

PREDICCIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO-CEMENTO POR EL
MÉTODO DE LA MADUREZ Y EL MONITOREO DE TEMPERATURAS DE
FRAGUADO

LILIANA CAROLINA HERNÁNDEZ GARCÍA

NELSON FERNANDO LIZARAZO SALAMANCA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ D.C.

2019

PREDICCIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO-CEMENTO POR EL
MÉTODO DE LA MADUREZ Y EL MONITOREO DE TEMPERATURAS DE
FRAGUADO

LILIANA CAROLINA HERNÁNDEZ GARCÍA
NELSON FERNANDO LIZARAZO SALAMANCA

Proyecto de grado
para optar el título de
Magister en Infraestructura Vial

Tutor
Juan Miguel Sánchez Durán
Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ D.C.
2019

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., 23 de septiembre de 2019

A mi familia por ser la fuente inagotable de inspiración, mi fortaleza y la motivación para la búsqueda del mejoramiento continuo. A mi esposo, por ser el cómplice perfecto de cada uno de mis proyectos y el financiador inagotable de la energía que me lleva a cumplir mis metas. A la academia, la Universidad Santo Tomás y todo su equipo de trabajo, por facilitar las herramientas necesarias para este proceso de formación. A la Universidad Piloto de Colombia, en especial a la dirección de Investigaciones por creer en proyectos como estos. A la empresa Argos, T.S. Ingeniería y P.C. Diseños y Construcción y todo el equipo de trabajo que de alguna manera respaldaron el proyecto, con insumos, asesorías y el acompañamiento en el proceso de investigación. Al Padre Celestial, mi columna vertebral, mi guía, mi soporte y acompañante fiel. Al gremio de la construcción, para que de cierta manera este proyecto aporte a la generación de nuevo conocimiento en el diseño las mezclas de suelo cemento, para las condiciones climáticas de nuestro país.

Liliana Carolina Hernández García

Las palabras de gratitud y dedicatoria reflejan el más humilde sentimiento del respeto y reconocimiento a todas aquellos familiares, amigos y compañeros. Por eso con profundo agradecimiento elevo mi voz hacia Dios, energía divina que todo lo mueve y que ha permitido la buena marcha de este proyecto. A mis padres y hermanos que han estado en constante acompañamiento moral, siempre motivándome para lograr mis objetivos, a ellos les debo toda la fortaleza que me permitió seguir adelante con perseverancia. A los compañeros de la Facultad de Ingeniería de la Escuela Militar de Cadetes “Gral. José María Córdova”, quienes siempre tendieron la mano buscando brindarme las posibilidades para lograr este objetivo, compartiendo su conocimiento y orientación en los diferentes temas. A la ingeniera Liliana Carolina Hernández, colega y compañera del proyecto quien compartió incondicionalmente el conocimiento y experiencia recogido en su carrera Ingenieril con una experiencia de más de 15 años. A mi Ejército Nacional por permitirme desarrollar mi carrera profesional, en forma simultánea a mi profesión como soldado de Ingenieros. De igual forma quiero extender mi agradecimiento a la empresa Argos, T.S. Ingeniería y P.C. Diseños y Construcción, quienes contribuyeron con sus instalaciones, materiales, asesorías y constante acompañamiento en el desarrollo de la investigación. A mi país y a los ciudadanos que habitan en zonas rurales, para que estos espacios de conocimiento permeen en beneficio de las condiciones de vida de nuestros campesinos.

Nelson Fernando Lizarazo Salamanca

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
1.1 PREGUNTA PROBLEMA.....	24
2. JUSTIFICACIÓN	25
3. OBJETIVOS	31
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	31
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	31
4. MARCO REFERENCIAL	32
4.1 MARCO DE ANTECEDENTES.....	32
4.2 MARCO TEÓRICO	44
4.2.1 ¿Qué es el calor de hidratación en el concreto hidráulico?.....	44
4.2.2 ¿Qué es la Madurez del concreto?.....	47
4.2.3 ¿Qué es un suelo cemento y cuáles son sus características?.....	50
4.2.4 El módulo de resiliencia como una resistencia mecánica de los pavimentos	54
5. MARCO CONTEXTUAL	58
6. MARCO LEGAL.....	63
6.1 NTC 121	63
6.2 NTC 3756	64
6.3 Artículo 350 de 2013, invias.....	67
6.3.1 INV E-611	69
6.3.2 INV E-613	70
6.3.3 INV E-614	72
6.4 INV E-156.....	72

7.	DISEÑO METODOLÓGICO	76
7.1	PROCEDIMIENTO	77
8.	DESARROLLO DEL PROYECTO: FÓRMULA DE TRABAJO	80
8.1	Granulometría del material	80
8.2	El tipo y la marca de cemento empleado en el diseño	83
8.3	Contenido óptimo de cemento	84
8.4	Optimización de la prueba para el diseño de mezclas a través de un nuevo desarrollo tecnológico: Método de elaboración de cilindros de Suelo-Cemento.	91
9.	DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE REFERENCIA Y LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN POR EL MÉTODO DE LA MADUREZ.....	105
9.1	Madurez del suelo cemento	105
9.2	Cálculo de la Energía de Activación y de la Temperatura de Referencia del Cemento ART.	107
9.3	Cálculo de la Energía de Activación y de la Temperatura de Referencia del Cemento UG.	111
9.4	Cálculo de la Energía de Activación y de la Temperatura de Referencia del Cemento MCH.	115
10.	MONITOREO DE TEMPERATURAS DEL SUELO CEMENTO DURANTE LA ETAPA DEL FRAGUADO.....	119
11.	MADUREZ DEL SUELO CEMENTO.....	129
12.	CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE Y LA TEMPERATURA POR EL MÉTODO DE LA MADUREZ	137
12.1	Medición del módulo resiliente de los tres diseños de mezclas	137
12.2	Modelo de Predicción del módulo resiliente con el monitoreo de temperaturas y las funciones de madurez	147
13.	DIAGNÓSTICO DE RESULTADOS.....	151
14.	CONCLUSIONES	157
15.	BIBLIOGRAFÍA.....	160

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos físicos normalizados	63
Tabla 2. Especificaciones técnicas	64
Tabla 3. Criterios de diseño para la mezcla de suelo-cemento	68
Tabla 4. Resultados comparados con los requisitos de gradación del material	82
Tabla 5. Resultados de Densidades Máximas del Suelo Cemento con MCH	85
Tabla 6. Resultados de Densidades Máximas del Suelo Cemento con UG	86
Tabla 7. Resultados de Densidades Máximas del Suelo Cemento con ART	87
Tabla 8. Dosificación para la elaboración de cilindros de suelo cemento.....	89
Tabla 9. Compresión inconfiada de cilindros de suelo cemento después de 7 días de curado	89
Tabla 10. Compresión inconfiada de cilindros de suelo cemento después de 28 días de curado.....	90
Tabla 11. Estimación del contenido de cemento mediante la ecuación de tendencia lineal	91
Tabla 12. Relación Humedad-Densidad de mezclas de Suelo Cemento	92
Tabla 13. Resultados de la prueba de Durabilidad por inmersión y desgaste para las muestras elaboradas con cemento MCH	96
Tabla 14. Resultados de la prueba de Durabilidad por inmersión y desgaste para las muestras elaboradas con cemento UG.....	98
Tabla 15. Resultados de la prueba de Durabilidad por inmersión y desgaste para las muestras elaboradas con cemento ART	99
Tabla 16. Resultados de la prueba que relaciona la densidad en función del contenido de agua, en las muestras de suelo cemento con MCH por el método de compactación propio.....	101
Tabla 17. Resultados de la prueba que relaciona la densidad en función del contenido de agua, en las muestras de suelo cemento con UG por el método de compactación propio.....	102

Tabla 18. Resultados de la prueba que relaciona la densidad en función del contenido de agua, en las muestras de suelo cemento con ART por el método de compactación propio.....	103
Tabla 19. Dosificación óptima para la elaboración de muestras de suelo cemento	104
Tabla 20. Valores Inversos de la resistencia y la edad obtenidas en la prueba de compresión de cubos (cilindros de suelo cemento ART)	108
Tabla 21. Resultados del cálculo de la constante A del Suelo Cemento ART	109
Tabla 22. Selección de la pendiente de la recta K para cada temperatura de curado	110
Tabla 23. Valores Inversos de la resistencia y la edad obtenidas en la prueba de compresión de cubos (cilindros de suelo cemento UG)	111
Tabla 24. Resultados del cálculo de la constante A del Suelo Cemento UG.....	112
Tabla 25. Selección y cálculo de las variables para la curva de Energía de Activación Q y Temperatura de referencia T0, para suelo cemento UG.....	113
Tabla 26. Valores Inversos de la resistencia y la edad obtenidas en la prueba de compresión de cubos (cilindros de suelo cemento MCH).....	115
Tabla 27. Resultados del cálculo de la constante A del Suelo Cemento MCH	116
Tabla 28. Selección y cálculo de las variables para la curva de Energía de Activación Q y Temperatura de referencia T0, para suelo cemento MCH.....	116
Tabla 29. Consolidado de resultados de Energía de Activación y Temperatura de referencia	118
Tabla 30. Consolidado de los factores de madurez, edad equivalente y la resistencia a la compresión	136
Tabla 31. Referenciación de las muestras cilíndricas para ser falladas en la máquina Triaxial cíclica.	138
Tabla 32. Reporte para la prueba de módulo resiliente de la Muestra 15, MCH-40°C	140
Tabla 33. Reporte para la prueba de módulo resiliente de la Muestra 15, UG Curadas a 11°C	141

