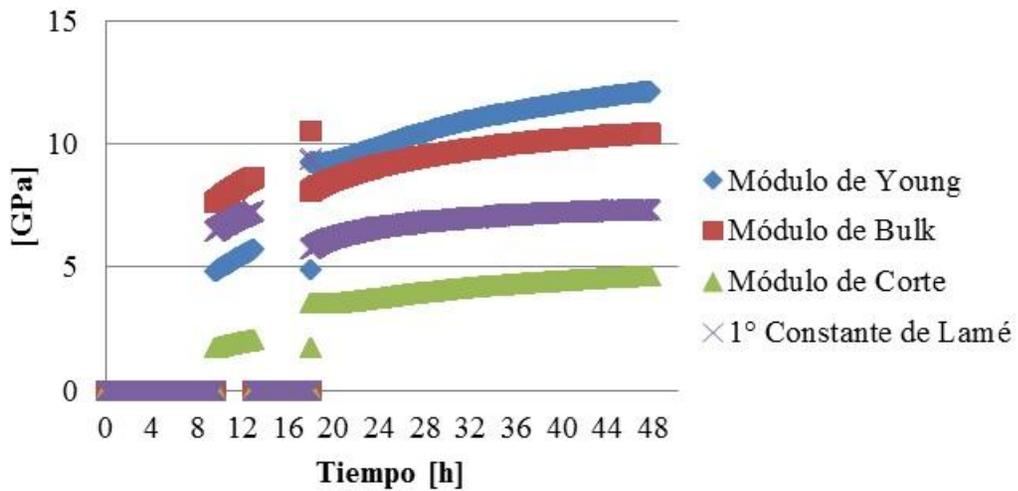


Figura 5.90. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 140 °F y Presión Atmosférica.

5.3.10. Sistema 4C: Cemento Clase H + Aditivos + Agua. Curado a 168 °F y 3000 psi

El equipo utilizado para el ensayo acústico permite registrar las velocidades de onda P y S cada 30 s, sin embargo se registran los resultados obtenidos cada 4 h hasta completar las 48 h para su análisis. En la Tabla 5.44 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo acústico para el sistema 4C: relación de Poisson (ν), módulo de Young (E), módulo de Bulk (K) y resistencia a la compresión (RC).

Tabla 5.44. Constantes Elásticas Registradas por el Equipo M-Pro para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 168 °F y 3000 psi.

Tiempo [h]	V _P [pulg/ μ s]	V _S [pulg/ μ s]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	RC [psi]
0	0,0572	-	-	-	-	0
4	0,0620	-	-	-	-	45
8	0,0732	-	-	-	-	201
12	0,0928	0,0402	0,38	5,3917	7,7773	741
16	0,1005	-	-	-	-	1086
20	0,1055	0,0536	0,33	9,1976	8,8046	1356
24	0,1090	0,0562	0,32	10,0595	9,2390	1570
48	0,1188	0,0636	0,30	12,6795	10,5352	2308

En función de las velocidades de propagación de ondas P y S se calcularon: la relación de Poisson (ν), el módulo de Young (E) y el módulo de Bulk (K). Al compararlas con las obtenidas en el equipo (Tabla 5.44), se observa que las mismas son muy similares a las calculadas en la Tabla 5.45. Asimismo, se calcularon las restantes constantes elásticas con las relaciones de la Tabla 2.1: primera constante de Lamé (λ) y módulo de corte (μ), como se aprecia en la Tabla 5.45.

Tabla 5.45. Constantes Elásticas Calculadas para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 168 °F y 3000 psi.

Tiempo [h]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	λ [GPa]	μ [GPa]
0	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
12	0,3845	5,3924	7,7793	6,4810	1,9175
16	-	-	-	-	-
20	0,3257	9,1994	8,7989	6,4859	3,4695
24	0,3185	10,0607	9,2361	6,6925	3,8153
48	0,2994	12,6775	10,5305	7,2782	4,8784

En base a los resultados obtenidos en el ensayo acústico, se graficaron los módulos elásticos en función del tiempo, como se aprecia en la Figura 5.91.

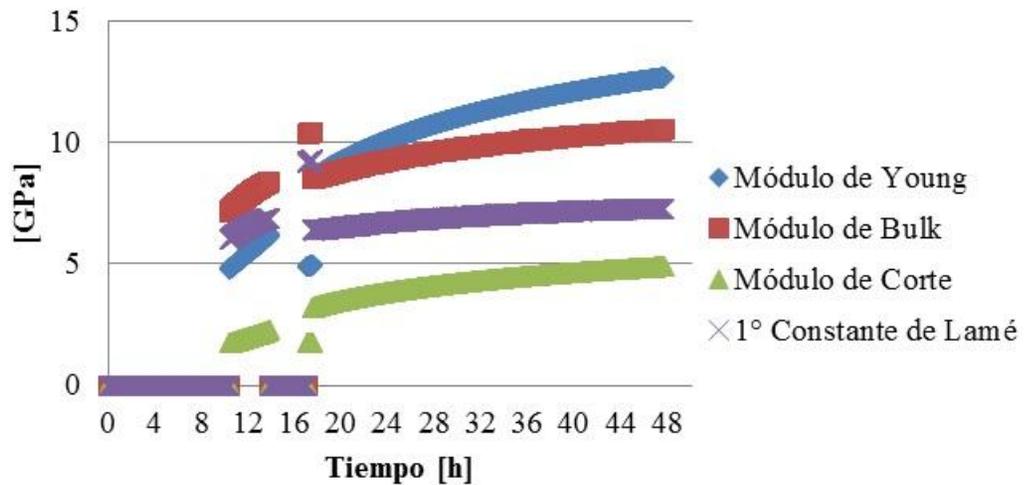


Figura 5.91. Constantes Elásticas Calculadas en función del Tiempo para la Lechada de Cemento Clase H + Aditivos. Curada a 168 °F y 3000 psi.

5.4. Evaluación de las Velocidades de Propagación de Ondas de la Formación

La determinación de los módulos elásticos dinámicos de la formación Carapita que atraviesa la perforación del pozo TRV-6X se realiza a través del ensayo acústico que es de tipo no destructivo, mediante el comportamiento de las velocidades de propagación de ondas.

En la Tabla 5.46 se presentan los resultados de las velocidades de propagación de ondas P y S para la profundidad donde la lechada va a ser utilizada, en función de ellas se calcularon: la relación de Poisson (ν), el módulo de Young (E), el módulo de Bulk (K), la primera constante de Lamé (λ) y módulo de corte (μ).

Tabla 5.46. Constantes Elásticas de la Formación para la Profundidad.

Prof. [pies]	V _P [m/s]	V _S [m/s]	ν [adim]	E [GPa]	K [GPa]	λ [GPa]	μ [GPa]
5900-6400	2909,14	1240,29	0,3889	7,9879	11,9858	10,0688	2,8756

5.5. Análisis de Resultados

Luego de exponer los resultados de los diferentes ensayos de laboratorio, tanto destructivos como no destructivos, se presentan a continuación los resultados de forma comparativa, con el fin de señalar cuál de los sistemas cementantes proporciona mejores propiedades elásticas tanto estáticas como dinámicas.

Se debe tener en cuenta que los sistemas cementantes se evaluaron bajo 3 condiciones: A (100 °F y presión atmosférica), B (140 °F y presión atmosférica) y C (168 °F y 3000 psi). En las gráficas subsiguientes la condición A se distingue con el color azul, la condición B con el color rosado y la condición C con el color morado.

5.5.1. Análisis de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico

En la Figura 5.92 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 4 horas durante el ensayo mecánico destructivo.

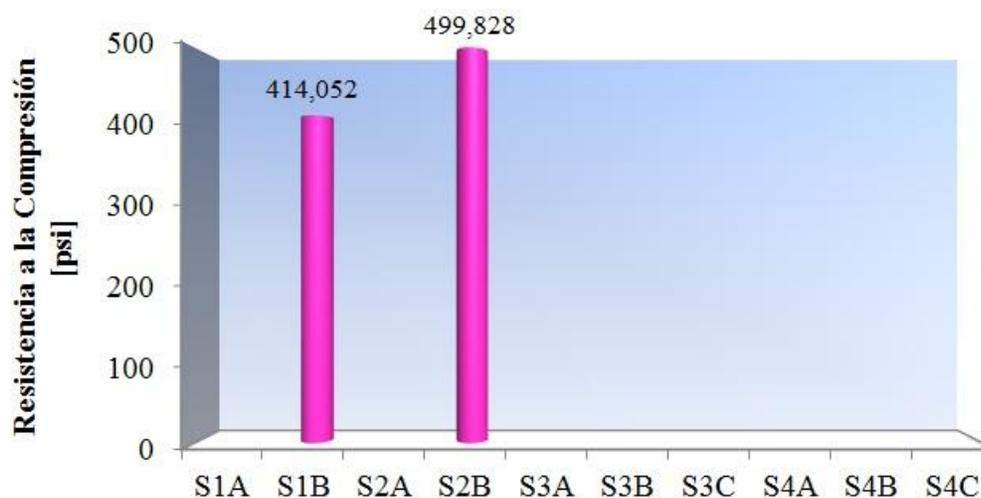


Figura 5.92. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 4 h.

No se aprecian resultados cuantificables de resistencia a la compresión en la Figura 5.92 para los sistemas 1A, 2A, 3A, 3B, 3C, 4A, 4B y 4C, ya que los especímenes cúbicos no estaban totalmente fraguados y por lo tanto, no se podía medir su resistencia. Sin embargo, este comportamiento era predecible, ya que en el ensayo de tiempo de espesamiento para cada uno de estos sistemas cementantes se había descartado realizar el ensayo para 4 h de curado. Asimismo, se puede acotar que los sistemas cementantes 3 y 4 están diseñados con aditivos entre los cuales está un retardador, lo que ocasiona un incremento del tiempo de espesamiento de la lechada y por tanto un retardo en el fraguado.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.92, se tiene que el sistema 2B presenta mayor resistencia que le sistema 1B, con lo que se puede inferir que bajo las mismas condiciones de temperatura (140 °F) y presión (1 atm), el cemento clase H tiene mejor comportamiento que el cemento clase G.

En la Figura 5.93 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 8 horas obtenidos durante el ensayo mecánico destructivo.

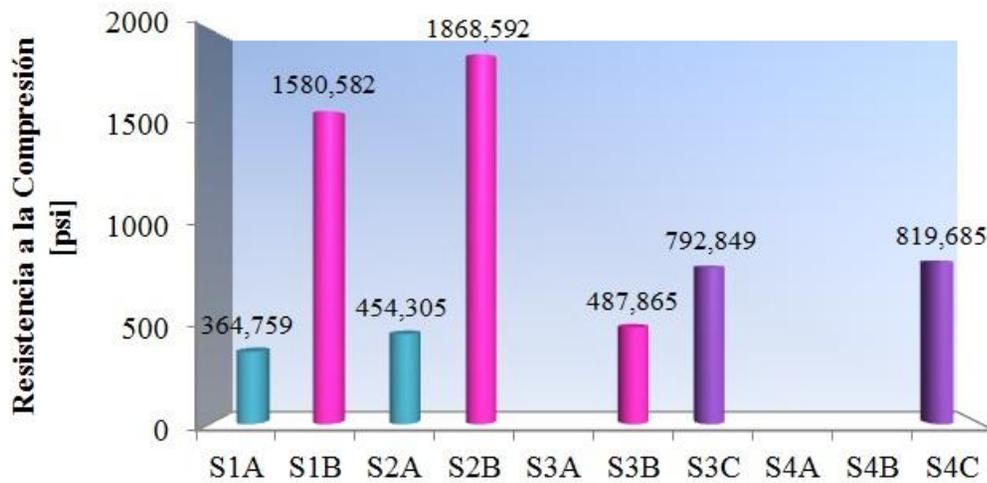


Figura 5.93. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.

No se aprecian resultados cuantificables de resistencia a la compresión en la Figura 5.93 para los sistemas 3A, 4A y 4B, ya que los especímenes cúbicos no estaban totalmente fraguados y por lo tanto, no se podía medir su resistencia. Asimismo, se puede acotar que los sistemas cementantes 3 y 4 están diseñados con aditivos entre los cuales está un retardador, lo que ocasiona un incremento del tiempo de espesamiento de la lechada y por tanto un retardo en el fraguado.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.93, se tiene que bajo la condición A el sistema 2 presenta mayor resistencia que el sistema 1, bajo la condición B nuevamente el sistema 2 presenta mayor resistencia que el sistema 1 y bajo la condición C el sistema 4 presenta mayor resistencia que el sistema 3. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 8 h las lechadas con cemento clase H, tanto pura como aditivada, presentan mejor comportamiento que las lechadas con cemento clase G, obteniéndose la mayor resistencia a la compresión en el sistema 2 bajo la condición B.

En la Figura 5.94 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 12 horas obtenidos durante el ensayo mecánico destructivo.



Figura 5.94. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.94, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor resistencia que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A, B y C el sistema 3 presenta mayor resistencia que el sistema 4. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 12 h las lechadas puras con cemento clase H presentan mejor comportamiento que las lechadas puras con cemento clase G, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado. El sistema 2 bajo la condición B sigue presentando la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.95 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 16 horas obtenidos durante el ensayo mecánico destructivo.



Figura 5.95. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.95, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor resistencia que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 3 presenta mayor resistencia que el sistema 4, no obstante, bajo la condición C el sistema 4 presenta mayor resistencia que el sistema 3. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 16 h las lechadas puras con cemento clase H presentan mejor comportamiento que las lechadas puras con cemento clase G, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado, a excepción de los resultados obtenidos bajo la condición C donde se invierte el comportamiento. El sistema 2 bajo la condición B sigue presentando la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.96 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 20 horas obtenidos durante el ensayo mecánico destructivo.



Figura 5.96. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.96, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor resistencia que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A, B y C el sistema 3 presenta mayor resistencia que el sistema 4. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 20 h las lechadas puras con cemento clase H presentan mejor comportamiento que las lechadas puras con cemento clase G, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado. El sistema 2 bajo la condición B sigue presentando la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.97 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 24 horas obtenidos durante el ensayo mecánico destructivo.

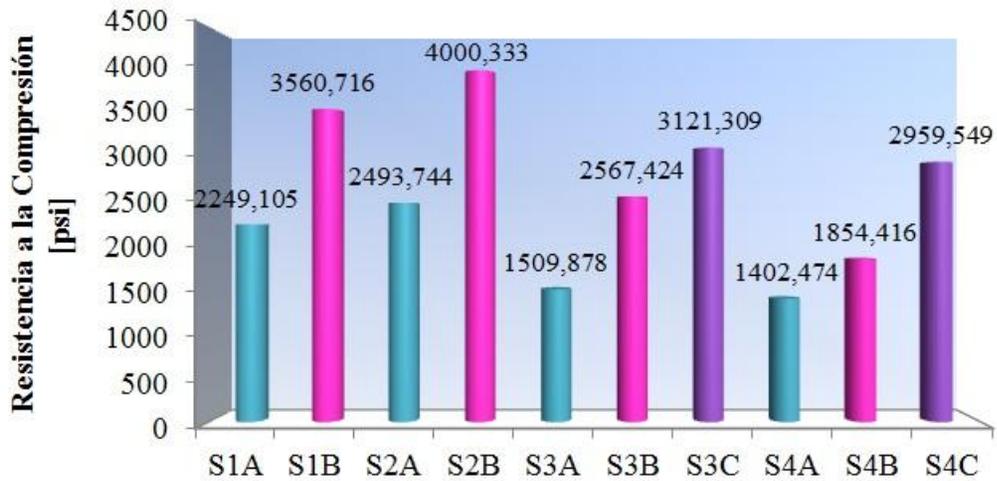


Figura 5.97. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.97, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor resistencia que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A, B y C el sistema 3 presenta mayor resistencia que el sistema 4. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 24 h las lechadas puras con cemento clase H presentan mejor comportamiento que las lechadas puras con cemento clase G, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado. El sistema 2 bajo la condición B sigue presentando la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.98 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 48 horas obtenidos durante el ensayo mecánico destructivo.



Figura 5.98. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.98, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor resistencia que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A, B y C el sistema 3 presenta mayor resistencia que el sistema 4. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 48 h las lechadas puras con cemento clase H presentan mejor comportamiento que las lechadas puras con cemento clase G, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado. El sistema 2 bajo la condición B sigue presentando la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes.

Finalmente se deduce que las lechadas puras con cemento clase H presentan mayor resistencia a la compresión que las lechadas puras con cemento clase G, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor resistencia a la compresión que el diseño con cemento clase H aditivado. Para los diferentes tiempos de curados el sistema 2 bajo la condición B presenta la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes diseños. Asimismo, se infiere que a mayor temperatura mayor resistencia a la compresión tanto en las lechadas puras como en los diseños aditivados.

5.5.2. Análisis de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico

En la Figura 5.99 se observan los resultados del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 4 horas durante el ensayo mecánico destructivo.

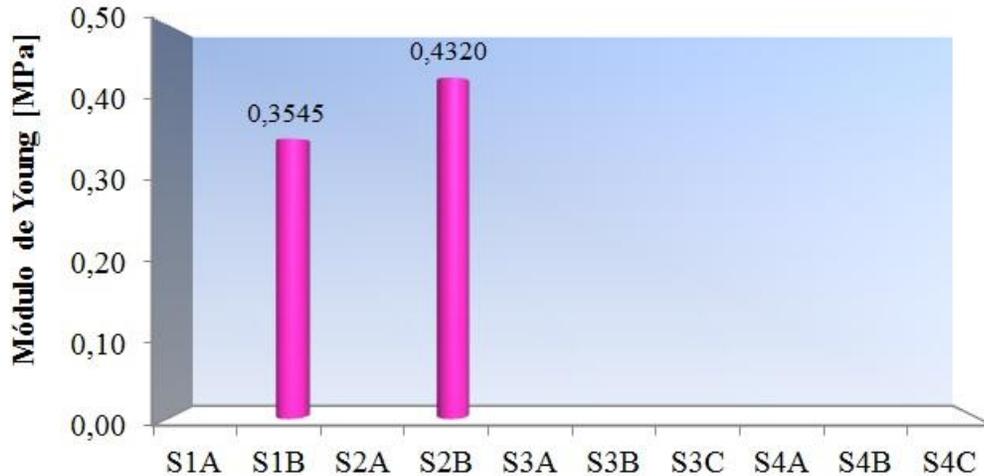


Figura 5.99. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 4 h.