Tabla 34. Reporte para la prueba de módulo resiliente de la Muestra 17, UG Curadas a 40°C	142
Tabla 35. Reporte para la prueba de módulo resiliente de las muestras elaboradas con cemento MCH	142
Tabla 36. . Reporte para la prueba de módulo resiliente de las muestras elaboradas con cemento UG	143
Tabla 37. Reporte para la prueba de módulo resiliente de las muestras elaboradas con cemento ART	144
Tabla 38. Consolidado de resultados de Módulo Resiliente a 450 KPa.	146
Tabla 39. Consolidado de resultados obtenidos en un período inicial de 30 horas y el Módulo Resiliente a los 28 días.	147
Tabla 40. Resultados de la Densidad seca y la Temperatura de referencia de las muestras falladas en el Triaxial Cíclico, para determinar su módulo resiliente	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Suelo cemento en Piloto Putumayo	20
Figura 2. Caso de éxito cemento UG y aditivo solidificante	21
Figura 3 Evolución del calor como función del tiempo para la pasta de cemento..	33
Figura 4. Tasa de liberación de energía dividida por la tasa de liberación de energía en estado estable vs. Tiempo dividido por tiempo característico de difusión térmica.	35
Figura 5 Modelo de reacción-difusión para determinar patrones de meso escala en pasta de cemento	36
Figura 6. Curva calorimétrica de Cemento Portland con diferentes mezclas de adiciones	37
Figura 7. Extracción de cubos de seis pies de largo (1.80m)	40
Figura 8. Resistencia calculada del núcleo del concreto a través del método de madurez a lo largo de la dirección de profundidad debajo de la superficie superior, representada a los 4, 28 y 76 días de edad	41
Figura 9. Definición de módulo resiliente	43
Figura 10. Resistencia de los componentes del cemento	45
Figura 11. Historia hipotética de la temperatura usada para ilustrar el cálculo de factor temperatura-tiempo y edad equivalente.	48
Figura 12. Ejemplo de relación entre la resistencia a la compresión y el factor temperatura-tiempo	49
Figura 13 Relación madurez-resistencia con ensayos a compresión	50
Figura 14. Suelo modificado con cemento, proceso constructivo.	52
Figura 15. Distribución de esfuerzos de bases granulares.....	53
Figura 16. Esquema de recuperador de carreteras durante el proceso FDR	54
Figura 17. Estados de esfuerzos en pavimentos	56
Figura 18. Deformaciones bajo cargas repetitivas	57
Figura 19. Relación entre la fuerza de compresión no confinada y la resistencia a	

compresión inconfiada	57
Figura 20. Distribución de la temperatura máxima media mensual (°C) Agosto, Colombia	59
Figura 21. Temperatura máxima diaria durante el mes de Julio 2019	60
Figura 22. Temperatura mínima diaria durante el mes de julio de 2019	61
Figura 23. Temperatura máxima diaria durante el mes de enero 2019	61
Figura 24. Temperatura máxima diaria durante el mes de enero 2019	62
Figura 25. Diagrama para determinar la Temperatura de Referencia	66
Figura 26. Molde para probetas cilíndricas de suelo cemento	71
Figura 27. Diagrama de compactación de muestras para Módulo Resiliente	74
Figura 28. Secuencia de ensayo para materiales de base/subbase	75
Figura 29. Variables de la investigación	77
Figura 30. Ejemplo de grafica para determinar la incidencia de la temperatura en el módulo resiliente	79
Figura 31. Cantera de exploración de agregados T.S. Ingeniería	80
Figura 32. Carta de plasticidad con la ubicación del agregado seleccionado	81
Figura 33. Curva granulométrica del suelo seleccionado	81
Figura 34. Gradación del suelo seleccionado después del lavado por el tamiz No. 200	82
Figura 35. Muestra del material Seleccionado A-25 luego de la ignición	83
Figura 36. Tipos de Cementos utilizados	84
Figura 37. Diagrama que relaciona la Densidad en función de la humedad	84
Figura 38. Relación Humedad-Densidad del Suelo con Cemento MCH	85
Figura 39. Relación Humedad-Densidad del Suelo con Cemento UG	86
Figura 40. Relación Humedad-Densidad del Suelo con Cemento ART	87
Figura 41. Densidades máximas en función del contenido de cemento para los tres tipos de suelo cemento	88
Figura 42. Diagrama de Tendencias lineales del Esfuerzo a la compresión	

inconfinada en función del contenido de cemento	90
Figura 43. Relación de la densidad de las muestras de suelo cemento en función de la humedad.....	93
Figura 44. Muestras cilíndricas compactadas por el método diseñado por los autores	93
Figura 45. Imperfectos en las muestras elaboradas por los métodos tradicionales	94
Figura 46. Diagrama de resistencias a la compresión en función del contenido de cemento.....	95
Figura 47. Dosificación del contenido de Cemento para muestras de Suelo Cemento	95
Figura 48. Muestras luego de la inmersión	97
Figura 49. Diagrama que relaciona la densidad en función del contenido de agua, en muestras de suelo cemento	104
Figura 50. Cubos de suelo cemento	105
Figura 51. Muestras de suelo cemento equivalentes a los cubos de mortero	106
Figura 52. Muestras marcadas cilíndricas de relación altura/ancho igual a 1.....	107
Figura 53. Diagrama para determinar $1/S_u$ en Suelo Cemento ART.....	108
Figura 54. Diagrama que relaciona la constante A en función del tiempo, para cada temperatura de curado para Suelo Cemento ART	109
Figura 55. Diagrama que correlaciona la constante K con la temperatura de curado	110
Figura 56. Línea de tendencia recta entre los logaritmos naturales de K en función del recíproco de la temperatura en grados Kelvin.	111
Figura 57. Diagrama para determinar $1/S_u$ en Suelo Cemento UG	112
Figura 58. Diagrama que relaciona la constante A en función del tiempo, para cada temperatura de curado, para Suelo Cemento UG	113
Figura 59. Diagrama de Temperatura de Referencia T_0 para Suelo Cemento UG	114
Figura 60. Diagrama de la Energía de Activación Q para suelo cemento UG	114

Figura 61. Diagrama para determinar $1/S_u$ en Suelo Cemento MCH.....	115
Figura 62. Diagrama que relaciona la constante A en función del tiempo, para cada temperatura de curado, para Suelo Cemento MCH	116
Figura 63. Diagrama de Temperatura de Referencia T_0 para Suelo Cemento MCH	117
Figura 64. Diagrama de la Energía de Activación Q para suelo cemento MCH ..	117
Figura 65. Hidratación de las muestras de Suelo Cemento curadas a 40°C	119
Figura 66. Hidratación de las muestras de Suelo Cemento curadas a 11°C	120
Figura 67. Preparación de muestras para calorimetrías.....	121
Figura 68. Registro de temperaturas en condiciones normales (30°C)	122
Figura 69. Registro de temperaturas mediante el uso del Datalooger Marca Center 520.	123
Figura 70. Registro de temperaturas en el Baño María a 40°C	123
Figura 71. Calorimetrías tomadas en las muestras curadas a 11°C.....	124
Figura 72. Calorimetrías tomadas en las muestras curadas a 30°C.....	125
Figura 73. Calorimetrías tomadas en las muestras curadas a 40°C.....	125
Figura 74. Incremento de temperatura de la muestra con respecto a la temperatura ambiente en el tiempo a 40°C de curado	126
Figura 75 Incremento de temperatura de la muestra con respecto a la temperatura ambiente en el tiempo a 30°C de curado	126
Figura 76. Incremento de temperatura de la muestra con respecto a la temperatura ambiente en el tiempo a 11°C de curado	126
Figura 77. Diagramas que relacionan el incremento de temperatura de las muestras con la temperatura de curado para los tres diseños de mezclas: MCH, UG y ART	127
Figura 78. Detalle del molde metálico de 71 mm de diámetro.....	129
Figura 79. Proceso de compactación de las muestras de suelo cemento	130
Figura 80. Compresión de muestras cilíndricas de suelo cemento	131
Figura 81. Resultados de las pruebas.....	131

Figura 82. Resultados de la compresión de cilindros de suelo cemento en función de su temperatura.....	132
Figura 83. Tipo de falla de las muestras sometidas a carga de compresión inconfiada	133
Figura 84. Madurez del suelo cemento MCH a la compresión Uniaxial	133
Figura 85. Madurez del Suelo cemento UG a la compresión Uniaxial.....	134
Figura 86. Madurez del Suelo cemento ART a la compresión Uniaxial	134
Figura 87. Índice de Madurez en relación con la edad equivalente	135
Figura 88. Índice de madurez en relación con el Factor temperatura - tiempo	135
Figura 89. Molde de acero maquinado para elaborar las muestras para Módulo resiliente	137
Figura 90. Reporte para la prueba de módulo resiliente de la Muestra 13, MCH-20°C	138
Figura 91. Montaje la muestra en el equipo Triaxial cíclico	139
Figura 92. Falla transversal de la muestra sometida a cargas cíclicas y esfuerzo Triaxial.....	140
Figura 93. Registro de temperatura interna de las muestras de Suelo Cemento falladas en el Triaxial cíclico	141
Figura 94. Módulo resiliente del Suelo cemento elaborado con cemento MCH, curado en diferentes temperaturas.	145
Figura 95. Módulo resiliente del Suelo cemento elaborado con cemento UG, curado en diferentes temperaturas.	145
Figura 96. Módulo resiliente del Suelo cemento elaborado con cemento ART, curado en diferentes temperaturas.	146
Figura 97. Relación entre el Factor de Madurez de fraguado y el módulo resiliente medido a los 28 días de edad.	149
Figura 98. Función que relaciona la incidencia de la temperatura de curado con el módulo resiliente de los suelos.	149
Figura 99. Comparativo de valores obtenidos con el modelo de predicción versus los obtenidos en laboratorio	150

Figura 100. Relación entre la Temperatura de Referencia T0 y la Densidad Seca	155
---	-----

TABLA DE ANEXOS

Anexo A. Granulometría de la muestra seleccionada.	
Anexo B. Índice de plasticidad de la muestra seleccionada.	
Anexo C. Contenido de Materia Orgánica	
Anexo D. Relaciones de humedad-densidad de mezclas de suelo cemento.	
Anexo E. Compresión inconfiada.	
Anexo F. Compresión de cilindros de Suelo Cemento.	
Anexo G. Pruebas de Durabilidad.	
Anexo H. Cubos de Suelo Cemento.	
Anexo I. Monitoreo de temperaturas (Calorimetrías).	
Anexo J. Compresión de Cilindros normales de Suelo Cemento.	
Anexo K. Cálculos de la Madurez para la resistencia a la compresión.	
Anexo L. Memoria de cálculo de Q y T0.	
Anexo M. Determinación del Módulo Resiliente de suelos y agregados (Granular). M-13, M-14, M-15, M-16, M-17, M-18, M-19, M-20, M-21, M-22, M-23.	

RESUMEN

Esta investigación busca establecer un modelo de utilidad que apropie el procedimiento para estimar la resistencia del concreto por el método de la madurez establecido por la ASTM C1074-19 y homologado por la norma técnica NTC 3756, para predecir el módulo resiliente medido a los 28 días de edad del suelo cemento a través del registro de temperaturas durante su etapa de fraguado.

El suelo cemento es un material híbrido que no es posible clasificarlo como un concreto hidráulico por lo que dicha norma no lo cubre para realizar el control de calidad en obra. Sin embargo, por tener un material cementante su evolución de resistencias está en función del grado de compactación, el contenido de agua, la uniformidad de la capa compactada, el tipo de cemento y la temperatura de curado.

La técnica es adaptada mediante la elaboración de tres diseños de mezclas de suelo cemento (SC) preparadas con cementos hidráulicos adicionados: Uso General (UG), Altas Resistencias Tempranas (ART) y Moderado Calor de Hidratación (MCH). Cuya resistencia teórica a la compresión es de 4.5 MPa a los 7 días de edad y la durabilidad medida con la prueba de Humedecimiento y secado durante doce ciclos, del 10%.

Con las dosificaciones validadas en laboratorio, se prototipan muestras para establecer el valor de Q (División entre la Energía de Activación y la constante universal del gas) y la temperatura de Referencia T_0 , aplicando el método de madurez de Nurse-Saul y Arrhenius y empleando temperaturas de curado de 11, 30 y 40°C. Los datos obtenidos se emplean luego en el cálculo del factor de madurez a través del registro de temperaturas internas de las muestras, tomadas durante las primeras treinta horas de edad.

Paralelo se elaboraron muestras cilíndricas con los tres diseños de mezcla curadas en las tres temperaturas, que fueron falladas en la cámara Triaxial cíclica a los 28 días de edad. Con estos valores, construyó un modelo de predicción del módulo resiliente soportado en el producto entre el factor de madurez y el incremento de temperatura registrado en el historial de temperaturas monitoreadas durante el fraguado.

Palabras clave: Suelo cemento, módulo resiliente, modelo de predicción, madurez, fraguado, temperatura.

INTRODUCCIÓN

El concepto de la madurez en un concreto hidráulico, parte del principio de que la resistencia está directamente relacionada con la edad y el desarrollo de su temperatura de fraguado. Existen métodos que estiman la resistencia final del concreto durante el vaciado a través de un índice de temperatura medido en el concreto en sitio, como una expresión matemática que relaciona los efectos combinados del tiempo y de la temperatura en la hidratación del cemento. Este índice de madurez es utilizado para estimar el desarrollo de la resistencia, basado en una calibración predeterminada de la relación tiempo-temperatura-resistencia, desarrollada por medio de pruebas de laboratorio, que correlacionan la velocidad de hidratación en función de la temperatura.

La Norma Técnica Colombiana 3756 adopta la ASTM C1074-19, donde especifica este método, el cual permite monitorear las resistencias y verificar los tiempos de corte en juntas de construcción de pavimentos de concreto convencional, CCR¹ y Fast track. Así mismo, permite la supervisión de actividades de construcción de elementos prefabricados, el análisis de tiempos de tensionamiento en vigas fundidas en sitio, ayuda a minimizar los riesgos de agrietamiento en elementos de concreto masivo y en sistemas industrializados de construcción, permite conocer los tiempos de retiro de formaletas y así reducir su fisuración.

De otro lado, el suelo cemento se conoce como un material que resulta de la mezcla compactada de suelo, cemento y agua, cuyas proporciones logran propiedades mecánicas específicas que permiten su uso en la ingeniería, mediante la estabilización de materiales (Yilmaz & Vehbi, 2011). Dentro de las ventajas que ofrecen está la durabilidad, el reducido impacto ambiental, mayor rigidez y mejor distribución de las cargas aplicadas al pavimento, comparada con otros materiales granulares usados en las estructuras de los pavimentos. Además de ofrecer una mayor resistencia a los agentes atmosféricos, el incremento de la resistencia con el tiempo y la reducción de la necesidad del mantenimiento del pavimento.

Según la Asociación de Cemento Portland, el suelo-cemento como material para la construcción de carreteras se ha clasificado de acuerdo a las características del material de partida, el contenido de cemento y el tipo de suelo; dentro de las

¹ Concreto Compactado con Rodillo

denominaciones fundamentan el suelo mejorado o modificado con cemento, el suelo estabilizado con cemento (CMS), la base granular tratada con cemento (CTB), el fresado reciclado con cemento (CTB) y los pavimentos unicapa de alto desempeño (PCA, 2017). Cada uno de ellos presentan diferentes contenidos de cemento, que mejoran las propiedades indeseables de suelos difíciles o materiales de menor calidad, de manera que se ajusten a los requerimientos adecuados de construcción.

Para dar claridad a estos requerimientos el comité 230 del Instituto Americano del Concreto, en julio de 2009 contempla en el Informe sobre Suelo cemento las pruebas de control de calidad e inspección en obra, de las nombra la pulverización de la capa y la gradación mediante las pruebas de granulometría, el contenido de cemento medido a partir del uso de una bandeja o tapete de un metro cuadrado, el contenido de humedad medido con muestras tomadas luego del mezclado o mediante el uso del Humedómetro, la uniformidad de la mezcla y la compactación mediante la toma de densidades en campo y el estricto control del curado de la capa. (ACI, 2009)

Sin embargo, la hidratación del cemento está relacionada con el calor de hidratación y la temperatura que puede alcanzar una mezcla cementante. Esta variable, se puede ver afectada por aspectos internos o externos de su instalación, ya sea por tratarse de concretos masivos, donde su temperatura aumenta rápidamente. O por elementos delgados como las losas cuya afectación se ve influenciada por el clima donde está expuesto.

Para cubrir la incidencia que tiene la temperatura de curado, esta investigación analiza los suelos cementos, a partir de un diseño de mezcla preparado con arena arcillosa (A-25), como una constante durante todo el trabajo. Cuya mezcla será diseñada con tres tipos de cementos adicionados, o también conocido como cemento hidráulico por desempeño, que según la NTC 121-14 se ajustan a la nomenclatura (MCH) para Moderado Calor de hidratación, (UG) para Uso general y (ART) para Altas Resistencias tempranas.

Cada dosificación varía entre un 30 y 40% de cemento y en cumplimiento al artículo 350 del Instituto Nacional de Vías (Art.350-13), la resistencia teórica a la compresión es de 4.5 MPa a la compresión a los 7 días de edad y la durabilidad medida con la prueba de humedecimiento y secado es del 10%, dadas a las características del

suelo a mejorar (A-2-6)².

Aprovechando el alto contenido de cemento de los diseños se prevé que facilitará la medición de los registros de la temperatura interna durante la etapa de fraguado, dada a que habrá una mayor liberación de calor de hidratación, que permitirá apropiar las funciones de madurez y edad equivalente establecidas en el método de madurez (NTC 3756) aplicada únicamente para los concretos hidráulicos.

Este método busca determinar experimentalmente la temperatura de referencia T_0 y la energía de activación dividida entre la constante universal del gas (Q), a partir de la maduración de las muestras elaboradas con los tres tipos de cementos hidráulicos, curados en tres cuartos húmedos con temperaturas controladas, unas a 11°C, otras a 30° y otras a 40°C. Con estas se instalan unas muestras especialmente elaboradas para realizar los registros de temperatura interna durante las primeras 30 horas de edad.

Luego de llevar a cabo el ejercicio, se maduran durante 28 días muestras cilíndricas de los tres tipos de suelo cemento, en los mismos cuartos húmedos para medir su módulo resiliente en una prensa Triaxial cíclica. Con los resultados obtenidos se establece una función lineal que determina la proporcionalidad entre la temperatura de fraguado y el módulo de resiliencia de las muestras. Logrando establecer una ecuación que involucra tanto el incremento de la temperatura, como el factor de madurez en la predicción del módulo resiliente del suelo cemento.