No se aprecian resultados cuantificables del módulo de Young en la Figura 5.99 para los sistemas 1A, 2A, 3A, 3B, 3C, 4A, 4B y 4C, ya que los especímenes cúbicos no estaban totalmente fraguados, por lo que, no se midió su resistencia a la compresión y en consecuencia no se pudo generar los gráficos de esfuerzo-deformación para determinar el módulo. Sin embargo, este comportamiento era predecible, ya que en el ensayo de tiempo de espesamiento para cada uno de estos sistemas cementantes se había descartado realizar el ensayo para 4 h de curado. Asimismo, se puede acotar que los sistemas cementantes 3 y 4 están diseñados con aditivos entre los cuales está un retardador, lo que ocasiona un incremento del tiempo de espesamiento de la lechada y por tanto un retardo en el fraguado.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.99, se tiene que el sistema 2B presenta mayor módulo de Young que le sistema 1B, con lo que se puede inferir que bajo las mismas condiciones de temperatura (140 °F)

y presión (1 atm), el cemento clase H tiene mejor comportamiento que el cemento clase G.

En la Figura 5.100 se observan los resultados del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 8 horas durante el ensayo mecánico destructivo.

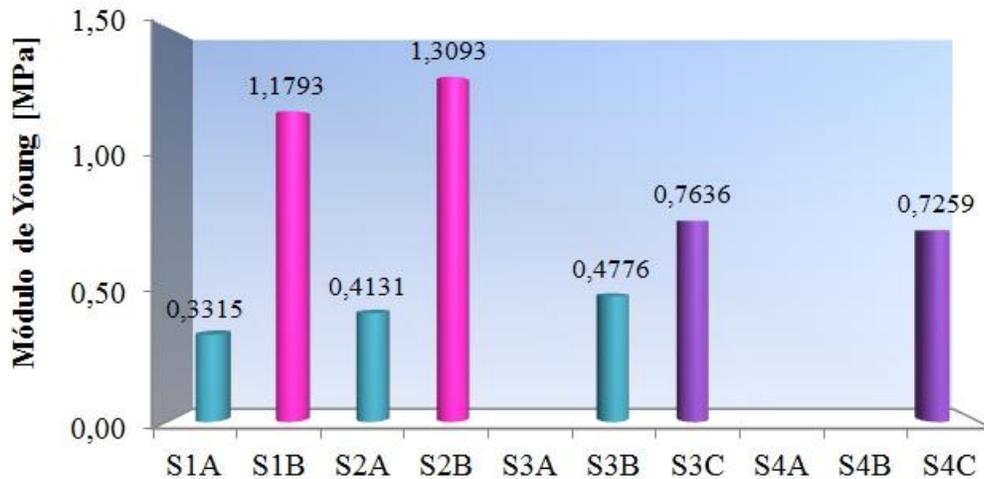


Figura 5.100. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.

No se aprecian resultados cuantificables del módulo de Young en la Figura 5.100 para los sistemas 3A, 4A y 4B, ya que los especímenes cúbicos no estaban totalmente fraguados, por lo que, no se midió su resistencia a la compresión y en consecuencia no se pudo generar los gráficos de esfuerzo-deformación para determinar el módulo. Asimismo, se puede acotar que los sistemas cementantes 3 y 4 están diseñados con aditivos entre los cuales está un retardador, lo que ocasiona un incremento del tiempo de espesamiento de la lechada y por tanto un retardo en el fraguado.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.100, se tiene que bajo la condición A el sistema 2 presenta mayor módulo de Young que el sistema 1, bajo la condición B nuevamente el sistema 2 presenta mayor módulo de Young que el sistema 1 y bajo la condición C el sistema 3 presenta mayor módulo de Young que el sistema 4. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado

de 8 h las lechadas con cemento clase H puras presentan mejor comportamiento que las lechadas con cemento clase G puras, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado, obteniéndose el mayor módulo de Young en el sistema 2 bajo la condición B.

En la Figura 5.101 se observan los resultados del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 12 horas durante el ensayo mecánico destructivo.

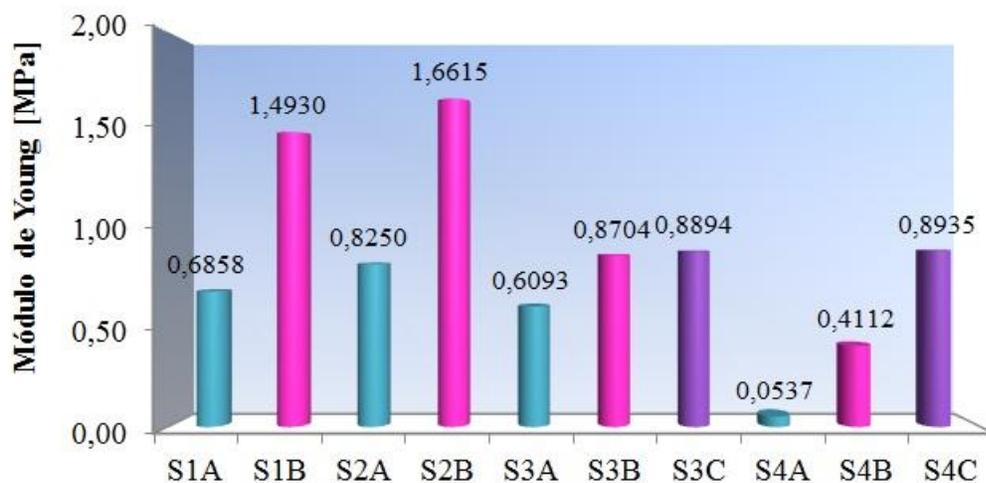


Figura 5.101. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.101, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor módulo de Young que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 3 presenta mayor módulo de Young que el sistema 4, no obstante, bajo la condición C el sistema 4 presenta mayor módulo de Young que el sistema 3. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 12 h las lechadas con cemento clase H puras presentan mejor comportamiento que las lechadas con cemento clase G puras, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado, a excepción de

los resultados bajo la condición C donde se invierte este comportamiento. El sistema 2 bajo la condición B sigue presentando el mayor módulo de Young al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.102 se observan los resultados del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 16 horas durante el ensayo mecánico destructivo.

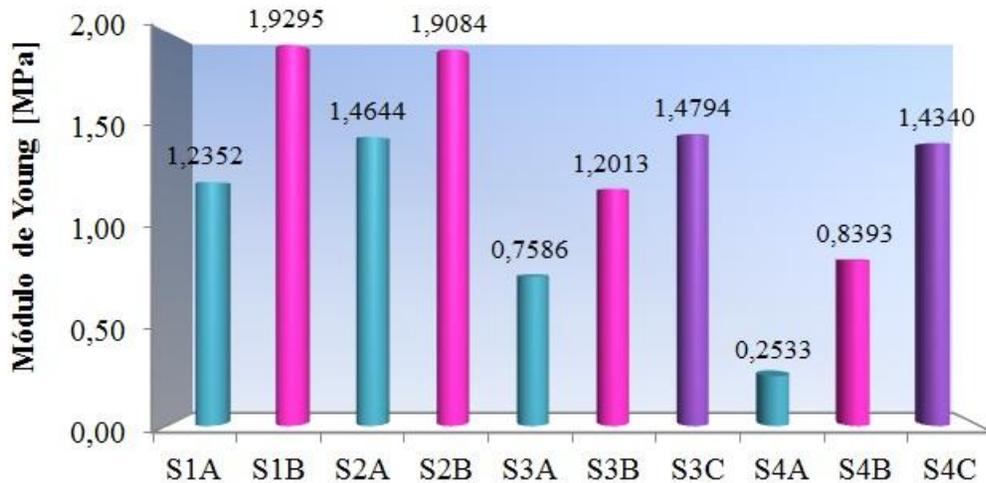


Figura 5.102. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.102, se tiene que bajo la condición A el sistema 2 presenta mayor módulo de Young que el sistema 1 y bajo la condición B el sistema 1 presenta mayor módulo de Young que el sistema 2. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A, B y C el sistema 3 presenta mayor módulo de Young que el sistema 4. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 16 h la lechada con cemento clase H pura presenta mejor comportamiento que la lechada con cemento clase G pura, bajo la condición A e invirtiéndose este comportamiento bajo la condición B. Sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado. El sistema 1 bajo la condición B es el que presenta el mayor módulo de Young al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.103 se observan los resultados del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 20 horas durante el ensayo mecánico destructivo.

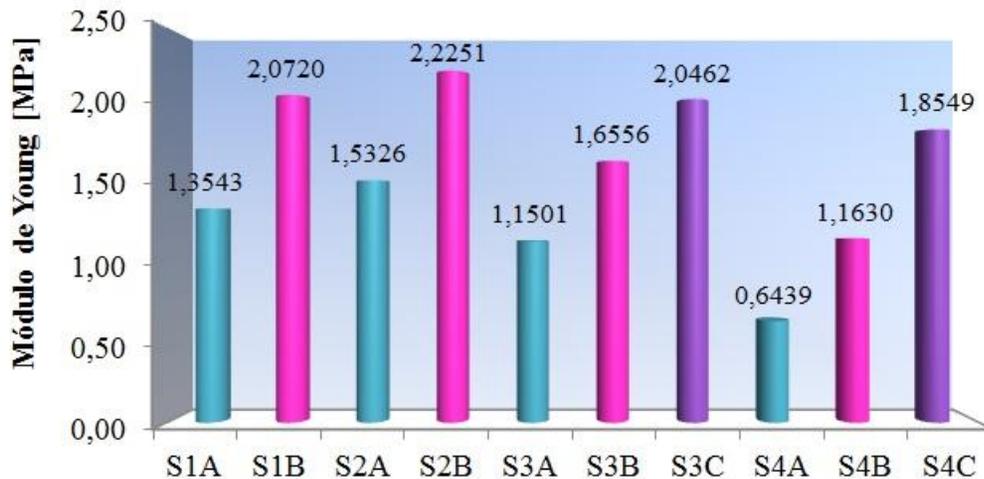


Figura 5.103. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.103, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor módulo de Young que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A, B y C el sistema 3 presenta mayor módulo de Young que el sistema 4. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 20 h las lechadas con cemento clase H pura presentan mejor comportamiento que las lechadas con cemento clase G pura, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente presenta el mayor módulo de Young al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.104 se observan los resultados del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 24 horas durante el ensayo mecánico destructivo.



Figura 5.104. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.104, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 1 presenta mayor módulo de Young que el sistema 2. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A, B y C el sistema 3 presenta mayor módulo de Young que el sistema 4. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 24 h las lechadas con cemento clase G tanto puras como aditivadas presentan mejor comportamiento que las lechadas con cemento clase H puras o aditivadas. El sistema 1 bajo la condición B presenta el mayor módulo de Young al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.105 se observan los resultados del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 48 horas durante el ensayo mecánico destructivo.



Figura 5.105. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.105, se tiene que bajo la condición A el sistema 1 presenta mayor módulo de Young que el sistema 2 y bajo la condición B el sistema 2 presenta mayor módulo de Young que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A, B y C el sistema 3 presenta mayor módulo de Young que el sistema 4. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 48 h la lechada con cemento clase G pura presenta mejor comportamiento que la lechada con cemento clase H pura, bajo la condición A e invirtiéndose este comportamiento bajo la condición B. Sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado. El sistema 2 bajo la condición B es el que presenta el mayor módulo de Young al compararlo con los restantes.

Con respecto al módulo de Young no se puede indicar una tendencia única como con la resistencia a la compresión, ya que no se mantiene el mismo comportamiento a los diferentes tiempos de curado. Esto puede ser producto de que al generarse las gráficas de esfuerzos-deformación varias de ellas mostraban falta de datos por parte del *software*, lo que evidenció una falla en los sensores del equipo. A grandes rasgos, se puede señalar que las lechadas con cemento clase G puro presentan mayor módulo de Young a mayores tiempo de curado (24 y 48 h) y para menores tiempo de curado el

comportamiento de las lechadas con cemento clase H puro presentan mayor módulo de Young. Para las lechadas aditivadas, las que contenían cemento clase G son las que presentan mayor módulo de Young que las que contenían cemento clase H. Se observa además que para los tiempos iniciales de curados el sistema 2 bajo la condición B es el que presenta mayor módulo de Young, sin embargo, este comportamiento varía a mayor tiempo de curado siendo el sistema 1 bajo la condición B el de mayor módulo. Asimismo, se infiere que a mayor temperatura mayor módulo de Young tanto en las lechadas puras como en los diseños aditivados, sin embargo, existen algunas excepciones donde el comportamiento varía como se expuso anteriormente.

5.5.3. Análisis de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico

En la Figura 5.106 se observan los resultados de la energía de deformación para los diferentes sistemas cementantes curados por 4 horas durante el ensayo mecánico destructivo.

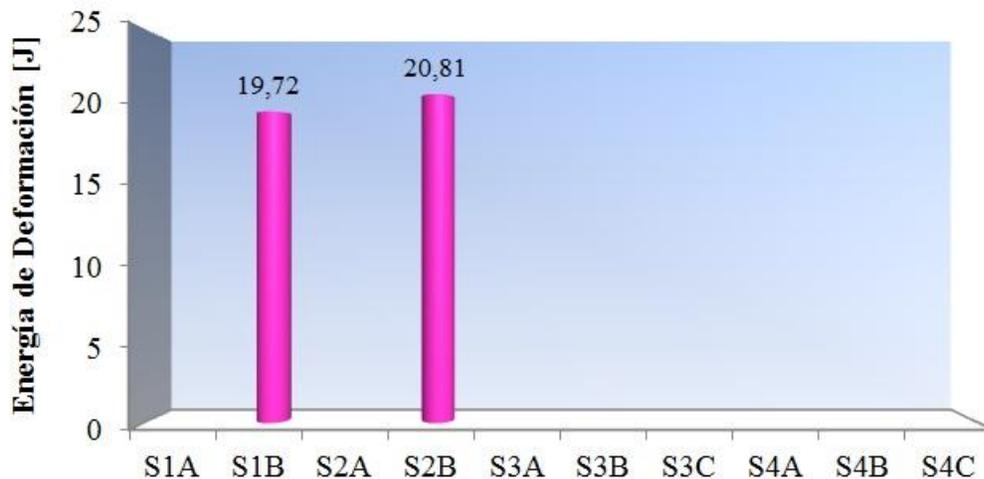


Figura 5.106. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 4 h.

No se aprecian resultados cuantificables de la energía de deformación en la Figura 5.106 para los sistemas 1A, 2A, 3A, 3B, 3C, 4A, 4B y 4C, ya que los especímenes

cúbicos no estaban totalmente fraguados, por lo que, no se midió su resistencia a la compresión y en consecuencia no se pudo generar los gráficos de esfuerzo-deformación para determinar la energía de deformación. Sin embargo, este comportamiento era predecible, ya que en el ensayo de tiempo de espesamiento para cada uno de estos sistemas cementantes se había descartado realizar el ensayo para 4 h de curado. Asimismo, se puede acotar que los sistemas cementantes 3 y 4 están diseñados con aditivos entre los cuales está un retardador, lo que ocasiona un incremento del tiempo de espesamiento de la lechada y por tanto un retardo en el fraguado.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.106, se tiene que el sistema 2B presenta mayor energía de deformación que el sistema 1B, con lo que se puede inferir que bajo las mismas condiciones de temperatura (140 °F) y presión (1 atm), el cemento clase H tiene mejor comportamiento que el cemento clase G.

En la Figura 5.107 se observan los resultados de la energía de deformación para los diferentes sistemas cementantes curados por 8 horas durante el ensayo mecánico destructivo.

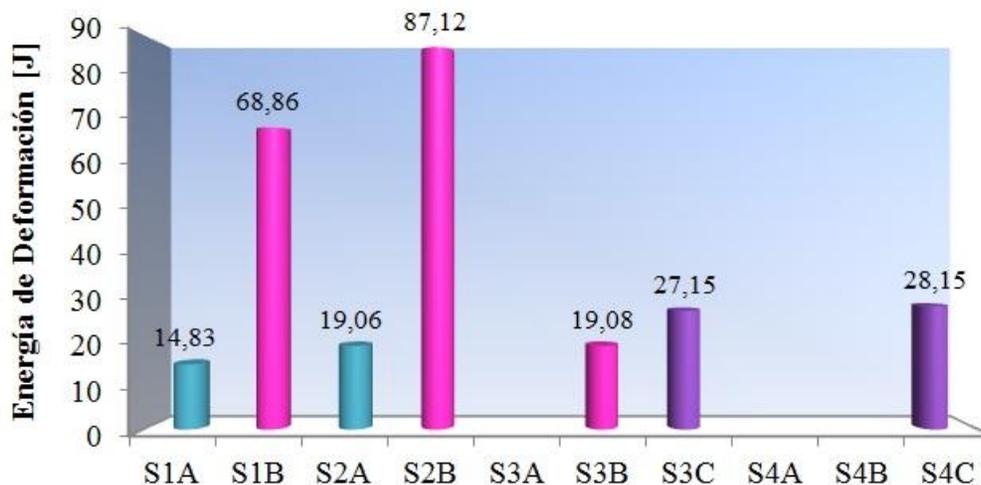


Figura 5.107. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.

No se aprecian resultados cuantificables de la energía de deformación en la Figura 5.107 para los sistemas 3A, 4A y 4B, ya que los especímenes cúbicos no estaban totalmente fraguados, por lo que, no se midió su resistencia a la compresión y en consecuencia no se pudo generar los gráficos de esfuerzo-deformación para determinar la energía de deformación. Asimismo, se puede acotar que los sistemas cementantes 3 y 4 están diseñados con aditivos entre los cuales está un retardador, lo que ocasiona un incremento del tiempo de espesamiento de la lechada y por tanto un retardo en el fraguado.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.107, se tiene que bajo la condición A el sistema 2 presenta mayor energía de deformación que el sistema 1, bajo la condición B nuevamente el sistema 2 presenta mayor energía de deformación que el sistema 1 y bajo la condición C el sistema 4 presenta mayor energía de deformación que el sistema 3. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 8 h las lechadas con cemento clase H tanto puras como aditivadas presentan mejor comportamiento que las lechadas con cemento clase G tanto puras como aditivadas, obteniéndose la mayor energía de deformación en el sistema 2 bajo la condición B.

En la Figura 5.108 se observan los resultados de la energía de deformación para los diferentes sistemas cementantes curados por 12 horas durante el ensayo mecánico destructivo.

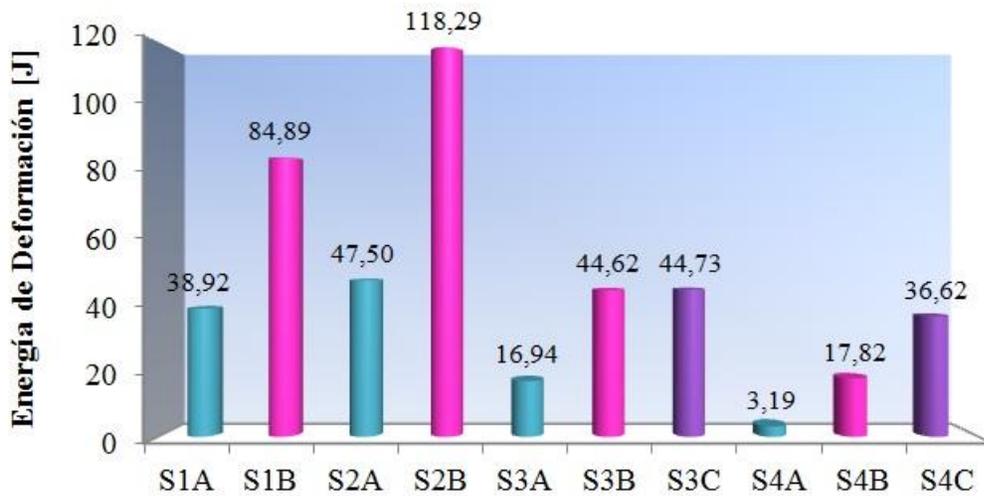


Figura 5.108. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.108, se tiene que bajo la condición A y B el sistema 2 presenta mayor energía de deformación que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A, B y C el sistema 3 presenta mayor energía de deformación que el sistema 4. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 12 h las lechadas con cemento clase H pura presentan mejor comportamiento que las lechadas con cemento clase G pura, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente presenta la mayor energía de deformación al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.109 se observan los resultados de la energía de deformación para los diferentes sistemas cementantes curados por 16 horas durante el ensayo mecánico destructivo.



Figura 5.109. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.109, se tiene que bajo la condición A y B el sistema 2 presenta mayor energía de deformación que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 3 presenta mayor energía de deformación que el sistema 4, no obstante, bajo la condición C el sistema 4 presenta mayor energía de deformación que el sistema 3. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 16 h las lechadas con cemento clase H puras presentan mejor comportamiento que las lechadas con cemento clase G puras, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado, a excepción de los resultados bajo la condición C donde se invierte este comportamiento. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente presenta la mayor energía de deformación al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.110 se observan los resultados de la energía de deformación para los diferentes sistemas cementantes curados por 20 horas durante el ensayo mecánico destructivo.

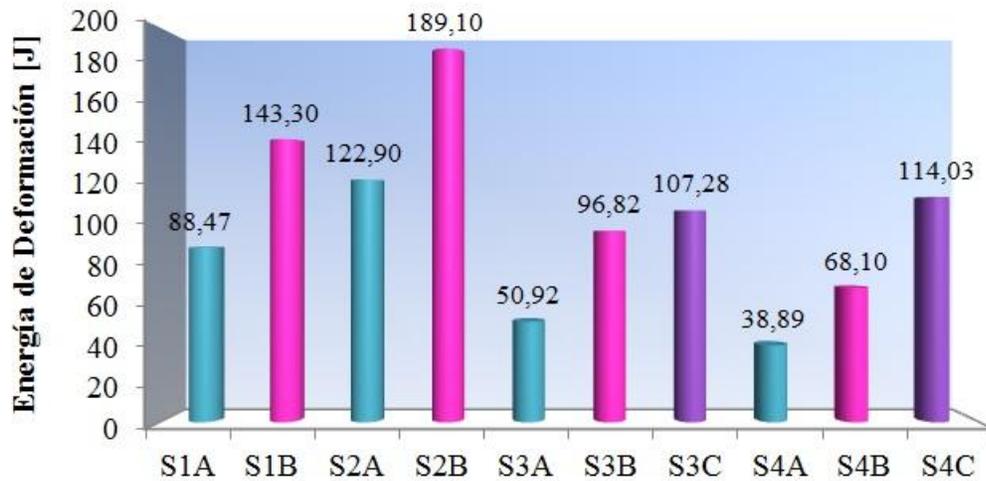


Figura 5.110. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.110, se tiene que bajo la condición A y B el sistema 2 presenta mayor energía de deformación que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 3 presenta mayor energía de deformación que el sistema 4, no obstante, bajo la condición C el sistema 4 presenta mayor energía de deformación que el sistema 3. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 20 h las lechadas con cemento clase H puras presentan mejor comportamiento que las lechadas con cemento clase G puras, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado, a excepción de los resultados bajo la condición C donde se invierte este comportamiento. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente presenta la mayor energía de deformación al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.111 se observan los resultados de la energía de deformación para los diferentes sistemas cementantes curados por 24 horas durante el ensayo mecánico destructivo.



Figura 5.111. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.111, se tiene que bajo la condición A y B el sistema 2 presenta mayor energía de deformación que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A y C el sistema 4 presenta mayor energía de deformación que el sistema 3, no obstante, bajo la condición B el sistema 3 presenta mayor energía de deformación que el sistema 4. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 24 h las lechadas con cemento clase H puras presentan mejor comportamiento que las lechadas con cemento clase G puras, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase H aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase G aditivado, a excepción de los resultados bajo la condición B donde se invierte este comportamiento. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente presenta la mayor energía de deformación al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.112 se observan los resultados de la energía de deformación para los diferentes sistemas cementantes curados por 48 horas durante el ensayo mecánico destructivo.

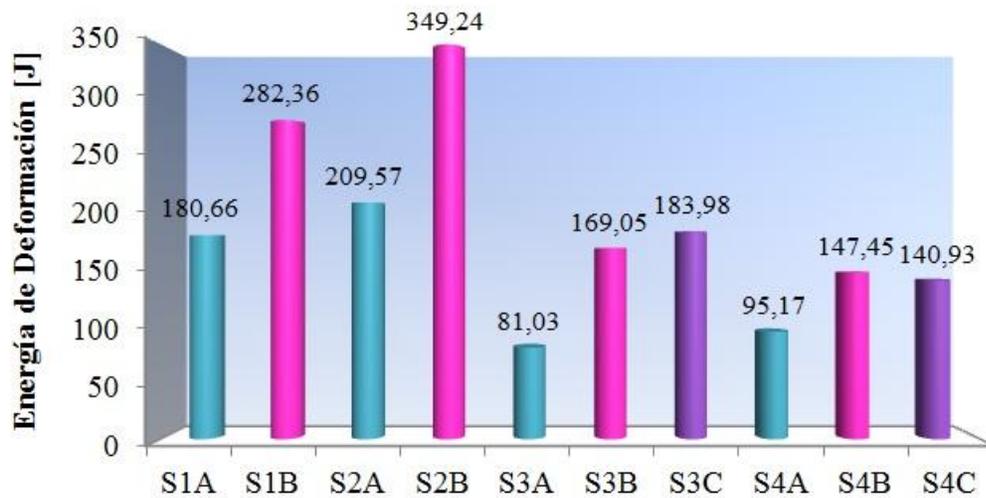


Figura 5.112. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Energía de Deformación en el Ensayo Mecánico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.112, se tiene que bajo la condición A y B el sistema 2 presenta mayor energía de deformación que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones B y C el sistema 3 presenta mayor energía de deformación que el sistema 4, no obstante, bajo la condición A el sistema 4 presenta mayor energía de deformación que el sistema 3. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 48 h las lechadas con cemento clase H puras presentan mejor comportamiento que las lechadas con cemento clase G puras, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mejor comportamiento que el diseño con cemento clase H aditivado, a excepción de los resultados bajo la condición A donde se invierte este comportamiento. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente presenta la mayor energía de deformación al compararlo con los restantes.

Finalmente se deduce que las lechadas puras con cemento clase H presentan mayor energía de deformación que las lechadas puras con cemento clase G, sin embargo, al aditivar las lechadas, no se puede indicar una tendencia única ya que las mismas varían. Como se indicó anteriormente, estas variaciones pueden ser producto de que al generarse las gráficas de esfuerzos-deformación varias de ellas mostraban falta de

datos por parte del *software*, lo que evidenció una falla en los sensores del equipo. A grandes rasgos, se puede señalar que las lechadas aditivadas que contienen cemento clase G son las que presentan mayor energía de deformación en comparación con las lechadas que contienen cemento clase H. Para los diferentes tiempos de curados el sistema 2 bajo la condición B presenta la mayor energía de deformación al compararlo con los restantes diseños. Asimismo, se infiere que a mayor temperatura mayor energía de deformación tanto en las lechadas puras como en los diseños aditivados, sin embargo, existen algunas excepciones donde el comportamiento varía como se expuso anteriormente.

5.5.4. Análisis de los Resultados de la Resistencia a la Compresión en el Ensayo Acústico

En la Figura 5.113 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 4 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

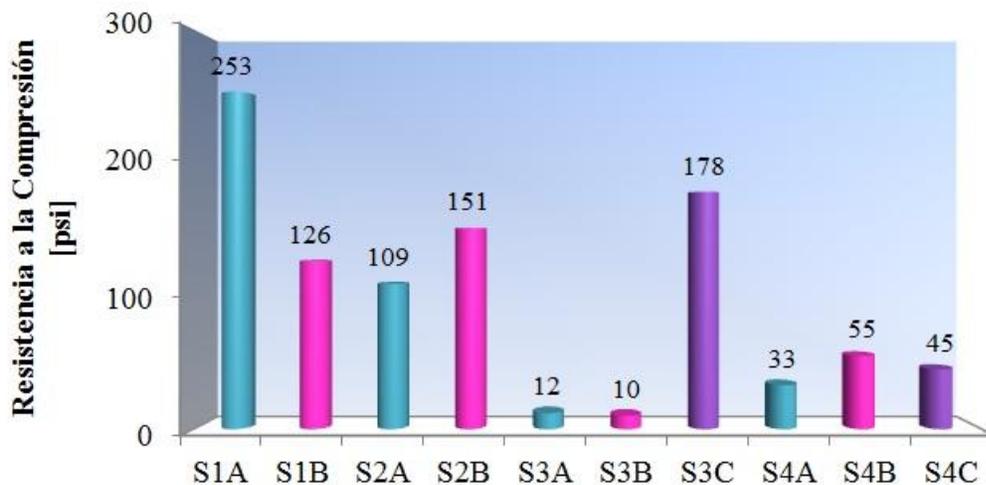


Figura 5.113. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 4 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.113, se tiene que bajo la condición A el sistema 1 presenta mayor resistencia que el sistema 2 y bajo la condición B el sistema 2 tiene mayor resistencia que el sistema 1. Al aditar

las lechadas se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 4 presenta mayor resistencia que el sistema 3 y bajo la condición C ocurre la situación inversa. Para un tiempo de curado de 4 h no se puede establecer un patrón concreto para las lechadas puras, ya que tiene un comportamiento inverso, para menor temperatura (100 °F) el cemento clase G desarrolla mayor resistencia a la compresión y para una mayor temperatura (140 °F) el cemento clase H desarrolla mayor resistencia. Con respecto a las lechadas aditivas, el cemento clase H aditivado desarrolla mayor resistencia que el cemento clase G aditivado, sin embargo al someter los diseños de las lechadas a condiciones de pozo el cemento clase G aditivado desarrolla mejor resistencia a la compresión. El sistema 1 bajo la condición A es el que desarrolla la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.114 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 8 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

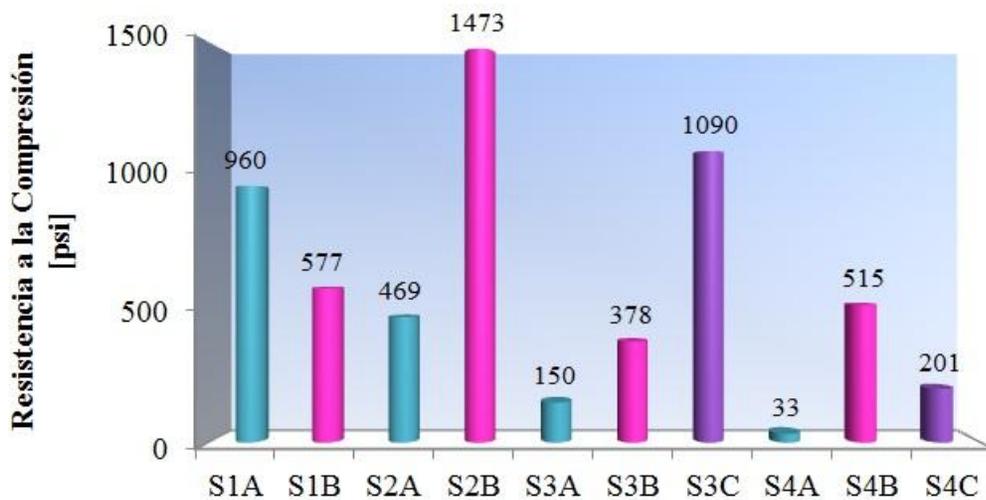


Figura 5.114. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.114, se tiene que bajo la condición A el sistema 1 presenta mayor resistencia que el sistema 2 y bajo la condición B el sistema 2 tiene mayor resistencia que el sistema 1. Al aditivar

las lechadas se tiene que bajo las condiciones A y C el sistema 3 presenta mayor resistencia que el sistema 4 y bajo la condición B ocurre la situación inversa. Para un tiempo de curado de 8 h no se puede establecer un patrón concreto para las lechadas puras, ya que tiene un comportamiento inverso, para menor temperatura (100 °F) el cemento clase G desarrolla mayor resistencia a la compresión y para una mayor temperatura (140 °F) el cemento clase H desarrolla mayor resistencia. Con respecto a las lechadas aditivas, el cemento clase G aditivado desarrolla mayor resistencia que el cemento clase H aditivado, sin embargo al someter los diseños de las lechadas a la condición B el cemento clase H aditivado desarrolla mayor resistencia a la compresión. El sistema 2 bajo la condición B es el que desarrolla la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.115 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 12 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

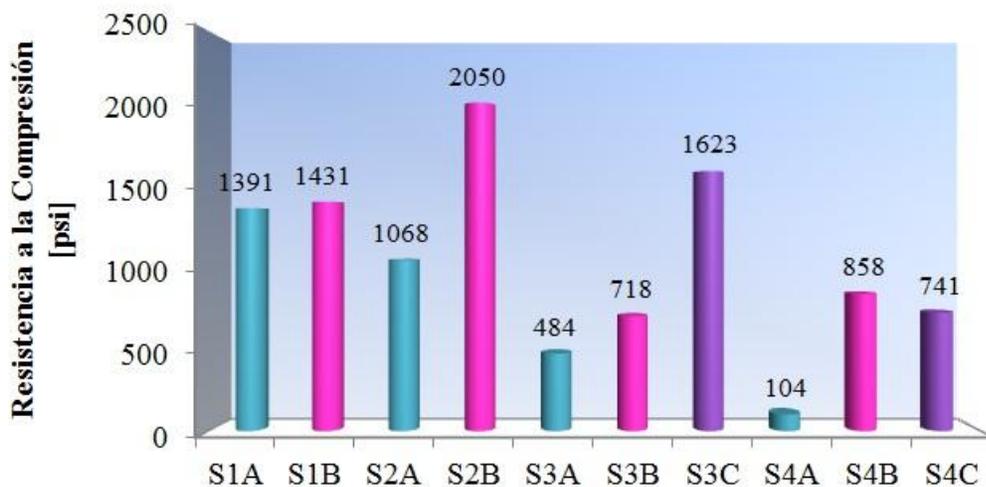


Figura 5.115. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.115, se tiene que bajo la condición A el sistema 1 presenta mayor resistencia que el sistema 2 y bajo la condición B el sistema 2 tiene mayor resistencia que el sistema 1. Al aditivar

las lechadas se tiene que bajo las condiciones A y C el sistema 3 presenta mayor resistencia que el sistema 4 y bajo la condición B ocurre la situación inversa. Para un tiempo de curado de 12 h no se puede establecer un patrón concreto para las lechadas puras, ya que tiene un comportamiento inverso, para menor temperatura (100 °F) el cemento clase G desarrolla mayor resistencia a la compresión y para una mayor temperatura (140 °F) el cemento clase H desarrolla mayor resistencia. Con respecto a las lechadas aditivas, el cemento clase G aditivado desarrolla mayor resistencia que el cemento clase H aditivado, sin embargo al someter los diseños de las lechadas a la condición B el cemento clase H aditivado desarrolla mayor resistencia a la compresión. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que desarrolla la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.116 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 16 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