De esta manera, con la aplicación de la ecuación obtenida se podrá realizar la prueba de calorimetrías o registro de temperaturas en obra, con la instalación de sensores al interior de las capas compactadas, que determinarán la actividad térmica del cemento en la mezcla, medido con el historial de temperaturas, y facilitar la predicción de la resistencia del pavimento como módulo resiliente a los 28 días de edad. Este ejercicio reemplazaría la práctica de extracción de muestras con saca-núcleos que además de deteriorar la capa por micro-fisuración, es un ejercicio muy complejo ya que algunos materiales granulares hacen imposible la toma sin ocasionar el desmoronamiento.

² Clasificación del suelo según el sistema AASHTO, Arena arcillosa.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según el ACI (Instituto Americano del Concreto), el comité 230 en 2009 define el cemento del suelo como 'una mezcla de suelo y cantidades medidas de cemento portland y agua, compactado a una alta densidad'. Este material es el producto de la homogenización, compactación y curado de una mezcla entre un agregado que es la tierra, cemento hidráulico y agua para formar un material endurecido con propiedades de ingeniería específicas. En él las partículas están unidas por pasta de cemento, pero a diferencia de hormigón, la partícula individual no está completamente recubierta con pasta de cemento. (ACI, 2009)

La resistencia del suelo cemento históricamente ha sido regulado mediante la toma de densidades en campo comparadas con una densidad máxima calculada según en relación a la humedad empleando el método ASTM D558 o D1557, en Colombia adoptada por la INV-E 611. Ya sea a través de densímetro nuclear, método del cono y arena, o balón de caucho. En referencia a que, para un contenido de cemento dado, en cuanto mayor sea la densidad mayor será la resistencia a la compresión de mezclas de suelos sin cohesión y cemento (Shen & Mitchell, 1966). Se conoce que el retraso en el proceso de compactación de la mezcla, puede traer significativamente deficientes resultados en la resistencia, que solo puede ser minimizado mezclando intermitentemente el suelo cemento, varias veces por hora, siempre que el contenido de humedad durante la compactación fuese igual o ligeramente superior al óptimo (Catton & Felt, 1943).

No obstante, los suelos mezclados con cemento se encogen durante el secado. La contracción y el posterior agrietamiento depende del tipo de cemento y la cantidad por metro cúbico, el tipo de suelo, el contenido de agua de la mezcla, el porcentaje de compactación y las condiciones de curado. Éste último directamente afectado por las temperaturas y el clima del contexto de instalación. De manera que, las arcillas pueden producir mayor contracción total, con anchos de grietas muy pequeños pero muy seguidas, mientras que los suelos granulares producen menos contracción, con grietas más gruesas, pero más espaciadas. Por esto, se deduce que la fisuración está correlacionado con el cambio de volumen (contracción por secado), el cambio de temperatura, la resistencia a la tracción, la rigidez y fluencia de los materiales, y la restricción de la subrasante. (George, 2002)

En Colombia ya existen diferentes contextos donde analizar la afectación de estas

variables en el suelo cemento, para mayo de 2017, la Gobernación de Putumayo, la Agencia Nacional de Infraestructura, la Alta Consejería para el Postconflicto, la Universidad de Antioquia y el Ejército Nacional, de la mano con el sector privado, dieron apertura al plan piloto de vías terciarias que se desarrolló en el municipio de Puerto Asís con una inversión de \$1.714 millones (ver Figura 1). Conformado por 11 empresas privadas del país, donde cada una aportó un kilómetro con sus aditamentos químicos para estabilizar 11 kilómetros de vía contemplados así: 5 km de la vía principal del corredor Puerto Vega-Teteyé, 3 km en la vereda La Carmelita y 3 km en la vereda El Remolino. (Ministerio del Transporte, 2017)

Figura 1. Suelo cemento en Piloto Putumayo



Fuente: (Gómez, 2018) Suelo cemento: Alternativas de pavimentación para vías de bajo tráfico. Gómez, Carlos Mario. 143, Bogotá D.C.: Asocreto, 2018, Noticreto. la revista de la técnica y la construcción. ISSN 0120-8489.

Con el lema ‘con menos plata hacer más’ se puso a prueba diferentes técnicas de estabilización de suelos con cemento. Esta técnica validada en laboratorios internacionales y nacionales fue puesta a prueba en condiciones climáticas colombianas.

Dentro de las técnicas expuestas, se incluyen los aditivos solidificantes para suelo cemento con cemento UG, de Cemex Research Group AG. Cuyas ventajas fueron

explicadas en la edición 143 de la Revista Asocreto, dentro de las que se destacan: Disminución de costos, incremento en el rendimiento de los materiales, versatilidad, protección ambiental, facilidad de aplicación, reducción de tiempo ya que a solo tres días se podrá abrir al tráfico, apariencia y utilización progresiva (ver Figura 1) (Santacruz, y otros, 2017).

Figura 2. Caso de éxito cemento UG y aditivo solidificante



Fuente: Aditivos Solidificantes para Suelo Cemento. Santacruz, Andrés, y otros. Bogotá: Asocreto, Julio/agosto de 2017, Noticreto, Vol. 143, págs. 46-49. 0120-8789.

Así mismo, y en la misma publicación Cementos Argos expone experiencias en el mundo referente al uso de suelo cemento y las ventajas de un cemento con menor calor de hidratación para que el desarrollo de la resistencia y el módulo de elasticidad sea *lento*, pero que siga evolucionando en el tiempo; con ello se mitiga la retracción de la mezcla y se reducen la posibilidad de fisuración de las capas tratadas. (Gómez G. & Gómez, 2017)

Cada tramo se llevó a cabo realizando los controles definidos por el Instituto Nacional de Vías, como contenido de humedad y densidad máxima mediante la toma de densidades en campo, pulverización y homogeneidad de suelo, empleando equipos de fresado, escarificación y mezclado en sitio. La verificación se realiza cavando zanjas o una serie de agujeros a intervalos regulares para la profundidad total del tratamiento y luego se inspecciona el color y la textura uniforme. Si la mezcla tiene rayas o terrones en su apariencia, refleja que no se ha mezclado lo

suficiente. Adicional a estas pruebas se realizó ensayos de envejecimiento acelerado, conductividad, composición estructural y mineralógica, resistencia a compresión inconfiada, color y pH (Secretaría de Infraestructura, 2015).

Este seguimiento liderado por la Gobernación de Antioquia se dio como solución a la baja sostenibilidad y durabilidad de diferentes soluciones constructivas, además de la obsolescencia y poca pertinencia de alternativas tradicionales a las condiciones subregionales del Departamento. No obstante, se presume que el problema del deterioro acelerado surge de los agujeros realizados para la exploración y control de calidad, que conducen a una micro-fisuración que deteriora los enlaces iniciales de la pasta y se ven reflejados en una baja resistencia y durabilidad.

Es así como surge el reto que da solución al problema de esta investigación, que busca determinar un método no destructivo que permita estimar la resistencia en el sitio de una capa de suelo cemento diseñada como una estructura de pavimento, a partir de una expresión matemática que usa la medida de la historia de temperaturas durante el período de fraguado en obra, mediante el uso de sensores de temperatura instalados en diferentes puntos al interior de la mezcla extendida y que es el indicativo la madurez de realizar el seguimiento de la evolución de resistencias mediante un histórico de temperaturas tomadas en obra desde el inicio de la mezcla hasta finalizar su etapa de fraguado.

De este modo, la temperatura interna de la muestra es una variable se estudia en este trabajo obedeciendo a dos connotaciones, el factor ambiental del suelo donde se construye este tipo mejoramientos con cementos asociados al clima y su ubicación en el relieve colombiano y el factor social, como impacto al desarrollo de una técnica no destructiva para ser aplicada en vías de tercer nivel, en suelos que deben someterse a mejoramientos con cemento.

Colombia está ubicada sobre la zona ecuatorial, la cual se encuentra caracterizada por presentar un rango de variabilidad en la temperatura relativamente estable durante el año, que varía de 1 a 3 °C; situación característica de la zona tropical (MINAMBIENTE-IDEAM, 2017), sin embargo el gradiente térmico diferencial entre la temperatura promedio máxima y mínima varía de 1.9 a 12.9 °C; así mismo cuenta con un amplio régimen de variabilidad en las temperaturas, como consecuencia de la topografía, conformada por diferentes elevaciones, que van de los cero metros

hasta superar los cinco 5.700 sobre el nivel del mar (msnm), la presencia de dos océanos; así mismo, algunas regiones como la Pacífica y la Amazonía son altamente influenciadas por la evaporación, en consecuencia Colombia presenta “regiones con temperaturas medias mayores a los 32 C, así como zonas de páramo y nieves perpetuas con temperaturas cercanas e incluso inferiores a los 0 C.” (MINAMBIENTE-IDEAM, 2017), consecuente a lo anterior, se denota que la temperatura en nuestra región es un factor importante a tener en cuenta, y que no es un tema claro en la estabilización de suelo cemento.

A partir de la firma del Acuerdo Final de Paz el 24 de noviembre del 2016 entre el gobierno nacional y las Farc EP, se ha priorizado la necesidad de conectar los centros o zonas de producción con las capitales. Una de las causas del bajo desarrollo de algunas regiones en Colombia es la existencia de vías en mal estado, intransitables o con restricciones para la circulación y altamente vulnerables a los fenómenos climáticos, que dificultan el desplazamiento de las comunidades e incrementa los costos logísticos (Gómez G. & Gómez, 2017), lo cual hace imposible una dinámica en la economía, que posibilite el engranaje productor- consumidor, especialmente en los lugares más apartados de la geografía que por las mismas condiciones han sido afectados por la violencia. Observando la necesidad de mejorar las condiciones de las vías terciarias el gobierno puso en marcha el plan 51/50 que mejorara las vías terciarias de 51 municipios (Ministerio del Transporte, 2017) cada uno con 50 km de vía para total de 2.550 kilómetros, que en su primera etapa invertirá cerca de \$ 50 mil millones de pesos, que busca facilitar la conectividad entre las zonas de producción con los centros urbanos, facilitando el acceso a las redes primarias.