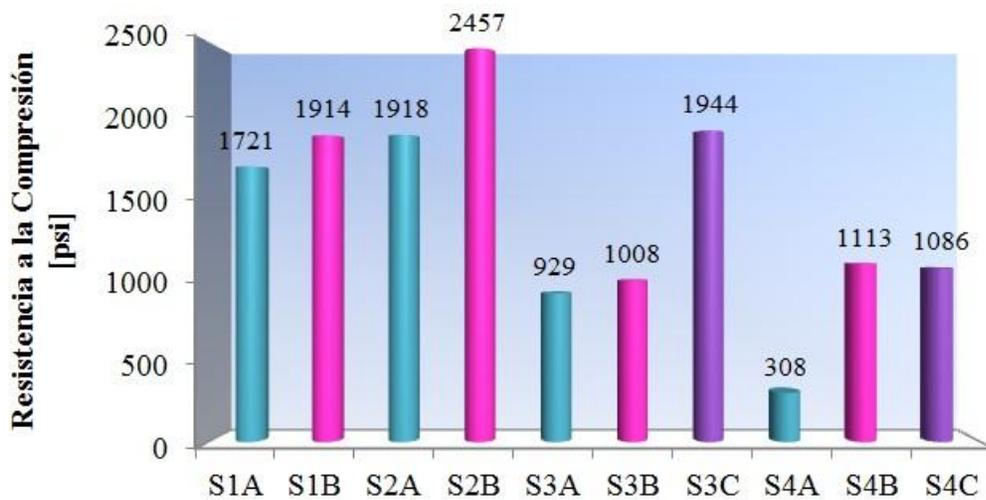


Figura 5.116. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.116, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor resistencia a la compresión que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las

condiciones A y C el sistema 3 presenta mayor resistencia que el sistema 4 y bajo la condición B ocurre la situación inversa. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 16 h las lechadas con cemento clase H puras presentan mayor resistencia a la compresión que las lechadas con cemento clase G puras, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor resistencia a la compresión que el diseño con cemento clase H aditivado, a excepción de la condición B donde el comportamiento se invierte. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que desarrolla la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.117 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 20 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

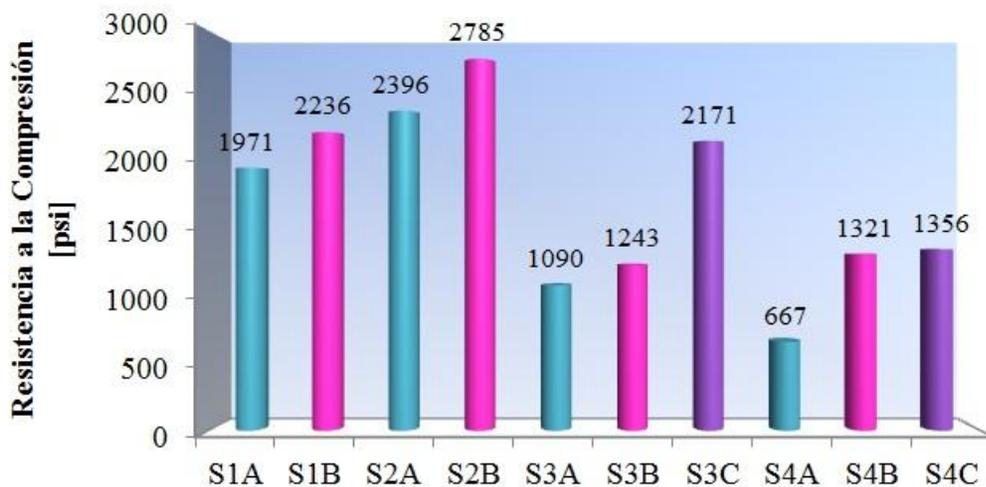


Figura 5.117. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.117, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor resistencia a la compresión que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A y C el sistema 3 presenta mayor resistencia que el sistema 4 y bajo la condición B ocurre la situación inversa. Con lo que se puede inferir que para un

tiempo de curado de 20 h las lechadas con cemento clase H puras presentan mayor resistencia a la compresión que las lechadas con cemento clase G puras, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor resistencia a la compresión que el diseño con cemento clase H aditivado, a excepción de la condición B donde el comportamiento se invierte. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que desarrolla la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.118 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 24 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

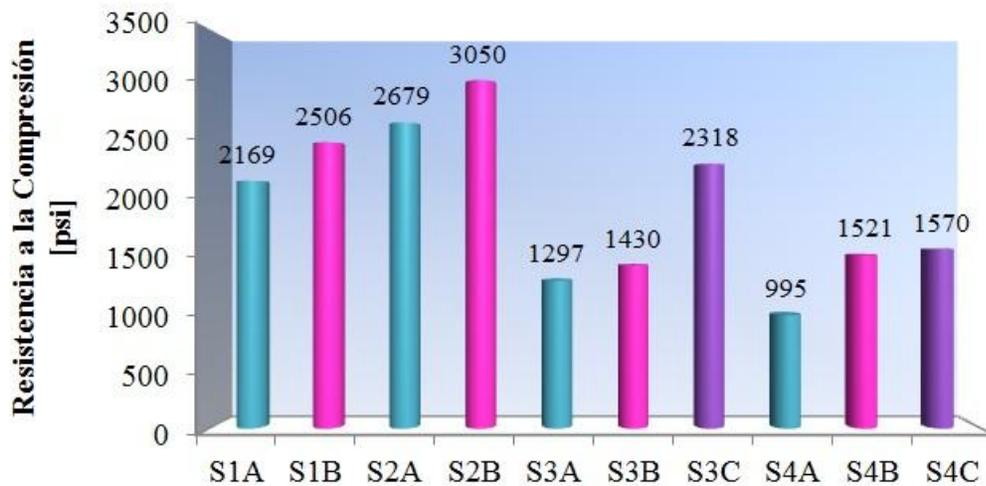


Figura 5.118. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.118, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor resistencia a la compresión que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A y C el sistema 3 presenta mayor resistencia que el sistema 4 y bajo la condición B ocurre la situación inversa. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 24 h las lechadas con cemento clase H puras presentan mayor resistencia a la compresión que las lechadas con cemento clase G puras, sin embargo,

al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor resistencia a la compresión que el diseño con cemento clase H aditivado, a excepción de la condición B donde el comportamiento se invierte. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que desarrolla la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.119 se observan los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes sistemas cementantes curados por 48 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

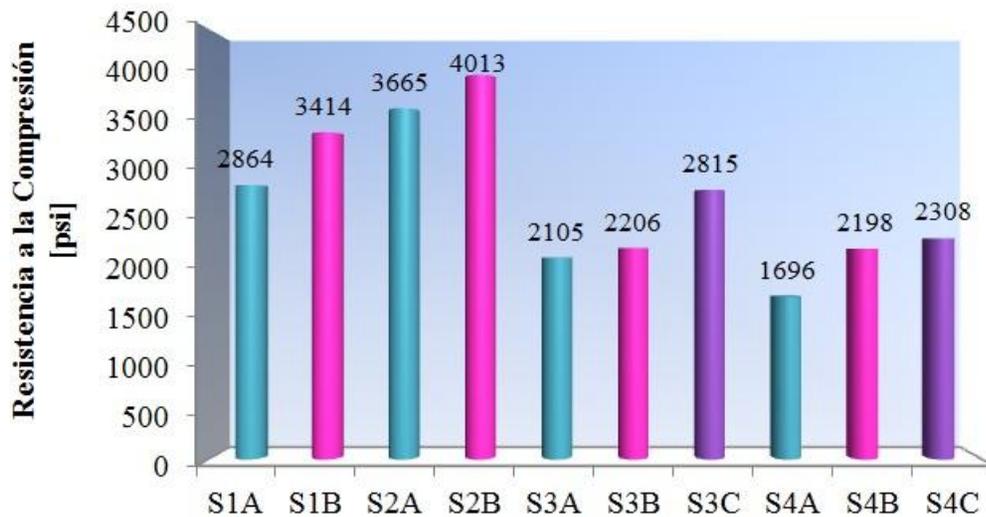


Figura 5.119. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Resistencia a la compresión en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.119, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor resistencia a la compresión que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A, B y C el sistema 3 presenta mayor resistencia que el sistema 4. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 48 h las lechadas con cemento clase H puras presentan mayor resistencia a la compresión que las lechadas con cemento clase G puras, sin embargo, al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor resistencia a la compresión que el diseño con

cemento clase H aditivado. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que desarrolla la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes.

Finalmente se deduce que las lechadas puras con cemento clase H presentan mayor resistencia a la compresión que las lechadas puras con cemento clase G, cabe acotar que este comportamiento no se obtuvo en las primeras horas de fraguado, esto se puede deber a que las lechadas no estaban totalmente estabilizadas. Al aditivar las lechadas, es el diseño con cemento clase G aditivado el que presenta mayor resistencia a la compresión que el diseño con cemento clase H aditivado, a excepción de la condición B donde el comportamiento se invierte. Para los diferentes tiempos de curados el sistema 2 bajo la condición B presenta la mayor resistencia a la compresión al compararlo con los restantes diseños. Asimismo, se infiere que a mayor temperatura mayor resistencia a la compresión tanto en las lechadas puras como en los diseños aditivados.

5.5.5. Análisis de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico

No se aprecian resultados cuantificables de la relación de Poisson para los diferentes sistemas cementantes curados por 4 horas, esto se debe a que las lechadas no están totalmente fraguadas, parte de ellas se encuentran en estado líquido y no se puede determinar la relación de Poisson. Este comportamiento era predecible, ya que en el ensayo de tiempo de espesamiento para cada uno de estos sistemas se había descartado el ensayo para 4 h. Asimismo, se puede acotar que los sistemas cementantes 3 y 4 están diseñados con aditivos entre los cuales está un retardador, lo que ocasiona un incremento del tiempo de espesamiento de la lechada y por tanto un retardo en el fraguado.

En la Figura 5.120 se observan los resultados de la relación de Poisson para los diferentes sistemas cementantes curados por 8 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

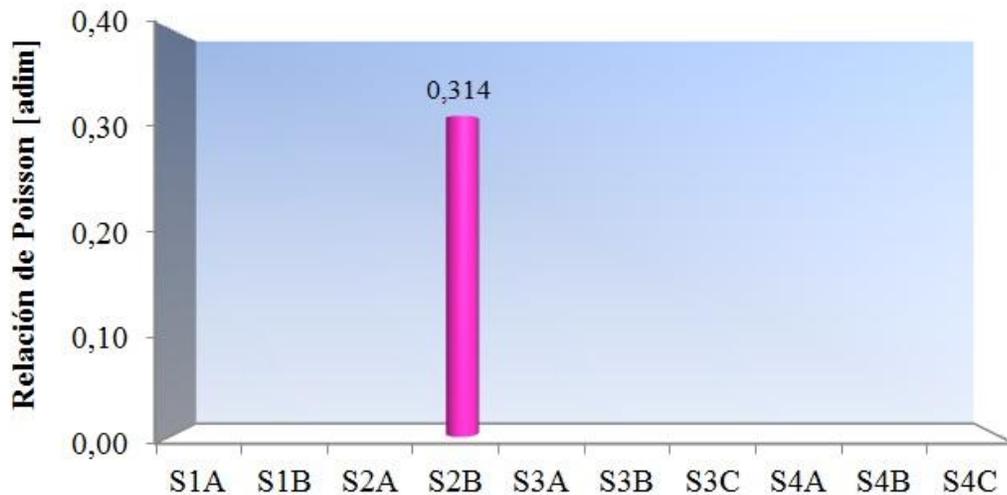


Figura 5.120. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.

No se aprecian resultados cuantificables de la relación de Poisson en la Figura 5.120 para los sistemas 1A, 1B, 2A, 3A, 3B, 3C, 4A, 4B y 4C, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dicho sistema cementante. El sistema 2 bajo la condición B es el único que aportó un resultado cuantificable de la relación de Poisson.

En la Figura 5.121 se observan los resultados de la relación de Poisson para los diferentes sistemas cementantes curados por 12 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

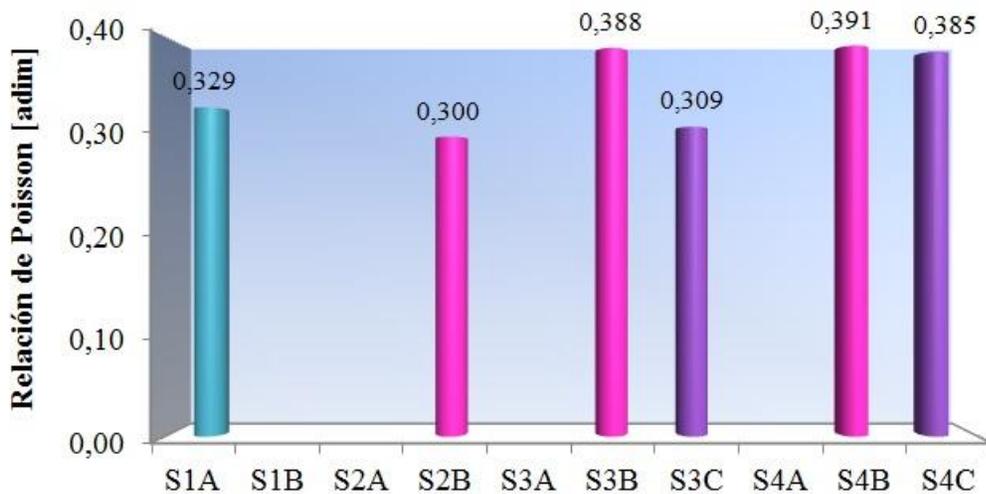


Figura 5.121. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.

No se aprecian resultados cuantificables de la relación de Poisson en la Figura 5.121 para los sistemas 1B, 2A, 3A y 4A, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dicho sistema cementante.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.121, se observa que bajo la condición A el sistema 1 es el que aporta resultado de relación de Poisson y bajo la condición B es el sistema 2 el que aporta. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo la condición A no se obtienen resultados y bajo las condiciones B y C es el sistema 3 el que aporta menores valores de relación de Poisson. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 12 h las lechadas con cemento clase G y H puras no tiene un patrón concreto, mientras que, al aditivarlas, el sistema con cemento clase G aditivado presenta menor relación de Poisson que el sistema con cemento clase H aditivado, asimismo, se observa que a mayor temperatura menor relación de Poisson. El sistema 3 bajo la condición C es el que tiene menor relación de Poisson al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.122 se observan los resultados de la relación de Poisson para los diferentes sistemas cementantes curados por 16 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

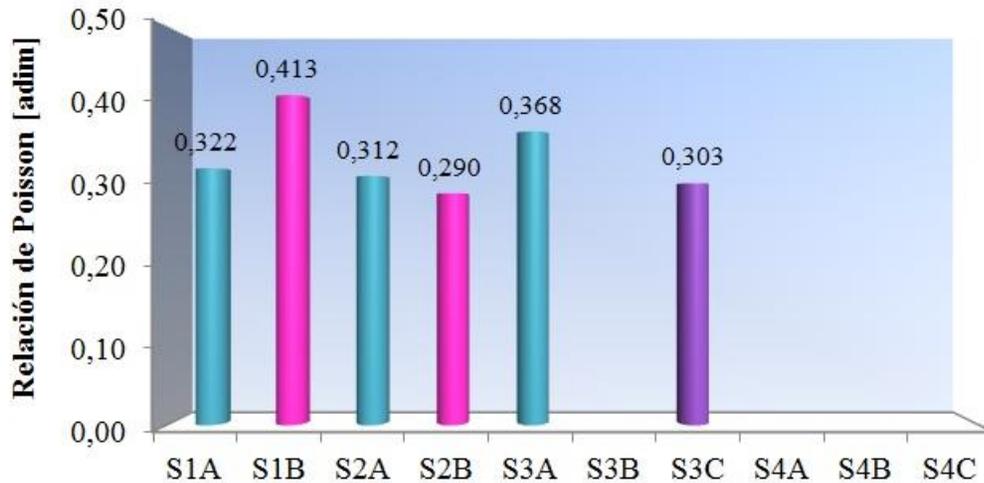


Figura 5.122. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.

No se aprecian resultados cuantificables de la relación de Poisson en la Figura 5.122 para los sistemas 3B, 4A, 4B y 4C, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dichos sistemas cementantes.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.122, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta menor relación de Poisson que el sistema 1. Al aditivar las lechadas, a las que se le pudo determinar la relación de Poisson son al sistema 3A y 3C, sin poder identificar un patrón para estas. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 16 h las lechadas puras con cemento clase H presentan menor relación de Poisson que las lechadas puras con cemento clase G, asimismo, se observa que a mayor temperatura menor relación de Poisson, sin embargo, al aditivar las lechadas, no se puede establecer un patrón. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que tiene menor relación de Poisson al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.123 se observan los resultados de la relación de Poisson para los diferentes sistemas cementantes curados por 20 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

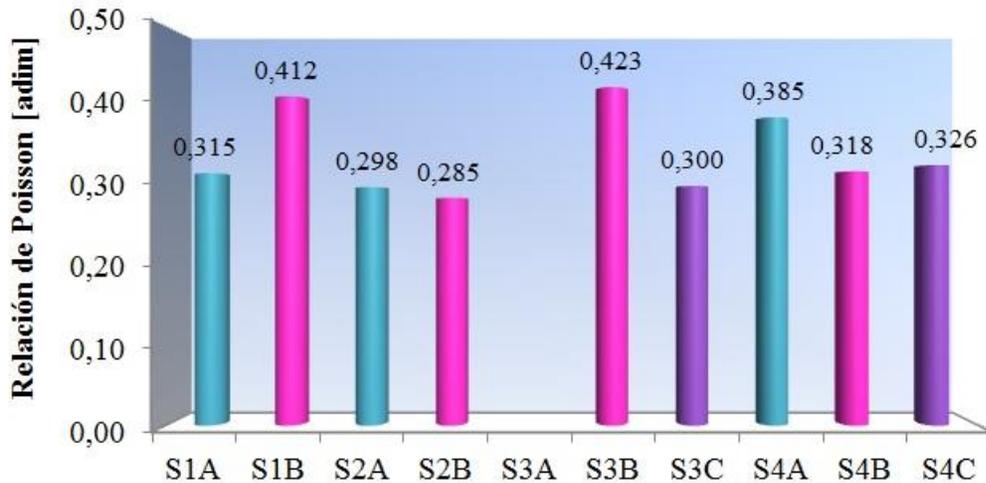


Figura 5.123. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.

No se aprecian resultados cuantificables de la relación de Poisson en la Figura 5.123 para el sistema 3A, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dicho sistema cementante.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.123, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta menor relación de Poisson que el sistema 1. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo la condición A el sistema 4 es el que aporta resultados, sin poder identificarse un patrón, bajo la condición B el sistema 4 presenta menor relación de Poisson que el sistema 3 y bajo la condición C, el comportamiento es inverso. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 20 h las lechadas puras con cemento clase H presentan menor relación de Poisson que las lechadas puras con cemento clase G, asimismo, se observa que a mayor temperatura menor relación de Poisson. Al aditivar las lechadas, no se puede establecer un patrón concreto, no obstante se puede indicar que de igual

forma que con los diseños de cemento puro, a mayor temperatura menor relación de Poisson. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que tiene menor relación de Poisson al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.124 se observan los resultados de la relación de Poisson para los diferentes sistemas cementantes curados por 24 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

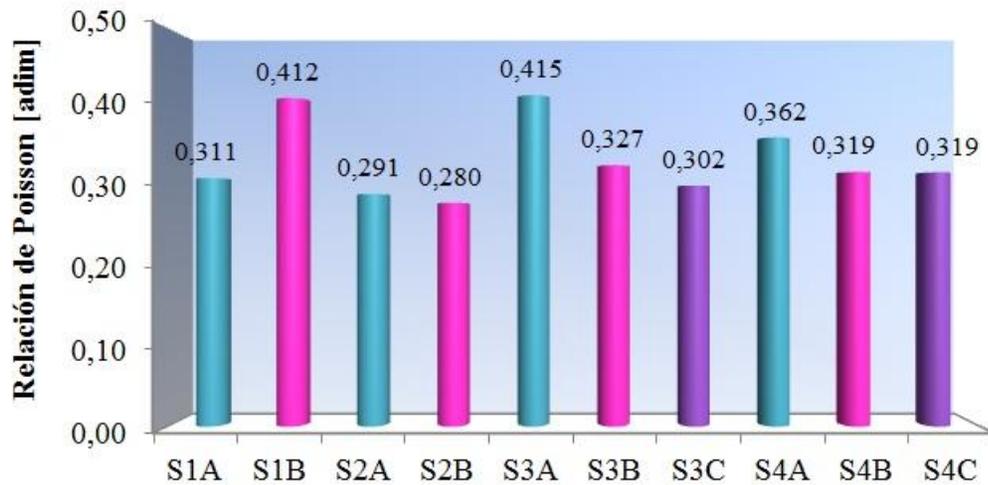


Figura 5.124. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.124, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta menor relación de Poisson que el sistema 1. Al aditivar las lechadas se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 4 presenta menor relación de Poisson que el sistema 3, no obstante, bajo la condición C el sistema 3 presenta menor relación de Poisson que el sistema 4. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 24 h las lechadas puras con cemento clase H presentan menor relación de Poisson que las lechadas puras con cemento clase G, asimismo, se observa que a mayor temperatura menor relación de Poisson. Al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase H aditivado presenta menor relación de Poisson que el diseño con cemento clase G aditivado, a excepción de los resultados bajo la condición C donde se invierte este comportamiento. El

sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que tiene menor relación de Poisson al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.125 se observan los resultados de la relación de Poisson para los diferentes sistemas cementantes curados por 48 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

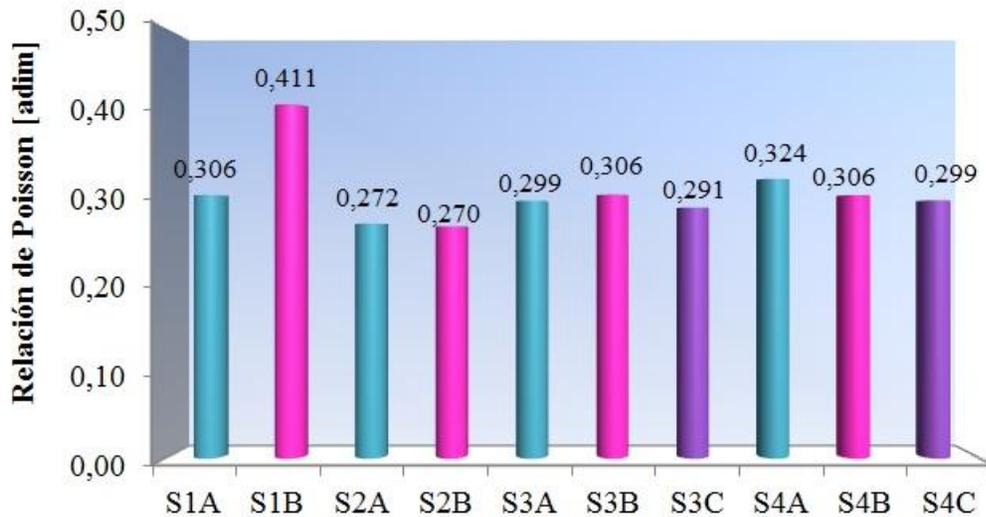


Figura 5.125. Gráfica Comparativa de los Resultados de la Relación de Poisson en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.125, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta menor relación de Poisson que el sistema 1. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo las condiciones A y C el sistema 3 presenta menor relación de Poisson que el sistema 4, no obstante, bajo la condición B tanto el sistema 3 como el sistema 4 presentan la misma relación de Poisson. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 48 h las lechadas puras con cemento clase H presentan menor relación de Poisson que las lechadas puras con cemento clase G. Al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta menor relación de Poisson que el diseño con cemento clase H aditivado, a excepción de los resultados bajo la condición B donde son iguales. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que tiene menor relación de Poisson al compararlo con los restantes.

Finalmente se tiene que en las primeras horas de curado no se obtuvo resultados de la relación de Poisson porque las lechadas no habían fraguado completamente y los sensores del equipo no podían determinar la velocidad de propagación de la onda S y así poder calcular la relación de Poisson. Asimismo, se deduce que las lechadas puras con cemento clase H presentan menor relación de Poisson que las lechadas puras con cemento clase G, sin embargo, al aditivar las lechadas, no se identifica un patrón único. Para los diferentes tiempos de curados el sistema 2 bajo la condición B presenta la menor relación de Poisson al compararlo con los restantes diseños. Asimismo, se infiere a grandes rasgos, que para los diseños de las lechadas tanto puras como aditivadas a mayor temperatura menor relación de Poisson.

5.5.6. Análisis de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico

No se aprecian resultados cuantificables del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 4 horas, esto se debe a que las lechadas no están totalmente fraguadas, parte de ellas se encuentran en estado líquido y no se puede determinar la velocidad de propagación de la onda S para posteriormente calcular los módulos elásticos. Este comportamiento era predecible, ya que en el ensayo de tiempo de espesamiento para cada uno de estos sistemas se había descartado el ensayo para 4 h. Asimismo, se puede acotar que los sistemas cementantes 3 y 4 están diseñados con aditivos entre los cuales está un retardador, lo que ocasiona un incremento del tiempo de espesamiento de la lechada y por tanto un retardo en el fraguado.

En la Figura 5.126 se observan los resultados del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 8 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

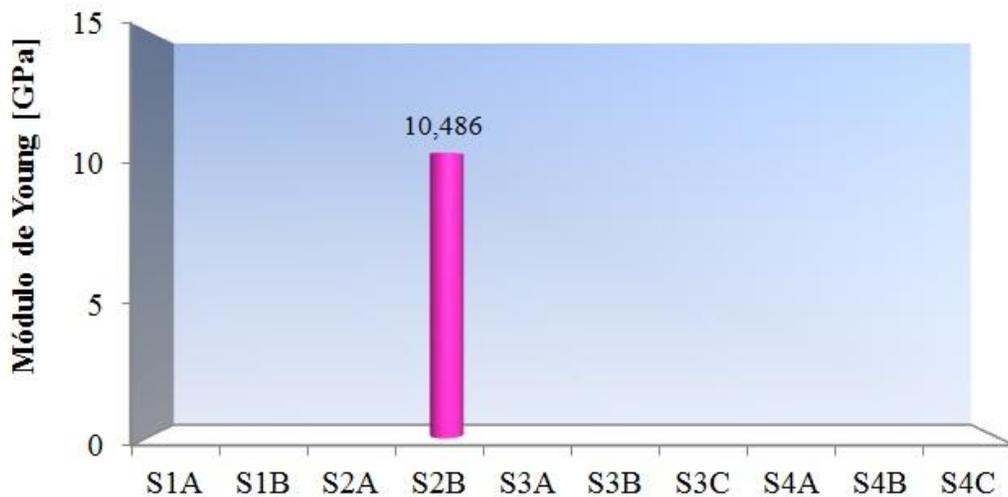


Figura 5.126. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.

No se aprecian resultados cuantificables del módulo de Young en la Figura 5.125 para los sistemas 1A, 1B, 2A, 3A, 3B, 3C, 4A, 4B y 4C, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dicho sistema cementante. El sistema 2 bajo la condición B es el único que aportó un resultado cuantificable del módulo de Young.

En la Figura 5.127 se observan los resultados del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 12 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

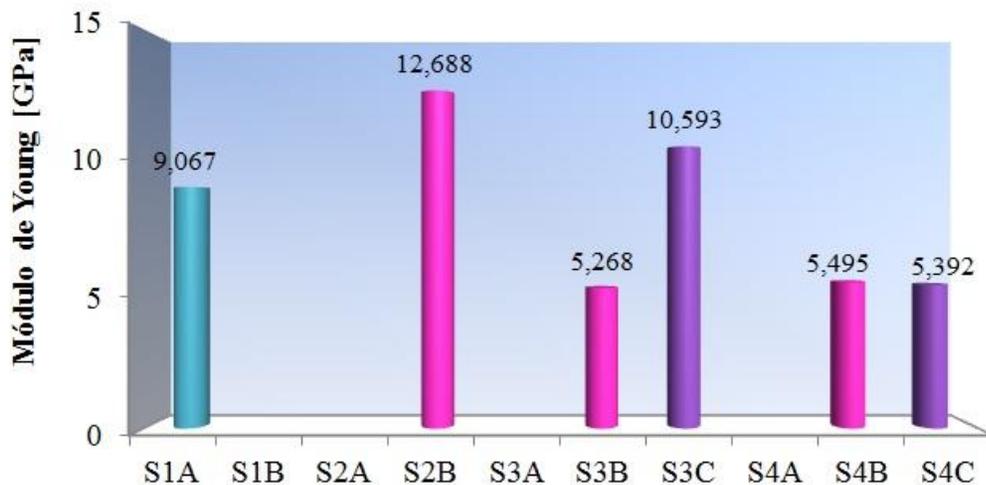


Figura 5.127. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.

No se aprecian resultados cuantificables del módulo de Poisson en la Figura 5.127 para los sistemas 1B, 2A, 3A y 4A, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dicho sistema cementante

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.127, se observa que bajo la condición A el sistema 1 es el que aporta resultado del módulo de Young y bajo la condición B es el sistema 2 el que aporta. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo la condición A no se obtienen resultados, bajo la condición B es el sistema 4 el que tiene mayor módulo de Young que el sistema 3 y bajo la condición C el comportamiento es inverso. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 12 h las lechadas con cemento clase G y H tanto puras como aditivadas no tiene un patrón concreto. El sistema 2 bajo la condición B es el que tiene mayor módulo de Young al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.128 se observan los resultados del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 16 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

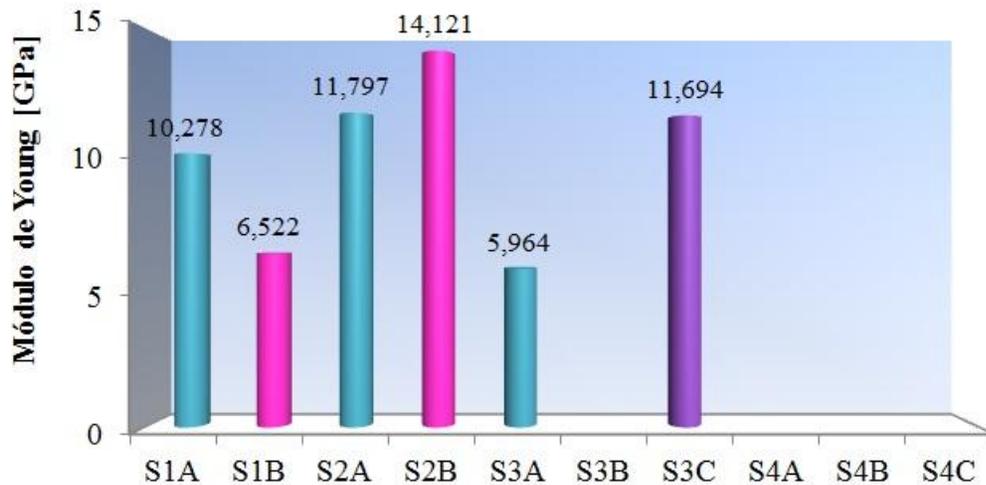


Figura 5.128. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.

No se aprecian resultados cuantificables del módulo de Young en la Figura 5.128 para los sistemas 3B, 4A, 4B y 4C, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dichos sistemas cementantes.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.128, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor módulo de Young que el sistema 1. Al aditivar las lechadas, a las que se le pudo determinar el módulo de Young son al sistema 3A y 3C, sin poder identificar un patrón para las mismas. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 16 h las lechadas puras con cemento clase H presentan mayor módulo de Young que las lechadas puras con cemento clase G, sin embargo, al aditivar las lechadas, no se puede establecer un patrón. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que tiene mayor módulo de Young al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.129 se observan los resultados del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 20 horas durante el ensayo acústico no destructivo.



Figura 5.129. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.

No se aprecian resultados cuantificables del módulo de Young en la Figura 5.129 para el sistema 3A, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dicho sistema cementante.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.129, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor módulo de Young que el sistema 1. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo la condición A el sistema 4 es el que aporta resultados, sin poder identificarse un patrón, bajo la condición B el sistema 4 presenta mayor módulo de Young que el sistema 3 y bajo la condición C, el comportamiento es inverso. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 20 h las lechadas puras con cemento clase H presentan mayor módulo de Young que las lechadas puras con cemento clase G, asimismo, se observa que a mayor temperatura mayor módulo de Young. Al aditivar las lechadas, no se puede establecer un patrón concreto, no obstante se puede indicar que de igual forma que con los diseños de cemento puro, a mayor temperatura mayor módulo de Young. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que tiene mayor módulo de Young al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.130 se observan los resultados del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 24 horas durante el ensayo acústico no destructivo.



Figura 5.130. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.130, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor módulo de Young que el sistema 1. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 4 presenta mayor módulo de Young que el sistema 3, no obstante, bajo la condición C el comportamiento es inverso. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 24 h las lechadas puras con cemento clase H presentan mayor módulo de Young que las lechadas puras con cemento clase G, asimismo, se observa que a mayor temperatura mayor módulo de Young. Al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase H aditivado presenta mayor módulo de Young que el diseño con cemento clase G aditivado, a excepción de los resultados bajo la condición C donde se invierte este comportamiento. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que tiene mayor módulo de Young al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.131 se observan los resultados del módulo de Young para los diferentes sistemas cementantes curados por 48 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

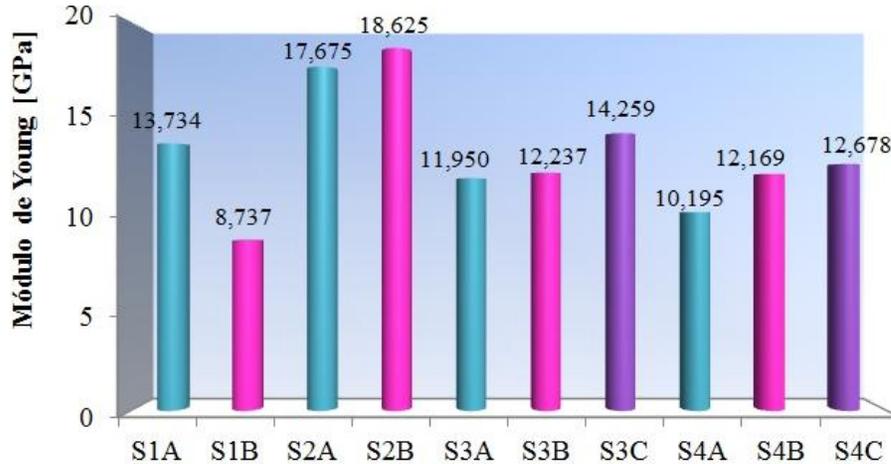


Figura 5.131. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Young en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.131, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor módulo de Young que el sistema 1. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo las condiciones A, B y C el sistema 3 presenta mayor módulo de Young que el sistema 4. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 48 h las lechadas puras con cemento clase H presentan mayor módulo de Young que las lechadas puras con cemento clase G. Al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor módulo de Young que el diseño con cemento clase H aditivado. Asimismo, se observa que en las lechadas tanto puras como aditivadas a mayor temperatura mayor módulo de Young. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que tiene mayor módulo de Young al compararlo con los restantes.

Finalmente se tiene que en las primeras horas de curado no se obtuvo resultados del módulo de Young porque las lechadas no habían fraguado completamente y los sensores del equipo no podían determinar la velocidad de propagación de la onda S y así poder calcular el módulo de Young. Asimismo, se deduce que las lechadas puras

con cemento clase H presentan mayor módulo de Young que las lechadas puras con cemento clase G, sin embargo, al aditivar las lechadas, no se identifica un patrón único. Asimismo, se infiere a grandes rasgos, que para los diseños de las lechadas tanto puras como aditivadas a mayor temperatura mayor módulo de Young. Para los diferentes tiempos de curados el sistema 2 bajo la condición B presenta el mayor módulo de Young al compararlo con los restantes diseños.