Lo anterior implica la optimización de los recursos mediante técnicas que incluyan eficiencia y efectividad de los recursos existentes con resultados óptimos y duraderos que cumplan con las necesidades del productor.

Dentro de las técnicas empleadas para mejorar las condiciones de las vías terciarias en Colombia tenemos, construcción en: placa huella, suelo cemento, suelo cemento con tratamiento superficial doble, suelo cemento con mezcla densa en caliente, afirmado y suelo- cal, entre otros. (Sanz, y otros, 2016)

El objeto de estudio de este proyecto es el control de calidad del de suelo-cemento,

empleado como respuesta a la necesidad en la implementación de técnicas y tecnologías no destructivas, que apunten a la durabilidad de las redes viales construidas con bajo presupuesto, acordes las políticas de sostenibilidad nacional e internacional como: la accesibilidad, la equidad en el uso de la infraestructura y el empleo de procesos industriales limpios y ambientalmente racionales.

Partiendo de la necesidad de conocer el comportamiento de la mezcla en las condiciones climáticas del relieve colombiano, con el propósito de conocer la influencia de la temperatura en la madurez y el posterior módulo resiliente del material suelo cemento como un elemento importante en el pavimento, elaborado con afirmado (A-25) y tres tipos de cementos hidráulicos adicionados curados en tres rangos de temperatura diferentes.

1.1 PREGUNTA PROBLEMA

¿Es posible estimar del módulo resiliente del suelo cemento por el método de la madurez, a partir de la historia de temperaturas registradas durante el fraguado, teniendo en cuenta variables como la incidencia de la temperatura ambiente, el factor de madurez y la temperatura de referencia, calculado con el procedimiento de la NTC 3756 (ASTM 1074-19)?

2. JUSTIFICACIÓN

El Instituto Americano del concreto a través del comité 230, define el suelo cemento como una mezcla densa compactada de cemento portland, suelo / agregado, otros materiales cementosos (posiblemente) y agua. Utilizado principalmente como material de base para pavimentos, el cemento del suelo también se ha utilizado para protección de taludes, revestimientos de baja permeabilidad, estabilización de cimientos y otras aplicaciones (ACI, 2009). En ese orden, existen registros de investigaciones y normatividad que establecen directrices para lograr un mejor desempeño de este tipo de mezclas, logrado espesores en la estructura de un pavimento menores que los requeridos para las bases granulares que transportan el mismo tráfico en el mismo subsuelo.

La PCA -Portland Cement American- sostiene que sus características mecánicas son similares a las losas y su resistencia de viga no son iguales a las bases granulares “el cemento duro y rígido del suelo resiste el frío cíclico, la lluvia y daño por deshielo de la primavera” (PCA, 2018). En ese orden, el costo del suelo cemento se compara favorablemente con el pavimento de base granular, logrando el uso y la reutilización de materiales prestados en el lugar.

Y es justamente la reutilización y el reciclaje, premisas que están incluidas dentro de la agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, impulsada por las Naciones Unidas. Dentro del marco del objetivo 11 ‘Ciudades y comunidades sostenibles’ señala que desde el año 2015 la mitad de la humanidad, 3500 millones de personas, viven en las ciudades y se prevé que esta cifra aumentará a 5000 millones para el año 2030. Para enfrentar ese crecimiento poblacional establece siete metas, dentro de las que se destaca:

“De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la aplicación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad.”
(Naciones Unidas, 2018)

En consecuencia, la Asociación Mundial de la Carretera durante el XXV Congreso

Mundial de la Carretera de Seúl (Corea del Sur) que se celebró en noviembre de 2015, se aprobó el plan de desarrollo 2016-2019 donde se promueve el apoyo a las soluciones sostenibles y el desarrollo de nuevos materiales de pavimentación, incentivando la investigación en la búsqueda de resolver desafíos e incentivar en distintos países el fomento del uso de métodos y materiales que minimicen el uso de recursos naturales, de manera que se reduzca el consumo de energía y las emisiones, y que minimicen impactos en la salud con procedimientos como el reciclaje, el reemplazo de mezclas asfálticas en caliente por mezclas de baja temperatura, el desarrollo de nuevos aglutinantes y agregados reciclados. (Asociación Mundial de la Carretera, 2016).

Es así como las iniciativas internacionales no solo sirven como referentes para la planeación nacional, si no que impulsa y promueve técnicas más acordes con el desarrollo de las comunidades desde la parte rural hasta las zonas urbanas, impulsando la investigación y la apropiación de técnicas más sostenibles, que garanticen una mayor probabilidad de resiliencia en las infraestructuras y que, a su vez, el costo sea asequible.

De ese modo, para el año 2015 el departamento de planeación Nacional distribuyó la inversión en un 4.9% en vivienda, 13.7% en transporte y 10.2% en trabajo. Y a su vez, la dirección de Infraestructura y Energía Sostenible –DIES- cuenta que en los últimos ocho años (2010-2018), la red básica avanzó 1.350 km de doble calzada, se construyeron 464 Puentes y viaductos, 65 túneles, y en las redes de integración de vías terciarias, en más de 39.000 km. Estas obras de infraestructura traen consigo avances en el modo carretero medidos como la ampliación de la capacidad vial de 840 km de doble calzada a 2.181 km, la desintegración de 24.286 vehículos con capacidad superior a 10.5 Ton y edad superior de 20 años, 30 proyectos de concesión adjudicados con ahorros en tiempos de viaje del 30% y en costos de operación vehicular de 20%, además del 39.000 km de vías de tercer nivel y 20.000 km de vías secundarias intervenidas (Ministerio del Transporte, 2017).

Teniendo en cuenta los avances presentados en por el Departamento Nacional de Planeación y a pesar de muchos esfuerzos el desarrollo nacional de las vías terciarias aún crece lentamente. Según el Instituto Nacional de Vías, en el reporte del estado de la red vial del primer semestre del año 2017, la red de carreteras del país está constituida por aproximadamente 8.904,77 km, de los cuales el 72.86% están pavimentadas, el 26.35% se encuentran sin pavimentar y para ese mismo año

el 0.79% están intervenidas. Para el año 2016, según el informe de gestión del Ministerio de Transporte, se cofinanciaron más de 2.400 km para el desarrollo del inventario vial en los territorios y se realizó un piloto de 10 km en red terciaria en la vereda Plan de Zúñiga en el municipio de Caldonio - Cauca, zona de alta incidencia del conflicto armado y través del equipo de Regalías de la Dirección de Infraestructura, intervino en el año 2016, 43 proyectos de apoyo a los órganos colegiados de administración, de los cuales el 19 han favorecido las redes urbanas, 16 a las redes terciarias y 8 a redes secundarias (MINISTERIO DEL TRANSPORTE, 2015).

Sin embargo, el mismo reporte informa que, de los 2.346,48 km de carreteras que se encuentran sin pavimentar, 1.182,39 km están en malas condiciones, 821.5 km en condiciones regulares y 119.92 km están en muy malas condiciones. Solo el 9.49% están en buenas condiciones.

Aunado a lo anterior, en el informe denominado, Nota de Lineamientos Estratégicos Para La Agricultura en Colombia, realizado por el Banco Mundial en el año 2018, se propone que Colombia requiere pasar de un 6% al 22% de vías terciarias pavimentadas, mediante la inversión progresiva de 13 billones de pesos anuales que corresponden a un 1,2 del PIB, programa a implementarse hasta el 2030, con el fin de integrar el modelo de desarrollo agropecuario a las necesidades del país y promover la competitividad económica (Penagos, Tobón, & Pérez, 2018).

Para la rehabilitación de las vías terciarias la técnica constructiva a base de suelo cemento, se impone con mayor fuerza en nuestro país, por tres motivos: su costo, versatilidad y durabilidad; siendo la primera, la razón más importante. Ya que las políticas de los municipios ricos en vías terciarias, buscan subsanar la dificultad de accesibilidad, con poco presupuesto y mayor rapidez. Por esta razón, se ha impulsado comercialmente nuevos productos y posibilidades de estabilización química de subrasantes difíciles, con alto contenido de material cohesivo de plasticidad, actividad y sensibilidad alta.

El suelo cemento, no es solo un modelo estandarizado y validado por las Normas y Especificaciones para la Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías, que garantiza el incremento en la capacidad de soporte y la durabilidad por desgaste a la fricción. Es la alternativa más económica que mejora el nivel de servicio de una carretera de poco acceso, muy común en los municipios en desarrollo de nuestro

país.

Sin embargo, las técnicas de estabilización química con polímeros, nano-polímeros, suelo cemento, base cemento, son establecidas en condiciones generales de construcción, resistencia y diseño que no cuentan con una variable que, sin lugar a dudas, ha cambiado la percepción de estos métodos en diferentes condiciones climatológicas.

No obstante, dentro de la formulación de las políticas de infraestructura de transporte se encuentra la elaboración del proyecto de documento CONPES del Plan Maestro de Transporte Intermodal – PMTI, que permita conectar las regiones con el territorio nacional, impulsando el desarrollo regional. La tecnología del suelo cemento es una solución muy pertinente a la gestión de la red terciaria del país, de ahí que en la actualidad se estén llevando a cabo proyectos piloto en diferentes regiones el país para compararlas con el desempeño frente a otros pavimentos como el afirmado, la placa huella y los pavimentos convencionales.