5.5.7. Análisis de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico

No se aprecian resultados cuantificables del módulo de Bulk para los diferentes sistemas cementantes curados por 4 horas, esto se debe a que las lechadas no están totalmente fraguadas, parte de ellas se encuentran en estado líquido y no se puede determinar la velocidad de propagación de la onda S para posteriormente calcular los módulos elásticos. Este comportamiento era predecible, ya que en el ensayo de tiempo de espesamiento para cada uno de estos sistemas se había descartado el ensayo para 4 h. Asimismo, se puede acotar que los sistemas cementantes 3 y 4 están diseñados con aditivos entre los cuales está un retardador, lo que ocasiona un incremento del tiempo de espesamiento de la lechada y por tanto un retardo en el fraguado.

En la Figura 5.132 se observan los resultados del módulo de Bulk para los diferentes sistemas cementantes curados por 8 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

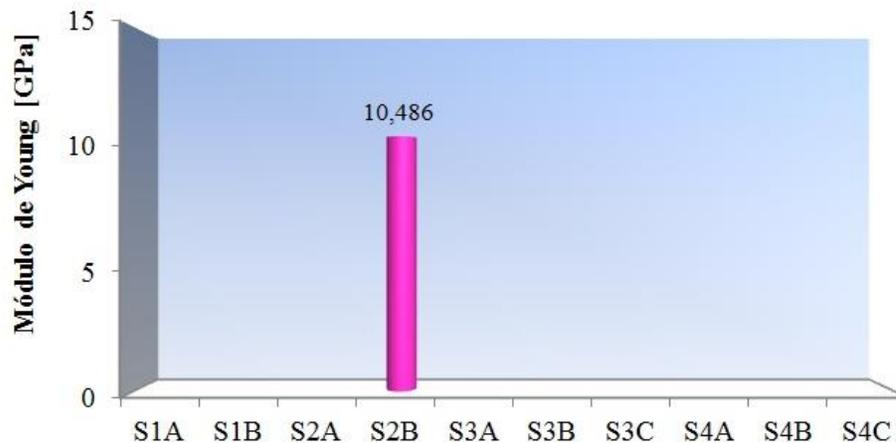


Figura 5.132. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.

No se aprecian resultados cuantificables del módulo de Bulk en la Figura 5.132 para los sistemas 1A, 1B, 2A, 3A, 3B, 3C, 4A, 4B y 4C, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dichos sistemas cementantes. El sistema 2 bajo la condición B es el único que aportó un resultado cuantificable del módulo de Bulk.

En la Figura 5.133 se observan los resultados del módulo de Bulk para los diferentes sistemas cementantes curados por 12 horas durante el ensayo acústico no destructivo.



Figura 5.133. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.

No se aprecian resultados cuantificables del módulo de Bulk en la Figura 5.133 para los sistemas 1B, 2A, 3A y 4A, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dichos sistemas cementantes.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.133, se observa que bajo la condición A el sistema 1 es el que aporta resultado del módulo de Bulk y bajo la condición B es el sistema 2 el que aporta. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo la condición A no se obtienen resultados, bajo la condición B es el sistema 4 el que tiene mayor módulo de Bulk que el sistema 3 y

bajo la condición C el comportamiento es inverso. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 12 h las lechadas con cemento clase G y H tanto puras como aditivadas no tiene un patrón concreto. El sistema 2 bajo la condición B es el que presenta mayor módulo de Bulk al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.134 se observan los resultados del módulo de Bulk para los diferentes sistemas cementantes curados por 16 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

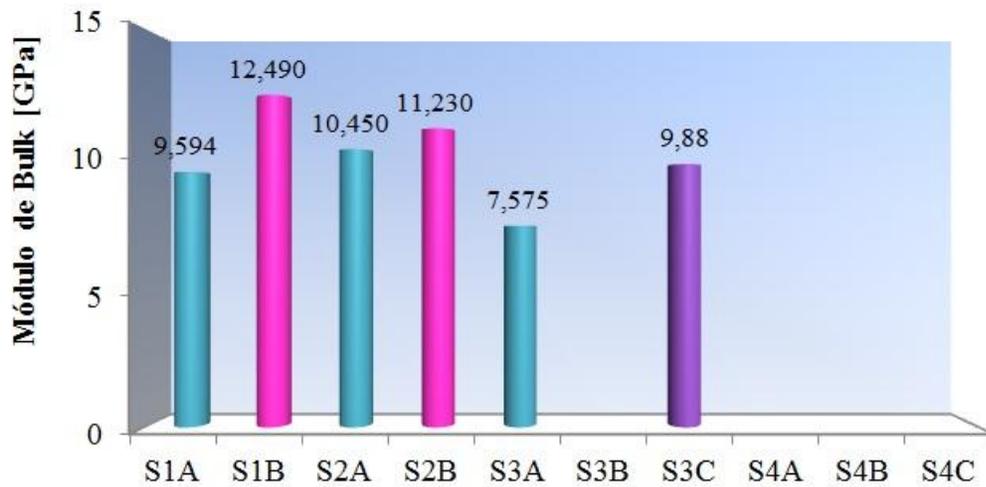


Figura 5.134. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.

No se aprecian resultados cuantificables del módulo de Bulk en la Figura 5.134 para los sistemas 3B, 4A, 4B y 4C, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dichos sistemas cementantes.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.134, se tiene que bajo la condición A el sistema 2 presenta mayor módulo de Bulk que el sistema 1 y bajo la condición B, el comportamiento es inverso. Al aditivar las lechadas, a las que se le pudo determinar el módulo de Bulk son al sistema 3A y 3C, sin poder identificar un patrón para las mismas. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 16 h las lechadas con cemento clase G y H tanto puras como aditivadas no presentan un patrón concreto, sin embargo, se observa que a mayor

temperatura mayor módulo de Bulk. El sistema 1 bajo la condición B es el que tiene mayor módulo de Bulk al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.135 se observan los resultados del módulo de Bulk para los diferentes sistemas cementantes curados por 20 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

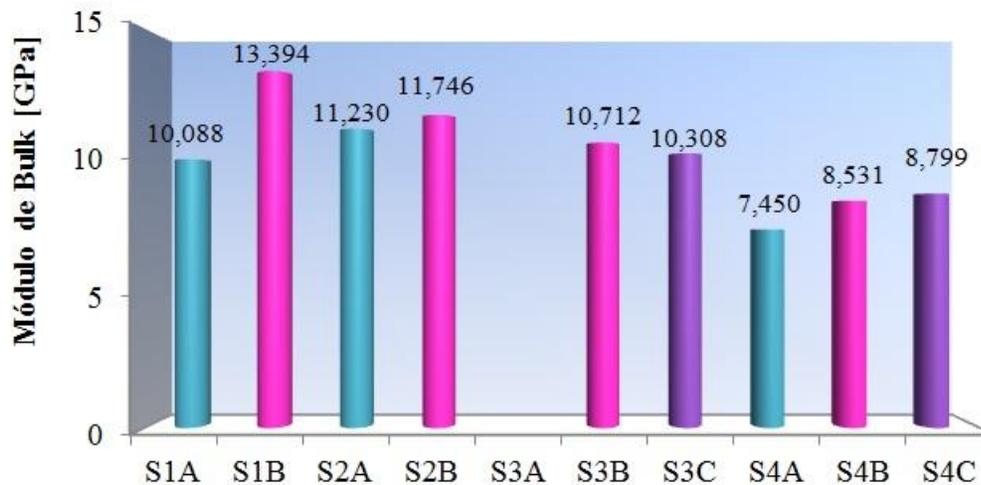


Figura 5.135. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.

No se aprecian resultados cuantificables del módulo de Bulk en la Figura 5.135 para el sistema 3A, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dicho sistema cementante.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.135, se tiene que bajo la condición A el sistema 2 presenta mayor módulo de Bulk que el sistema 1 y bajo la condición B, el comportamiento es inverso. Al aditar las lechadas, se tiene que bajo la condición A el sistema 4 es el que aporta resultados, sin poder identificarse un patrón, bajo las condiciones B y C el sistema 3 presenta mayor módulo de Bulk que el sistema 4. Para un tiempo de curado de 20 h no se puede establecer un patrón concreto para las lechadas puras, ya que tiene un comportamiento inverso, para menor temperatura (100 °F) el cemento clase H presenta mayor módulo de Bulk y para una mayor temperatura (140 °F) el cemento

clase G presenta mayor módulo. Al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor módulo de Bulk que el diseño con cemento clase H aditivado. Asimismo, se observa que en las lechadas tanto puras como aditivadas a mayor temperatura mayor módulo de Bulk. El sistema 1 bajo la condición B nuevamente es el que tiene mayor módulo de Bulk al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.136 se observan los resultados del módulo de Bulk para los diferentes sistemas cementantes curados por 24 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

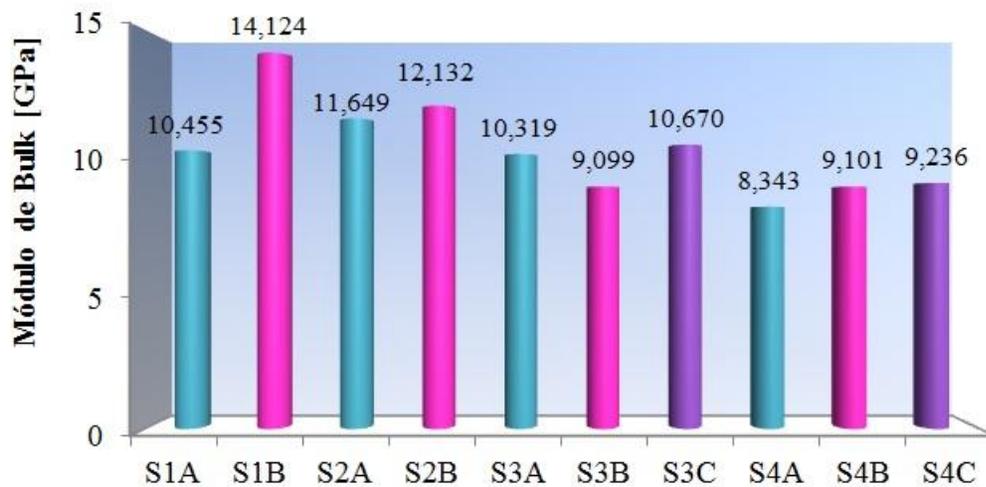


Figura 5.136. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.136, se tiene que bajo la condición A el sistema 2 presenta mayor módulo de Bulk que el sistema 1 y bajo la condición B, el comportamiento es inverso. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo las condiciones A y C el sistema 3 presenta mayor módulo de Bulk que el sistema 4, no obstante, bajo la condición C el comportamiento es inverso. Para un tiempo de curado de 24 h no se puede establecer un patrón concreto para las lechadas puras, ya que tiene un comportamiento inverso, para menor temperatura (100 °F) el cemento clase H presenta mayor módulo de Bulk y para una mayor temperatura (140 °F) el cemento clase G presenta mayor módulo. Al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor módulo de Bulk que el diseño con

cemento clase H aditivado, a excepción de los resultados bajo la condición B donde se invierte este comportamiento. El sistema 1 bajo la condición B nuevamente es el que tiene mayor módulo de Bulk al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.137 se observan los resultados del módulo de Bulk para los diferentes sistemas cementantes curados por 48 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

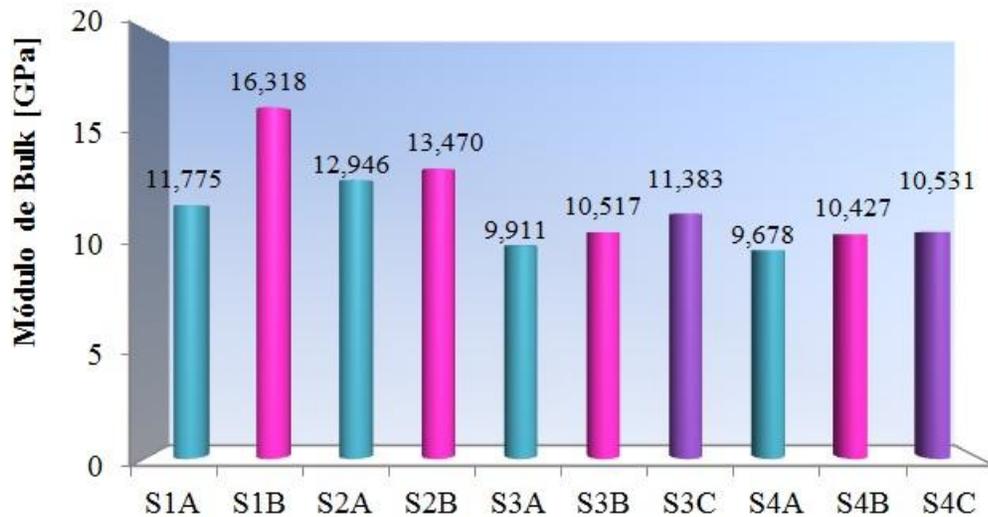


Figura 5.137. Gráfica Comparativa de los Resultados del Módulo de Bulk en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.137, se tiene que bajo la condición A el sistema 2 presenta mayor módulo de Bulk que el sistema 1 y bajo la condición B, el comportamiento es inverso. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo las condiciones A, B y C el sistema 3 presenta mayor módulo de Bulk que el sistema 4. Para un tiempo de curado de 48 h no se puede establecer un patrón concreto para las lechadas puras, ya que tiene un comportamiento inverso, para menor temperatura (100 °F) el cemento clase H presenta mayor módulo de Bulk y para una mayor temperatura (140 °F) el cemento clase G presenta mayor módulo. Al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor módulo de Bulk que el diseño con cemento clase H aditivado. Asimismo, se observa que en las lechadas tanto puras como aditivadas a mayor temperatura mayor módulo de

Bulk. El sistema 1 bajo la condición B nuevamente es el que tiene mayor módulo de Bulk al compararlo con los restantes.

Finalmente se tiene que en las primeras horas de curado no se obtuvo resultados del módulo de Bulk porque las lechadas no habían fraguado completamente y los sensores del equipo no podían determinar la velocidad de propagación de la onda S y así poder calcular el módulo de Bulk. No se puede establecer un patrón concreto para las lechadas puras, ya que presentan un comportamiento inverso, sin embargo, se puede indicar que para menor temperatura (100 °F) el cemento clase H presenta mayor módulo de Bulk y para una mayor temperatura (140 °F) el cemento clase G presenta mayor módulo. Al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor módulo de Bulk que el diseño con cemento clase H aditivado. Asimismo, se infiere a grandes rasgos, que para los diseños de las lechadas tanto puras como aditivadas a mayor temperatura mayor módulo de Bulk. Para los diferentes tiempos de curados el sistema 1 bajo la condición B presenta el mayor módulo de Bulk al compararlo con los restantes diseños.

5.5.8. Análisis de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico

No se aprecian resultados cuantificables del primer coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 4 horas, esto se debe a que las lechadas no están totalmente fraguadas, parte de ellas se encuentran en estado líquido y no se puede determinar la velocidad de propagación de la onda S para posteriormente calcular los módulos elásticos. Este comportamiento era predecible, ya que en el ensayo de tiempo de espesamiento para cada uno de estos sistemas se había descartado el ensayo para 4 h. Asimismo, se puede acotar que los sistemas cementantes 3 y 4 están diseñados con aditivos entre los cuales está un retardador, lo que ocasiona un incremento del tiempo de espesamiento de la lechada y por tanto un retardo en el fraguado.

En la Figura 5.138 se observan los resultados del primer coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 8 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

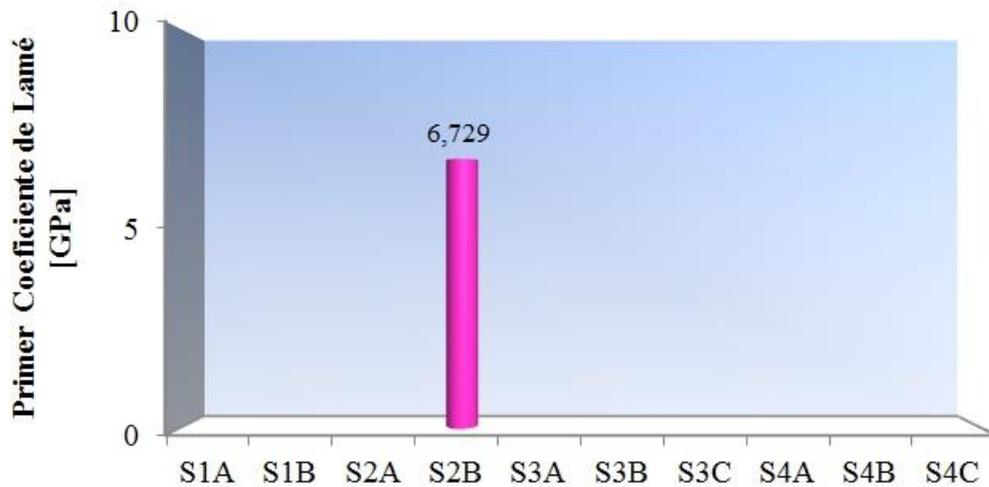


Figura 5.138. Gráfica Comparativa de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.

No se aprecian resultados cuantificables del primer coeficiente de Lamé en la Figura 5.138 para los sistemas 1A, 1B, 2A, 3A, 3B, 3C, 4A, 4B y 4C, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dichos sistemas cementantes. El sistema 2 bajo la condición B es el único que aportó un resultado cuantificable del primer coeficiente de Lamé.

En la Figura 5.139 se observan los resultados del primer coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 12 horas durante el ensayo acústico no destructivo.



Figura 5.139. Gráfica Comparativa de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.

No se aprecian resultados cuantificables del primer coeficiente de Lamé en la Figura 5.139 para los sistemas 1B, 2A, 3A y 4A, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dichos sistemas cementantes.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.139, se observa que bajo la condición A el sistema 1 es el que aporta resultado del primer coeficiente de Lamé y bajo la condición B es el sistema 2 el que aporta. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo la condición A no se obtienen resultados, bajo la condición B el sistema 4 presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé que el sistema 3 y bajo la condición C el comportamiento es inverso. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 12 h las lechadas con cemento clase G y H tanto puras como aditivadas no tiene un patrón concreto. El sistema 2 bajo la condición B es el que presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.140 se observan los resultados del primer coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 16 horas durante el ensayo acústico no destructivo.