Tal es el caso de empresas como Cemex, quienes han probado un aditivo que comercializan con la técnica del suelo cemento en municipios como: Jerusalén (Cundinamarca), Altos del progreso (Cesar) que cuentan con climas cálidos. La empresa de Desarrollo Sostenible (Edeso, Colombia) quienes han aplicado esta tecnología de suelo cemento en Rionegro (Antioquia). Cementos Argos, han tenido experiencias con la aplicación de esta técnica en Sincelejo (Sucre), Popayán (Cauca), diferentes municipios de Antioquia, entre otros (Santacruz, y otros, 2017).

Pese a estas experiencias, la temperatura interna de la mezcla debida a la energía liberada por el calor de hidratación sumada a la energía de compactación y a la temperatura de las diferentes condiciones climatológicas no están claramente definidas en la evolución de la resistencia durante la edad de la mezcla, más aún no existe un factor que mida la incidencia del clima en el diseño del suelo cemento.

Esta propuesta de investigación, permite romper paradigmas acerca del suelo cemento, frente a las condiciones de frontera de temperatura que maneja nuestro país. Y si llegara el caso, identificar un factor de mayoración que correlacione la incidencia de la temperatura en los tiempos de fraguado de la mezcla de suelo cemento.

Con esta motivación, se propone realizar este proyecto de investigación que

mediante ensayos de laboratorio busque medir los resultados de módulo resiliente de un suelo caracterizado como arena arcillosa mezclado con cemento, elaborado, curado y sumergido en tres rangos de temperatura diferentes.

La metodología para la elaboración de las muestras se ajustará a los parámetros referenciados en las normas y especificaciones del Artículo 350 del Instituto Nacional de Vías, versión 2013. Para el ensayo de humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo cemento, descrito en la norma INV E-612-13, para el ensayo de curado de especímenes, de la Norma INV E-613-13, se realizarán en tres condiciones térmicas, una a 11°, 30° y la otra a 40°C.

Esta propuesta de investigación, busca dar claridad en la incidencia de la temperatura del curado del suelo cemento en la evolución de su resistencia mecánica y al módulo de resiliencia, con muestras elaboradas y curadas en tres límites de temperatura controladas: a 11, 30 y a 40°C, simulando las condiciones ambientales que se manejan en las obras de infraestructura colombianas.

En ese orden, el método consiste como primera medida en realizar tres diseños de mezcla de suelo cemento que funcione como capa estructural de pavimento (SC-R), constituida por una mezcla de material seleccionado: arena arcillosa (A-25) y cemento hidráulico. Cada diseño empleará un tipo cemento distinto: Uso general, uso estructural y uso estabilización de suelos, y la elaboración de muestras a compresión se realizarán conforme a la metodología definida por la norma para ensayo INV E 613-13.

La resistencia para el diseño de mezcla se determina empleando cilindros moldeados compactados y fallados en una máquina de ensayo a compresión y la durabilidad, se establece con el ensayo de humedecimiento y secado de mezclas compactadas, mediante doce ciclos de humedecimiento y secado conforme a la Norma INV E-612-13.

Una vez se obtenga el diseño de mezclas, se procede a elaborar muestras para medir la madurez a través de calorimetrías y la resistencia a la compresión, y al cabo de los 28 días de maduración se fallarán nueve muestras en la máquina Triaxial cíclica, para medir el módulo resiliente, de las tres mezclas de suelo cemento (MCH, UG y ART) curadas en tres temperaturas: 11, 30 y 40°C.

Consecuente con lo anterior, la propuesta se ajusta a la línea de investigación del

programa de la maestría en Infraestructura vial: “Caracterización y comportamiento de materiales en ingeniería civil”. Y se realizará empleando una metodología experimental, a través de ensayos de laboratorio y los resultados se analizarán siguiendo un modelo cuantitativo, en las instalaciones del laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S. ubicado en el municipio de Girardot, y en el laboratorio de la Universidad Pontificia Javeriana de Bogotá.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer un modelo matemático soportado por el método de la madurez, que use la historia de temperaturas registradas durante el fraguado, el factor de madurez y la temperatura de referencia de manera que se pueda predecir el módulo resiliente del suelo cemento a los 28 días de edad.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar el diseño de tres mezclas de suelo cemento (SC) con un suelo patrón definido como arena arcillosa con grava (A-25), usando para cada uno un tipo de cemento adicionado diferente: Uso estabilización de suelos (MCH), Uso general (UG) y Uso estructural (ART), para una resistencia a compresión de 4.5 MPa a los 7 días de edad y una pérdida máxima de masa en prueba de humedecimiento y secado del 10%, con el propósito de determinar las condiciones del método que se podrían optimizar para obtener mejores resultados de densidad máxima y humedad óptima.
2. Establecer la resistencia a la compresión en función de la edad para especímenes de SC curados en cuartos húmedos mantenidos a tres temperaturas diferentes, de manera que se pueda determinar experimentalmente la temperatura de referencia (edad en la cual se asume que se inicia el desarrollo de la resistencia) y la energía de activación, de los tres diseños de mezcla.
3. Calcular el índice de madurez y la edad equivalente de tres tipos de suelo cemento: (SC-MCH), (SC-UG) y (SC-ART) a partir de la historia de temperaturas monitoreadas durante su edad de fraguado, en un intervalo de 30 horas contadas a partir de la compactación de la mezcla.
4. Medir el módulo resiliente de los tres diseños de mezclas de SC, empleando muestras cilíndricas curadas durante 28 días de edad en cuartos húmedos mantenidos a las mismas tres temperaturas, que se emplearon para el cálculo de la energía de activación.
5. Correlacionar las tres variables: temperatura de fraguado, índices de

madurez, edad equivalente y módulo resiliente, de manera que se logre obtener un diagrama cuya función permita calcular el módulo resiliente mediante el registro de temperaturas de fraguado.

MARCO REFERENCIAL

3.3 MARCO DE ANTECEDENTES

Después de la actualización de la Norma Técnica Colombiana NTC 121 en el año 2014, se cambia la especificación de cementos Portland a cementos hidráulicos por desempeño, allí se elimina la restricción sobre la composición del cemento y da vía libre al uso de adiciones para mejorar algunas propiedades que aportan al comportamiento mecánico para condiciones especiales. Aunque la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales –ASTM- cuenta con este tipo de normatividad en el ASTM C1157, en Estados Unidos se mantiene la especificación del Cemento Portland ASTM C150, ya que sostienen que la reducción exagerada de Clinker podría traer complicaciones asociadas a la ausencia de carbonatos de calcio dentro de la pasta (ASTM International, 2018).

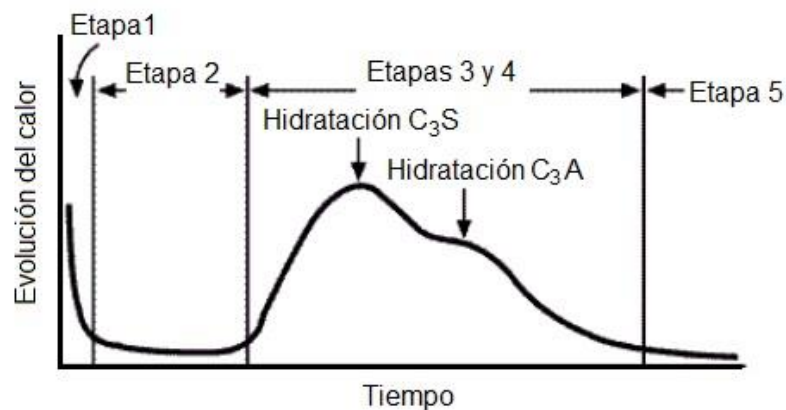
No obstante, se deben practicar tanto las pruebas químicas que permiten verificar el contenido y la composición del cemento, como las pruebas físicas demuestran criterios físicos. En C150 / M 85 y C595 / M 240, las propiedades físicas y químicas son limitadas, mientras que en C1157, los límites son casi enteramente requisitos físicos, afirma el ACI (ACI, 2013).

Es así como se determina que los ensayos químicos como el análisis de óxido (SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , etc.) posibilitan el cálculo de la composición de la fase de cemento. Según la ASTM C150/ M85 los cementos de tipo II están limitados a un máximo de 8 por ciento en masa de aluminato tricálcico (C_3A). Algunos óxidos también están limitados por las especificaciones como el Óxido de magnesio (MgO) que se limita a un máximo del 6 por ciento en peso para los cementos portland, ya que éste puede afectar la solidez a niveles más altos. (PCA, American Cement Manufacturers).

Una vez el cemento se pone en contacto con el agua, se inicia el proceso de hidratación cuyo seguimiento se puede hacer a través de la curva de liberación de calor en función del tiempo. En ella, se identifica el período latente o durmiente, que es el tiempo previo al comienzo del fraguado y endurecimiento de las pastas,

morteros o concretos. A partir de iniciado el fraguado, es aconsejable mantener las mezclas en reposo para que se completen sus fraguados y comiencen a desarrollarse sus capacidades resistentes. Algunos estudios analizan dicho período a través de la velocidad de contracción química y las pruebas de calorimetría se utilizan para analizar el tipo de cemento, su composición, finura, temperatura de hidratación y la influencia de las adiciones minerales activas, ya que las operaciones de mezclado, colocación y compactación de los concretos, se verán afectadas por la incorporación de adiciones puzolánicas según el tipo de cemento que se utilice (Rahhal, Pedrajas, Irassar, & Talero, 2014).

Figura 3 Evolución del calor como función del tiempo para la pasta de cemento.



Fuente: Calor de hidratación del concreto, notasdeconcreto.blospot.com, 2011.