Figura 5.140. Gráfica Comparativa de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.

No se aprecian resultados cuantificables del primer coeficiente de Lamé en la Figura 5.140 para los sistemas 3B, 4A, 4B y 4C, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dichos sistemas cementantes.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.140, se tiene que bajo la condición A el sistema 2 presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé que el sistema 1 y bajo la condición B, el comportamiento es inverso. Al aditivar las lechadas, a las que se le pudo determinar el primer coeficiente de Lamé son al sistema 3A y 3C, sin poder identificar un patrón para las mismas. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 16 h las lechadas con cemento clase G y H tanto puras como aditivadas no presentan un patrón concreto, sin embargo, se observa que a mayor temperatura mayor valor del primer coeficiente de Lamé. El sistema 1 bajo la condición B es el que tiene mayor valor del primer coeficiente de Lamé al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.141 se observan los resultados del primer coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 20 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

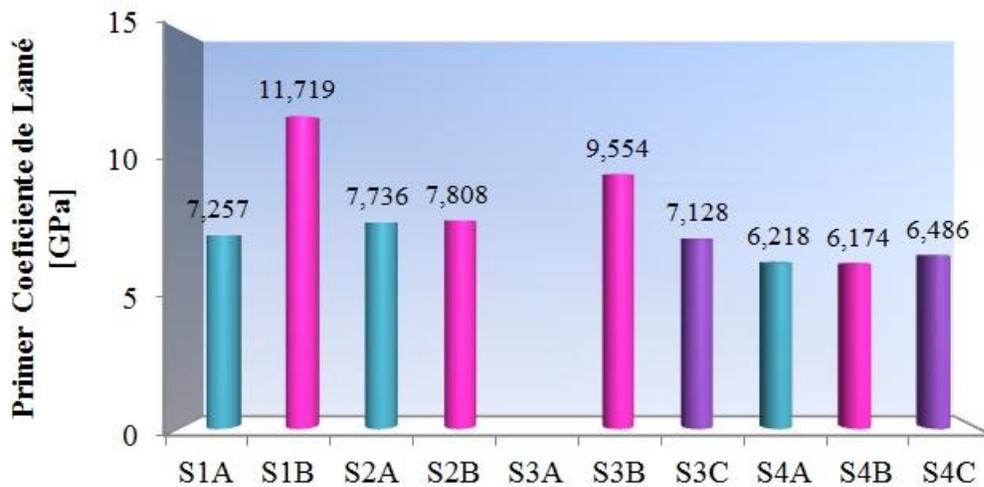


Figura 5.141. Gráfica Comparativa de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.

No se aprecian resultados cuantificables del primer coeficiente de Lamé en la Figura 5.141 para el sistema 3A, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dicho sistema cementante.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.141, se tiene que bajo la condición A el sistema 2 presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé que el sistema 1 y bajo la condición B, el comportamiento es inverso. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo la condición A el sistema 4 es el que aporta resultados, sin poder identificarse un patrón, bajo las condiciones B y C el sistema 3 presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé que el sistema 4. Para un tiempo de curado de 20 h no se puede establecer un patrón concreto para las lechadas puras, ya que tiene un comportamiento inverso, para menor temperatura (100 °F) el cemento clase H presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé y para una mayor temperatura (140 °F) el cemento clase G presenta mayor el coeficiente. Al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé que el diseño con cemento clase H aditivado. Asimismo, se observa que en las lechadas tanto puras como aditivadas a

mayor temperatura mayor valor del primer coeficiente de Lamé. El sistema 1 bajo la condición B nuevamente es el que tiene mayor valor del primer coeficiente de Lamé al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.142 se observan los resultados del primer coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 24 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

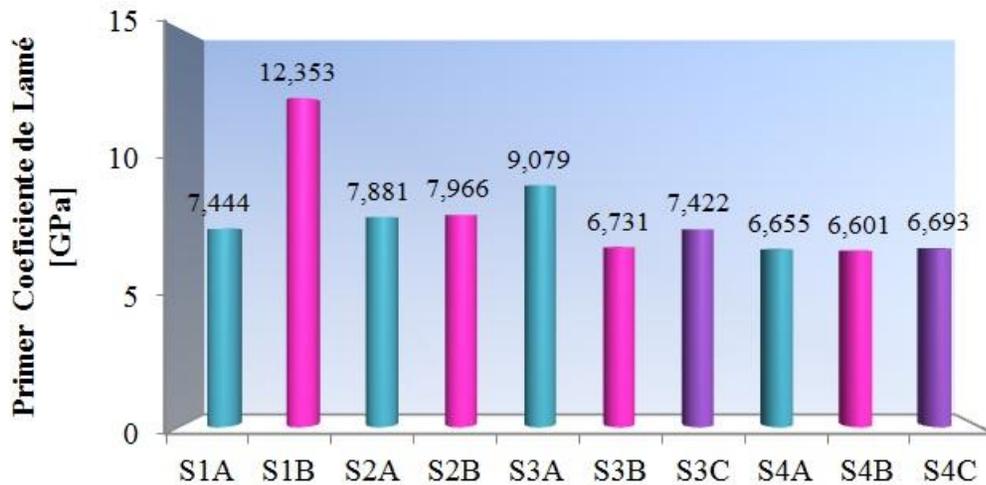


Figura 5.142. Gráfica Comparativa de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.142, se tiene que bajo la condición A el sistema 2 presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé que el sistema 1 y bajo la condición B, el comportamiento es inverso. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo las condiciones A y C el sistema 3 presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé que el sistema 4, no obstante, bajo la condición C el comportamiento es inverso. Para un tiempo de curado de 24 h no se puede establecer un patrón concreto para las lechadas puras, ya que tiene un comportamiento inverso, para menor temperatura (100 °F) el cemento clase H presenta mayor módulo de Bulk y para una mayor temperatura (140 °F) el cemento clase G presenta mayor módulo. Al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé que el diseño con

cemento clase H aditivado, a excepción de los resultados bajo la condición B donde se invierte este comportamiento. El sistema 1 bajo la condición B nuevamente es el que presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.143 se observan los resultados del primer coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 48 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

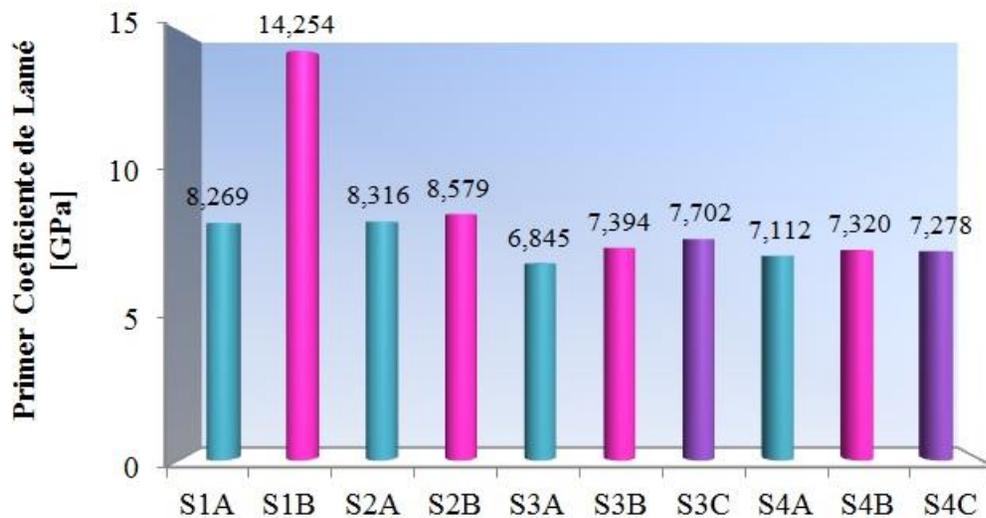


Figura 5.143. Gráfica Comparativa de los Resultados del Primer Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.143, se tiene que bajo la condición A el sistema 2 presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé que el sistema 1 y bajo la condición B, el comportamiento es inverso. Al aditar las lechadas, se tiene que bajo las condiciones B y C el sistema 3 presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé que el sistema 4, no obstante, bajo la condición A el comportamiento es inverso. Para un tiempo de curado de 48 h no se puede establecer un patrón concreto para las lechadas puras, ya que tiene un comportamiento inverso, para menor temperatura (100 °F) el cemento clase H presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé y para una mayor temperatura (140 °F) el cemento clase G presenta mayor coeficiente. Al aditar las lechadas, el

diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé que el diseño con cemento clase H aditivado, a excepción de los resultados bajo la condición A donde se invierte este comportamiento. Asimismo, se observa a grandes rasgos, que en las lechadas tanto puras como aditivadas a mayor temperatura mayor valor del primer coeficiente de Lamé. El sistema 1 bajo la condición B nuevamente es el que tiene mayor valor del primer coeficiente de Lamé al compararlo con los restantes.

Finalmente se tiene que en las primeras horas de curado no se obtuvo resultados del primer coeficiente de Lamé porque las lechadas no habían fraguado completamente y los sensores del equipo no podían determinar la velocidad de propagación de la onda S y así poder calcular el primer coeficiente de Lamé. No se puede establecer un patrón concreto para las lechadas puras, ya que presentan un comportamiento inverso, sin embargo, se puede indicar que para menor temperatura (100 °F) el cemento clase H presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé y para una mayor temperatura (140 °F) el cemento clase G presenta mayor coeficiente. Al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor valor del primer coeficiente de Lamé que el diseño con cemento clase H aditivado. Asimismo, se infiere a grandes rasgos, que para los diseños de las lechadas tanto puras como aditivadas a mayor temperatura mayor valor del primer coeficiente de Lamé. Para los diferentes tiempos de curados el sistema 1 bajo la condición B presenta el mayor valor del primer coeficiente de Lamé al compararlo con los restantes diseños.

5.5.9. Análisis de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico

No se aprecian resultados cuantificables del segundo coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 4 horas, esto se debe a que las lechadas no están totalmente fraguadas, parte de ellas se encuentran en estado líquido y no se puede determinar la velocidad de propagación de la onda S para posteriormente calcular los módulos elásticos. Este comportamiento era predecible, ya que en el ensayo de tiempo de espesamiento para cada uno de estos sistemas se había

descartado el ensayo para 4 h. Asimismo, se puede acotar que los sistemas cementantes 3 y 4 están diseñados con aditivos entre los cuales está un retardador, lo que ocasiona un incremento del tiempo de espesamiento de la lechada y por tanto un retardo en el fraguado.

En la Figura 5.144 se observan los resultados del segundo coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 8 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

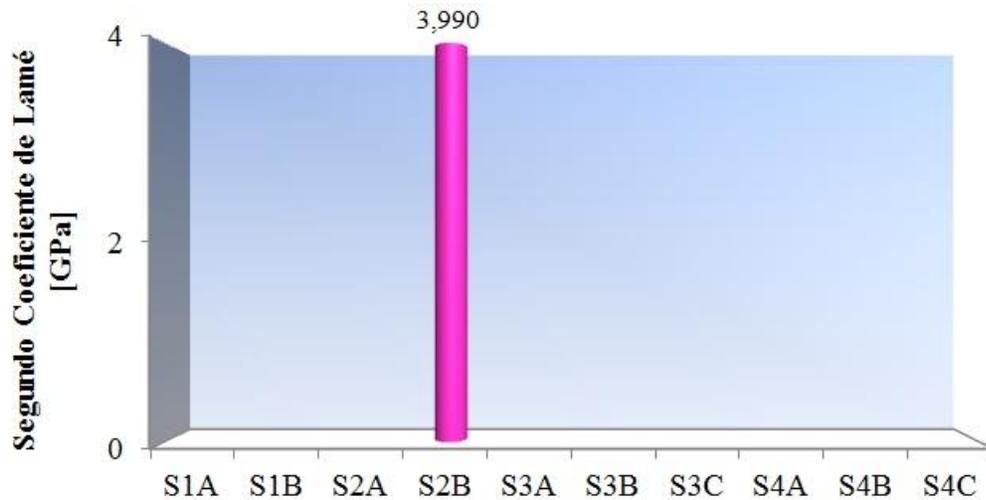


Figura 5.144. Gráfica Comparativa de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 8 h.

No se aprecian resultados cuantificables del segundo coeficiente de Lamé en la Figura 5.144 para los sistemas 1A, 1B, 2A, 3A, 3B, 3C, 4A, 4B y 4C, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dichos sistemas cementantes. El sistema 2 bajo la condición B es el único que aportó un resultado cuantificable del segundo coeficiente de Lamé.

En la Figura 5.145 se observan los resultados del segundo coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 12 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

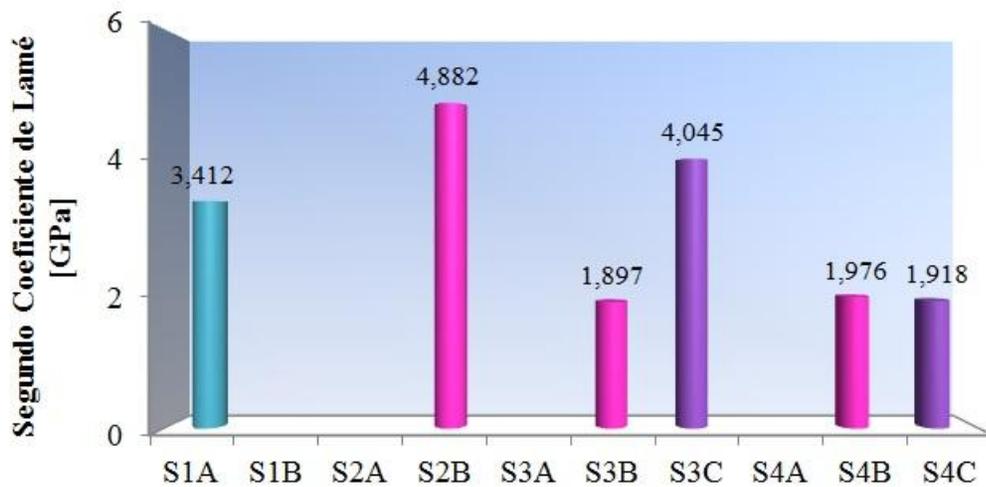


Figura 5.145. Gráfica Comparativa de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 12 h.

No se aprecian resultados cuantificables del segundo coeficiente de Lamé en la Figura 5.145 para los sistemas 1B, 2A, 3A y 4A, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dichos sistemas cementantes.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.145, se observa que bajo la condición A el sistema 1 es el que aporta resultado del segundo coeficiente de Lamé y bajo la condición B es el sistema 2 el que aporta. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo la condición A no se obtienen resultados, bajo la condición B el sistema 4 presenta mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que el sistema 3 y bajo la condición C el comportamiento es inverso. Con lo que se puede inferir que para un tiempo de curado de 12 h las lechadas con cemento clase G y H tanto puras como aditivadas no tiene un patrón concreto. El sistema 2 bajo la condición B es el que presenta mayor valor del segundo coeficiente de Lamé al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.146 se observan los resultados del segundo coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 16 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

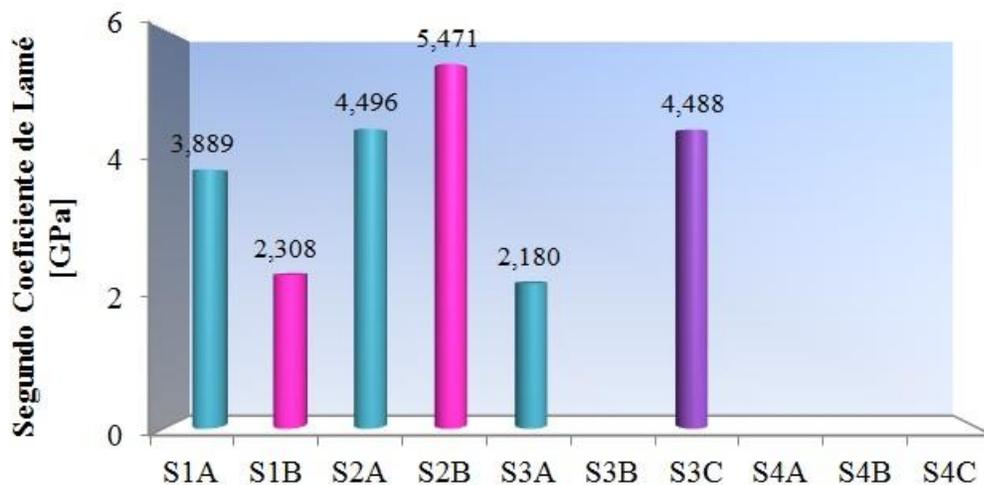


Figura 5.146. Gráfica Comparativa de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 16 h.

No se aprecian resultados cuantificables del segundo coeficiente de Lamé en la Figura 5.146 para los sistemas 3B, 4A, 4B y 4C, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dichos sistemas cementantes.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.146, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que el sistema 1. Al aditivar las lechadas, a las que se le pudo determinar el segundo coeficiente de Lamé son al sistema 3A y 3C, sin poder identificar un patrón para las mismas. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 16 h las lechadas puras con cemento clase H presentan mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que las lechadas puras con cemento clase G. Al aditivar las lechadas, estas no presentan un patrón concreto, sin embargo, a grandes rasgos se puede indicar que a mayor temperatura mayor valor del segundo coeficiente de Lamé. El sistema 2 bajo la condición B es el que tiene mayor valor del segundo coeficiente de Lamé al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.147 se observan los resultados del segundo coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 20 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

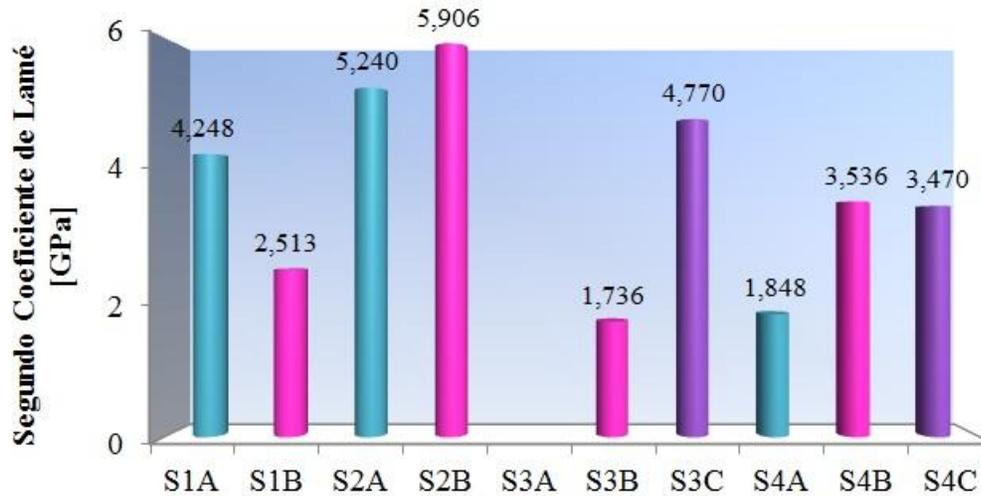


Figura 5.147. Gráfica Comparativa de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 20 h.

No se aprecian resultados cuantificables del segundo coeficiente de Lamé en la Figura 5.147 para el sistema 3A, esto se debe a que los sensores del equipo no reportaron valores de la velocidad de propagación de onda S y por lo tanto, no se pueden determinar los módulos elásticos de dicho sistema cementante.

Al comparar los sistemas que si aportaron un resultado cuantificable en la Figura 5.147, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que el sistema 1. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo la condición A el sistema 4 es el que aporta resultados, sin poder identificarse un patrón, bajo la condición B el sistema 4 presenta mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que el sistema 3 y bajo la condición C el comportamiento es inverso. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 20 h las lechadas puras con cemento clase H presentan mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que las lechadas puras con cemento clase G. Al aditivar las lechadas, estas no presentan un

patrón concreto. El sistema 2 bajo la condición B es el que presenta mayor valor del segundo coeficiente de Lamé al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.148 se observan los resultados del segundo coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 24 horas durante el ensayo acústico no destructivo.

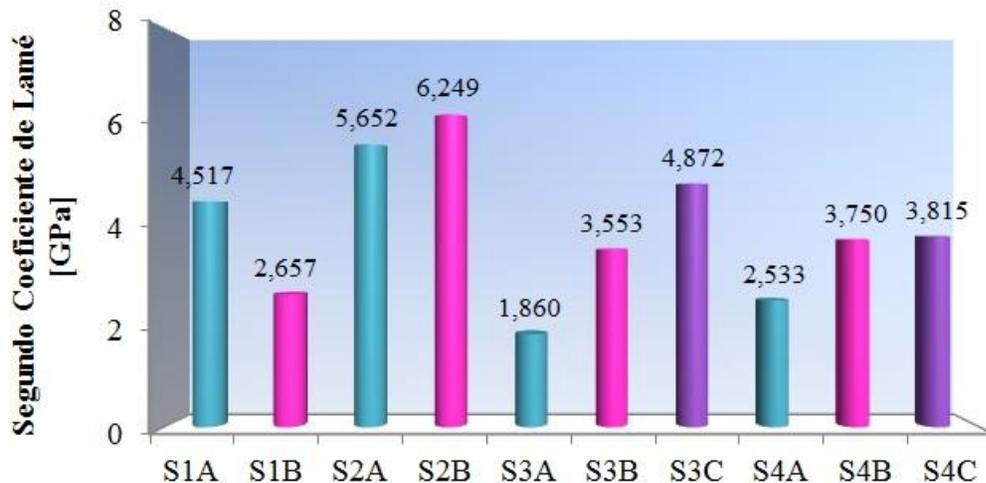


Figura 5.148. Gráfica Comparativa de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 24 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.148, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que el sistema 1. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 3 presenta mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que el sistema 4, no obstante, bajo la condición C el comportamiento es inverso. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 24 h las lechadas puras con cemento clase H presentan mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que las lechadas puras con cemento clase G. Al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que el diseño con cemento clase H aditivado, a excepción de los resultados bajo la condición C donde se invierte este comportamiento. El sistema 2 bajo la condición B

nuevamente es el que presenta mayor valor del segundo coeficiente de Lamé al compararlo con los restantes.

En la Figura 5.149 se observan los resultados del segundo coeficiente de Lamé para los diferentes sistemas cementantes curados por 48 horas durante el ensayo acústico no destructivo.



Figura 5.149. Gráfica Comparativa de los Resultados del Segundo Coeficiente de Lamé en el Ensayo Acústico para los diferentes Sistemas Cementantes Curados a 48 h.

Al comparar los resultados de los sistemas cementantes en la Figura 5.149, se tiene que bajo las condiciones A y B el sistema 2 presenta mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que el sistema 1. Al aditivar las lechadas, se tiene que bajo las condiciones A, B y C el sistema 3 presenta mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que el sistema 4. Con esto, se puede inferir que para un tiempo de curado de 48 h las lechadas puras con cemento clase H presentan mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que las lechadas puras con cemento clase G. Al aditivar las lechadas, el diseño con cemento clase G aditivado presenta mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que el diseño con cemento clase H aditivado. Asimismo, se observa a grandes rasgos, que en las lechadas tanto puras como aditivadas a mayor temperatura mayor valor del segundo coeficiente de Lamé. El sistema 2 bajo la condición B nuevamente es el que tiene mayor valor del segundo coeficiente de Lamé al compararlo con los restantes.

Finalmente se tiene que en las primeras horas de curado no se obtuvo resultados del segundo coeficiente de Lamé porque las lechadas no habían fraguado completamente y los sensores del equipo no podían determinar la velocidad de propagación de la onda S y así poder calcular el primer coeficiente de Lamé. Asimismo, se deduce que las lechadas puras con cemento clase H presentan mayor valor del segundo coeficiente de Lamé que las lechadas puras con cemento clase G, sin embargo, al aditar las lechadas, no se identifica un patrón único. Asimismo, se infiere a grandes rasgos, que para los diseños de las lechadas tanto puras como aditivadas a mayor temperatura mayor valor del segundo coeficiente de Lamé. Para los diferentes tiempos de curados el sistema 2 bajo la condición B presenta el mayor valor del segundo coeficiente de Lamé al compararlo con los restantes diseños.

5.5.10. Análisis de los Módulos Elásticos de la Formación y la Lechada

El sistema cementante que se utilizó para la completación del pozo TRV-6X a la profundidad de 5900' a 6400' es el sistema 3C correspondiente al diseño con cemento clase G más aditivos el cual se evaluó a una temperatura de 168 °F y una presión de 3000 psi. A esta profundidad la perforación del pozo atraviesa la Formación Carapita, como se indicó en el Capítulo III en la descripción del área en estudio, esta formación es característica por presentar lutitas.

En la Tabla 5.47 se observan los resultados de los módulos elásticos tanto de la formación como del sistema cementante que se empleó para la completación del pozo.

Tabla 5.47. Tabla Comparativa de los Resultados de las Constantes Elásticas de la Formación y el Diseño Cementante S3

	v [adim]	E [GPa]	K [GPa]	λ [GPa]	μ [GPa]
Formación	0,3889	7,9879	11,9858	10,0688	2,8756
S3C	0,2912	14,2590	11,3832	7,7022	5,5215

Al realizar ensayos acústicos en la formación mediante la propagación de ondas, se obtiene velocidades de onda S altas, lo que hace suponer que se está en presencia de arenas no consolidadas poniéndose en contraposición con las características de la formación Carapita donde las lutitas son características. Se realizan estudios sedimentológicos y mineralógicos que evidencian que las lutitas perforadas son laminares, lo que induce se registren velocidades altas de la onda S. Estos resultados reflejan que los planos de laminación de la lutita y el plano de propagación de la onda S son paralelos identificándose erróneamente el mineral.

Al comparar los resultados de la Tabla 5.47 de los módulos elásticos de la formación y el diseño de la lechada que se utilizó en la completación del pozo TRV-6X, se evidencia que el módulo de Young de la lechada es mayor que el de la formación y la relación de Poisson de la lechada es menor que la de la formación. Estos valores lo que indican es que la lechada utilizada no será de fácil fracturamiento, asimismo contribuirá a evitar las microfallas producto de los esfuerzos tectónicos y así, el sello hidráulico no se verá comprometido.

CONCLUSIONES

1. Se realizaron un total de 306 pruebas para caracterizar las propiedades del cemento: 6 para el control de calidad, 10 para el tiempo de espesamiento, 280 para el ensayo mecánico, 10 para el ensayo acústico. Cabe destacar, que no se contabilizaron las pruebas que se descartaron por fallas en los equipos.
2. En el ensayo mecánico para los diferentes tiempos de curado, el diseño con cemento clase H puro evaluado a 140 °F y presión atmosférica presenta los mayores valores de resistencia a la compresión, módulo de Young y energía de deformación.
3. En el ensayo acústico para los diferentes tiempos de curado, el diseño con cemento clase H puro evaluado a 140 °F y presión atmosférica presenta los mayores valores de resistencia a la compresión y módulo de Young.
4. En el ensayo acústico para los diferentes tiempos de curado, el diseño con cemento clase H puro evaluado a 140 °F y presión atmosférica presenta la menor relación de Poisson.
5. En el ensayo acústico para los diferentes tiempos de curado, el diseño con cemento clase G puro evaluado a 140 °F y presión atmosférica presenta los mayores valores de módulo de Bulk, primer y segundo coeficiente de Lamé.
6. El comportamiento de los módulos elásticos de la formación y el diseño de la lechada que se utilizó en la completación del pozo TRV-6X, cemento clase G aditivado es apto, estos valores evidencian que la lechada utilizada no será de fácil fracturamiento, asimismo contribuirá a evitar las microfallas producto de los esfuerzos tectónicos y por ende, el sello hidráulico no se verá comprometido.

RECOMENDACIONES

1. Determinar los módulos elásticos estáticos de los diferentes diseños cementantes tomando en cuenta la deformación lateral de las muestras.
2. Determinar los módulos elásticos estáticos a través del ensayo de resistencia a la compresión triaxial.
3. Realizar simultáneamente el ensayo de resistencia a la compresión destructivo y el ensayo acústico, para comparar las emisiones acústicas entre en el ensayo destructivo y no destructivo.
4. Realizar el ensayo mecánico a muestras de la formación Carapita para compararlas con los resultados de los módulos elásticos estáticos.
5. Reparar fallas en los sensores de la prensa mecánica utilizada para el ensayo de resistencia a la compresión.
6. Calibrar los equipos según los requisitos establecidos en las normas de calidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gomá, F. (1979) El cemento Portland y otros aglomerantes. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S. A.
- [2] Hugon, A. & Serre, M. (1982) Enciclopedia de la Construcción: Técnicas de Construcción. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S. A.
- [3] Barron, A. (2009) Chemical Composition of Portland Cement. Consultado el 11 de Mayo de 2010, <http://cnx.org/content/m16445/latest/>
- [4] American Petroleum Institute, API. (2010) 2010 Publications Programs and Services. Washington, DC: API Publishing.
- [5] Nelson, E. (1990) Well Cementing. Sugar Land: Schlumberger Educational Services
- [6] Fjaer, E., Holt, R., Horsrud, P. Raaen, A. & Risnes, R. (1992). Petroleum Related Rocks Mechanics. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.
- [7] Kearey, P., Brooks, M. & Hill, I.(1984) An Introduction to Geophysical Exploration. Oxford: Blackwell Science Ltd.
- [8] Mavko, G., Mukerji, T, & Dvorki, J. (1998) The Rocks Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis in Porous Media. Cambridge: Cambridge University Press.
- [9] Cook, N., Jaeger, J & Zimmerman, R. (1969) Fundamentals of Rock Mechanics. New York: Blackwell Publishing.
- [10] Hudson, J. A. (1981) Wave speed and attenuation of elastic waves in materials. Houston: Geophysical Journal International.

-
- [11] PDVSA Intevep. (2011). Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela.
- [12] Schlumberger (1997) WEC. Evaluación de Pozos. Caracas: Schlumber Oilfield Services
- [13] Bosset, J. & Gou, Y. (2004). Revisión Modelo Estructural. Exploración y Producción PDVSA, Estudios Integrados Norte de Monagas. Puerto La Cruz, Venezuela. Documento Confidencial.
- [14] Subieta, T. (1988) Evolución tectonoestratigráfica de la Serranía del Interior y de la subcuenca de Maturín. Simposio: Sociedad Venezolana de Geólogos. Caracas, Venezuela.
- [15] PDVSA Exploración y Producción. (2010) Programa de Perforación Campo Travi Norte. Gerencia de Ingeniería de Perforación y Rehabilitación. Estudios de Yacimiento. Puerto La Cruz, Estado Anzoátegui. Documento Confidencial.
- [16] PDVSA Exploración y Producción. (2009) Informe Técnico Proyecto PGP Travi-Cotoperí. Gerencia de Proyectos Exploratorios. Puerto La Cruz, Estado Anzoátegui. Documento Confidencial
- [17] Arias, F. (1999) El proyecto de investigación, guía para su elaboración. 3ra edición. Caracas: Editorial Episteme
- [18] Balestrini, M. (2001). Como se elabora el proyecto de investigación. Caracas: Consultores Asociados Servicio Editorial
- [19] Sabino, C. (2000) El proceso de investigación. Caracas: Editorial Panapo

BIBLIOGRAFÍA

American Petroleum Institute, API. (2010) 2010 Publications programs and services. Washington, DC: API Publishing.

Arias, F. (1999). El proyecto de investigación, guía para su elaboración. 3ra ed. Caracas: Editorial Episteme.

Balestrini, M. (2006). Como se elabora el proyecto de investigación. 7ma ed. Caracas: Consultores Asociados Servicio Editorial.

Bay, G. (1999). Portland cement. 2da ed. Londres: Thomas Telford Publishing.

Barron, A. (2009) Chemical composition of portland cement. Consultado el 11 de Mayo de 2010, <http://cnx.org/content/m16445/latest/>

Bosset J. & Gou Y. (2004). Revisión modelo estructural. Exploración y Producción PDVSA, Estudios Integrados Norte de Monagas. Puerto La Cruz, Venezuela. Documento Confidencial.

Bourgoyne, A., Chenevert, M., & Young, F. (1991). Applied drilling engineering. Richardson: Society of Petroleum Engineers Textbook Series.

Brown, F. (2008). Principios de redacción. Caracas: Editorial Oasis.

Calleja, J., & Virella, A. (1985). Prontuario del cemento. 5ta ed. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A.

Chilingarian, G., Roberstson, J. & Kumar, S. (1989) Surface operations in petroleum production, II. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.

Claret, A. (2006). ¿Cómo hacer y defender una tesis? 5ta ed. Caracas: Editorial Texto.

Cook, N., Jaeger, J & Zimmerman, R. (1969) Fundamentals of rock mechanics. New York: Blackwell Publishing.

Crook, R. (2006). Drilling engineering. Cementing. Petroleum Engineering Handbook. Richardson: Society of Petroleum Engineers.

Díaz, A., & Montero, W. (2009). Conceptualización, diseño y análisis de un prototipo de laboratorio para pruebas de cemento de pozos petroleros a condiciones de yacimiento, utilizando el método de elementos finitos. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Díaz, P., & Méndez, A. (2007). Fundamentos teórico prácticos de perforación de pozos: problemas de hoyo, perforación direccionada, revestimientos, cementación y nuevas tecnologías. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Fjaer, E. y otros. (1992). Petroleum related rocks mechanics. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.

Gomá, F. (1979) El cemento Portland y otros aglomerantes. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S. A.

Hawker, D., Vogt, K., y Robinson, A. (2001). Manual de perforación y procedimientos y operaciones en el pozo. Alberta: Datalog.

Hudson, J. A. (1981) Wave speed and attenuation of elastic waves in materials. Houston: Geophysical Journal International.

Hugon, A. y Serre, M. (1982) Enciclopedia de la construcción: técnicas de construcción. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S. A.

Kearey, P., Brooks, M. y Hill, I. (1984) An introduction to geophysical exploration. Oxford: Blackwell Science Ltd.

Mavko, G., Mukerji, T, y Dvorki, J. (1998) The rocks physics handbook: tools for seismic analysis in porous media. Cambridge: Cambridge University Press.

M-I Drilling Fluids. (2001). Manual de fluidos de perforación. Houston: M-I Drilling Fluids.

Mingarro, F. (1996). Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico. Madrid: Complutense, S.A.

Nelson, E. (1990). Well cementing. Sugar Land: Schlumberger Educational Services.

Pacheco, H., y Pacheco, R. (2005). Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas cementantes utilizando el método de los elementos finitos. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

PDVSA CIED. (1997). Cementación de pozos. Maracaibo: Centro de Información y Documentación Integral (CIDI) División Occidente.

PDVSA Exploración y Producción. (2009). Informe técnico proyecto PGP Travi-Cotoperí. Gerencia de Proyectos Exploratorios. Puerto La Cruz, Estado Anzoátegui. Documento Confidencial.

PDVSA Exploración y Producción. (2010). Programa de perforación campo Travi Norte. Gerencia de Ingeniería de Perforación y Rehabilitación. Estudios de Yacimiento. Puerto La Cruz, Estado Anzoátegui. Documento Confidencial.

PDVSA Intevep. (2011). Código estratigráfico de las cuencas petroleras de Venezuela.

Sabino, C. (2000). El proceso de investigación. Caracas: Editorial Panapo

Schlumberger (1997). WEC. Evaluación de pozos. Caracas: Schlumber Oilfield Services.

Subieta, T. (1988). Evolución tectonoestratigráfica de la serranía del interior y de la subcuenca de Maturín. Simposio: Sociedad Venezolana de Geólogos. Caracas, Venezuela.

Suman, G., y Ellis, R. (1977). Cementing handbook. Including casing handling procedures. Houston: Editorial Gulf.

Taylor, H. (1997). Cement Chemistry. 2da ed. Londres: Thomas Telford Publishing.

Vian, A. (1999). Introducción a la química industrial. 2da ed. Barcelona: Reverté, S.A.