Esa evolución del calor es función del tiempo para pasta de cemento, tal como se muestra en Figura 3. La etapa 1 se produce el calor de humedecimiento o del hidrólisis inicial (hidratación del C₃A y del C₃S). La etapa 2, latente o durmiente, es el período de incubación relacionado al tiempo de fraguado inicial. La etapa 3 es una reacción acelerada de los productos de hidratación que determina la tasa de endurecimiento y el tiempo de fraguado final. En la etapa 4 hay una desaceleración de la formación de los productos de hidratación y determina la tasa de aumento de resistencia inicial. La etapa 5 es lenta, caracterizada por la formación estable de productos de hidratación, estabilizando la tasa de aumento de resistencia a edades avanzadas.

Tras cien años de investigación de la Asociación de Cemento Portland se ha encargado de publicar guías de aplicaciones, métodos y materiales para el diseño y control de mezclas de concreto, logrando avances en tecnologías que van desde

nuevos materiales y métodos de pruebas hasta mejoras en las propiedades del concreto, que van de la mano con la actualización de estándares como el ASTM Internacional, la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras y Transportes de Estado (AASHTO) y el American Concrete Institute (ACI).

De esta manera nace el grupo de investigación CSHub Mit Concrete Sustainability HUB, cuya función yace de investigaciones que aportan a la construcción del conocimiento en materia de cementos, quienes para noviembre de 2016, examinaron el riesgo de fractura de los pavimentos de hormigón debido a los ciclos térmicos a través de modelos de fracturación por a los cambios de temperatura y proponen un método para estimar el riesgo del craqueo térmico en condiciones de estado transitorio ubicado durante la etapa 2 de la curva de evolución del calor en función del tiempo (Figura 3).

...Cuando el pavimento está experimentando un cambio de temperatura en ese estado transitorio, es cuando existen tanto fuerzas axiales como momentos, sin embargo, una temperatura constante solo en la condición de estado estable induce fuerzas axiales, pero si hay cambio de temperatura la energía de liberación debido al gradiente térmico puede ser más alto que su valor en un estado estable... (MIT CSHub, 2016)

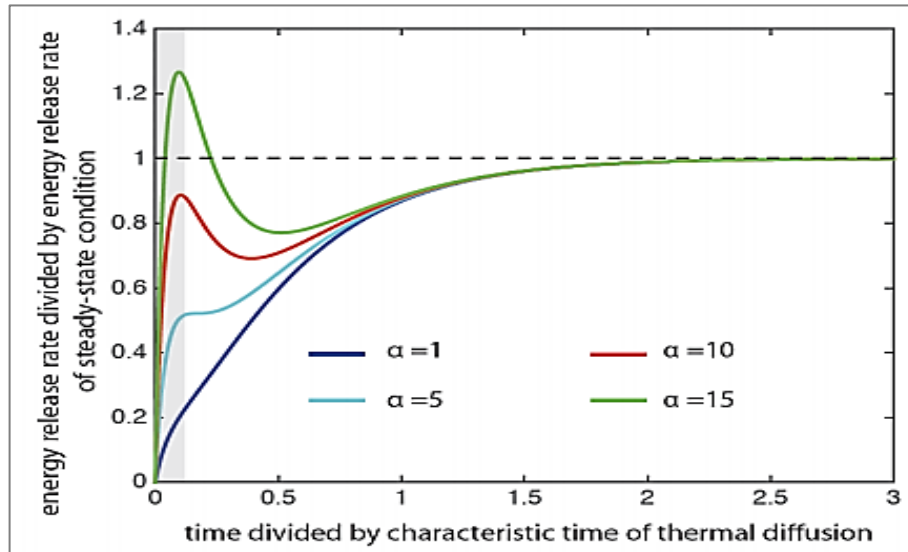
Esto significa que la fractura es más probable que ocurra antes de que el pavimento alcance la condición de estado estable, en un proceso dependiente del tiempo. Tras esta investigación, se sugiere que la incorporación de información sobre el riesgo de fractura durante el período transitorio pueda permitir a los ingenieros desarrollar pavimentos menos vulnerables al agrietamiento.

Figura 4 se observa cada línea (α) que representa un pavimento con una térmica diferente, coeficiente de difusión (una medida de la eficacia con la que el pavimento es capaz de conducir el calor). Generalmente se espera que el perfil de temperatura sea finalmente el mismo para todos los sistemas (representados por la línea discontinua), pero los valores intermedios difieren debido a la diferencia de calor transferida.

Para mejorar estas las condiciones cementicias del Clinker, se han trazado mecanismos para diseñar métodos y adiciones con el propósito de modificar la

estructura molecular, basados en estudios a meso escalas, a partir de la nanotecnología.

Figura 4. Tasa de liberación de energía dividida por la tasa de liberación de energía en estado estable vs. Tiempo dividido por tiempo característico de difusión térmica.



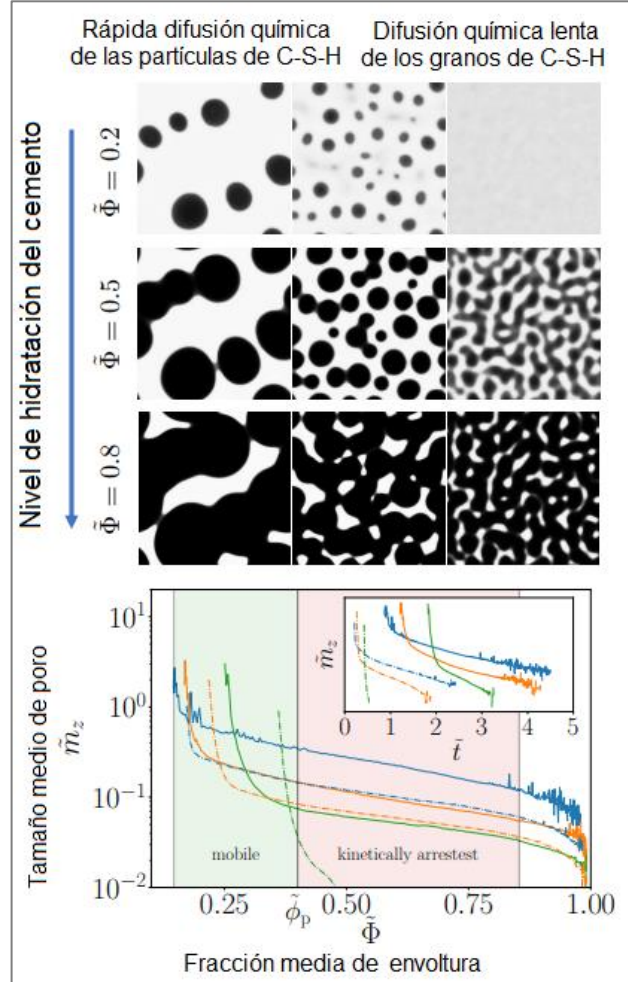
Fuente: MIT CSHub. Minimizing Thermal Cracks in Concrete Pavements. Massachusetts, EE. UU.: CSHub@MIT, 2016. Resumen de la Investigación.

Los recientes esfuerzos de modelado por los investigadores de CSHub demostraron una técnica para modelar la velocidad de reacción y difusión química de las partículas de C-S-H durante las primeras etapas del fraguado del cemento. Observando que, al mezclar agua con Clinker, los iones se disuelven en la solución de poro y precipitan granos de tamaño nanométrico de hidratos de silicato de calcio (C-S-H). Estas unidades de la estructura molecular son el pegamento que une arena y grava. La organización de estos granos C-S-H influye drásticamente en el rendimiento mecánico del hormigón. El modelo predice cómo la distribución espacial y la densidad de empaquetamiento de las partículas C-S-H cambian con el tiempo.

El nueve de agosto de 2018, el CSHub público un informe con la representación de la Figura 5, donde se evidencia que la envoltura derecha muestra la evolución de estos patrones de densidad para varios entornos de reacción que corresponden a niveles crecientes de súper saturación, tanto la densidad de la envoltura local de C-S-H y los patrones de cemento que se desarrollan bajo diferentes ambientes de reacción y las tasas de reacción heterogéneas crean una fase distinta, de mayor

separación, causando que se formen poros más grandes.

Figura 5 Modelo de reacción-difusión para determinar patrones de meso escala en pasta de cemento



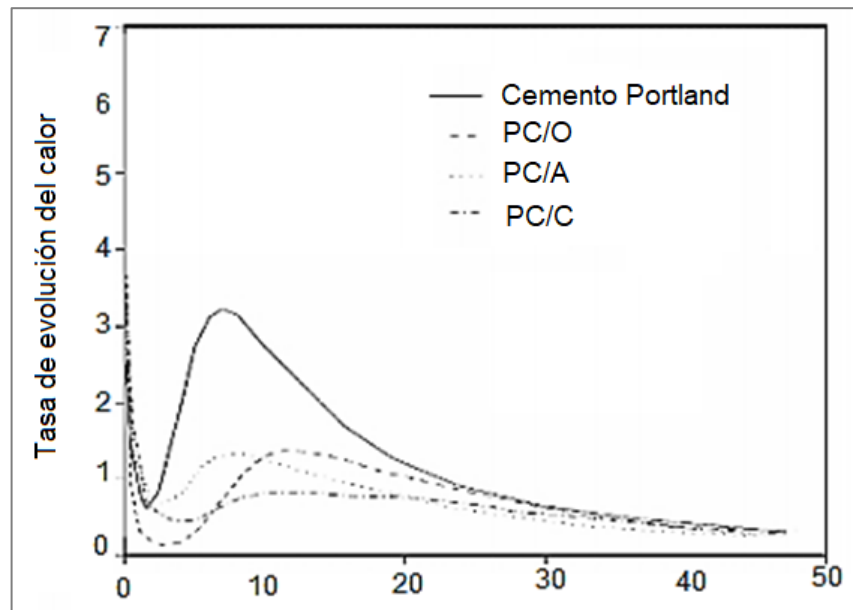
Fuente: A Reaction-Diffusion Model to Determine Mesoscale Patterns in Cement Paste. Massachusetts, EE. UU.: CSHub@MIT, 2018.

Así mismo, el tamaño de poro representado en función de la extensión de la reacción global graficada contra el tiempo normalizado. Los colores de línea indican qué tan rápido se difunden los granos de C-S-H durante la fase inicial en el período de formación del núcleo: azul, para difusión rápida, verde para difusión lenta y las líneas discontinuas indican sistemas de baja sobresaturación. Concluyendo que su conectividad durante las primeras fases del fraguado determina la resistencia general y la tenacidad de cemento, si el ambiente de reacción e interacción de

partículas de C-S-H durante las primeras etapas de la fijación del cemento pueda ser controlada, de manera que si ésta es más estricta, se puede diseñar un material más resistente modificando su nano textura (MIT CSHub, 2018).

Paradójicamente y sin conocer a profundidad lo que ocurre manométricamente en el concreto, el uso de adiciones puzolánicas que reducen el calor de hidratación en los cementos hidráulicos son utilizadas desde épocas muy antiguas. Pavimentos y estructuras romanas se encuentran en buen estado, poniendo en evidencia la durabilidad de conglomerantes utilizados. Estudios demuestran que, “la reactividad de las adiciones está ligada con la condición amorfa de su estructura, fortaleciendo otras propiedades como su capacidad de resistencia a sulfatos y a cloruros (V. Rahhal, A. Delgado, J.P. Gutiérrez, & R. Talero, 2008)”.

Figura 6. Curva calorimétrica de Cemento Portland con diferentes mezclas de adiciones



Fuente: Tomado de (V. Rahhal, A. Delgado, J.P. Gutiérrez, & R. Talero, 2008)

Es más, de la Figura 6 publicada por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, se dibujan cuatro curvas de calorimetría de la pasta de cemento hidráulico, la línea continua hace referencia al cemento Portland (CP) quien presenta mayor tasa de evolución de calor, mientras que las líneas discontinuas hacen referencia a la mezcla del cemento portland con tres puzolanas naturales españolas, O de Olot-Gerona sílico-férrico-alumínica, A de Almagro-Ciudad Real

sílico-alumínica y la C de Canarias alumínico-silícea. Comprobando que el uso de adiciones puzolánicas en la pasta, efectivamente reduce en gran medida esa tasa de evolución de calor y sus consecuencias en el fraguado y en la retracción.

De otro lado, la temperatura externa incide de manera directa en la evolución de la resistencia mecánica, pruebas experimentales revelan que el concreto hidráulico expuesto a una temperatura temprana alta (40°C), alcanza una mayor resistencia a edades tempranas, pero eventualmente a edades avanzadas su crecimiento en la resistencia es menor. Así mismo, un concreto expuesto a una temperatura baja (5 ° C), desde edades tempranas, tienen una resistencia a la edad temprana más baja, pero casi la misma resistencia a la edad más tardía que la muestra sometida al curado isotérmico (20 ° C). Solo a partir de los experimentos en condiciones térmicas condicionados, el cambio de las temperaturas de curado parece ser efectivo en los concreto dentro de los primeros 3 días de edad y la variación en la temperatura que se producen en edades posteriores a 3 días no parecen tener ningún efecto significativo en la evolución de la resistencia (Boubekur, Eziane, & Kadri, 2014).

Con el fin de predecir la resistencia del concreto hidráulico se practican pruebas de madurez que permiten analizar la evolución de las resistencias en diferentes condiciones de curado. Sin embargo, otros estudios analizan este método en concretos masivos, donde la temperatura varía en toda la sección del elemento. Chen y Yikici, abordaron este interrogante con monitoreos controlados de temperatura a una muestra cúbica de 1.80m de lado y al cabo de la edad de maduración final (28 días) se extrajo un núcleo del centro del cubo, para luego medir su resistencia real a la compresión en diferentes puntos y compararla con la predicción teórica de la prueba de calorimetría (ver Figura 7)

Los resultados indican que la resistencia del concreto aumenta con la profundidad, mientras que las muestras tomadas cerca de la superficie fueron significativamente menores.

Figura 7. Extracción de cubos de seis pies de largo (1.80m)

Proceso de extracción de núcleos, prueba de calorimetría y muestra de núcleo de 6 pies

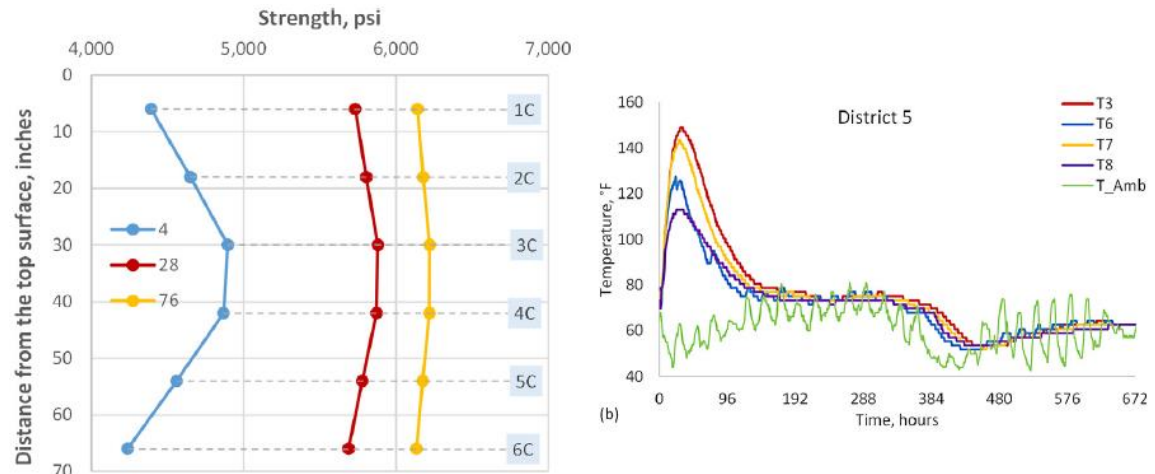


Fuente: Tomado y editado de (Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete, 2015, pág. 806)

Así mismo, concluyeron que la resistencia pronosticada de la superficie superior siempre fue mayor a la resistencia real medida desde el núcleo, mientras que las resistencias pronosticadas en el centro del cubo, siempre fueron menores que la real (Yikici & Chen, 2015).

La responsabilidad de este resultado, se le atribuye a la variación de la temperatura interna en los concretos masivos, ya que durante la maduración del cubo se instalaron sensores de temperatura a diferentes profundidades, identificando un mayor incremento en el centro del cubo, tal como se muestra en la Figura 8. Es decir que, aunque la temperatura externa sea controlada, en concretos masivos el calor de hidratación de la pasta altera significativamente las condiciones del curado, registrando una variabilidad en la madurez del concreto.

Figura 8. Resistencia calculada del núcleo del concreto a través del método de madurez a lo largo de la dirección de profundidad debajo de la superficie superior, representada a los 4, 28 y 76 días de edad



Fuente: Tomado y editado de (Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete, 2015, pág. 809)

En Colombia, Centro Argos para la Innovación adelanta investigaciones que buscan desarrollar concretos y cementos adicionados con nuevas y mejores funcionalidades, impulsando el desarrollo tecnológico y sostenible de esta industria. Para agosto de 2017, salió al mercado el cemento ‘Uso estabilización de suelos’ como un cemento especial referenciado por la NTC 121 como MCH, Moderado Calor de Hidratación. Es un cemento adicionado que facilita su instalación y mitiga el riesgo de fisuración con un calor de hidratación a 7 días de 70 kcal máximo y una resistencia a la compresión a la misma edad de 11 MPa, según su ficha técnica (ARGOS, 2018).

Ahora bien, se conoce que las capas de suelos finos estabilizados con cemento son propensas a agrietamientos por movimientos generados por la contracción por secado, la contracción térmica y el mismo tránsito vehicular. El uso de cementos adicionados es una alternativa que ha sido estudiada, a través de pruebas de módulos de elasticidad, capacidad de Soporte CBR, entre otros. Kolias, Kasselouri y Karahalios midieron la efectividad del uso de las cenizas volantes con alto contenido de calcio en una mezcla de suelo cemento, en la estabilización de suelos finos arcillosos de alta compresibilidad, concluyendo que la adición de cenizas volantes en el suelo cemento proporciona un mejor fraguado y endurecimiento y la

combinación de estos dos aglutinantes puede aumentar la resistencia temprana y final del material estabilizado. Estudiando el CaO libre de las cenizas volantes se observa que reacciona con los componentes de arcilla (SiO_2 y los otros silicatos de aluminio), lo que lleva a la formación de Tobermorita e hidratos de silicato de calcio y aluminio también actuando como una puzolana que atrae el incremento en las propiedades mecánicas, como la resistencia (compresión, tracción y flexión), el módulo de elasticidad y CBR. Si se toman las medidas adecuadas para evitar o minimizar el agrietamiento de la capa estabilizada y mantener los altos valores del módulo, se pueden lograr reducciones sustanciales del espesor total del pavimento, y en particular del curso del asfalto (Kolias, Kasselouri, & Karahalios, 2005).

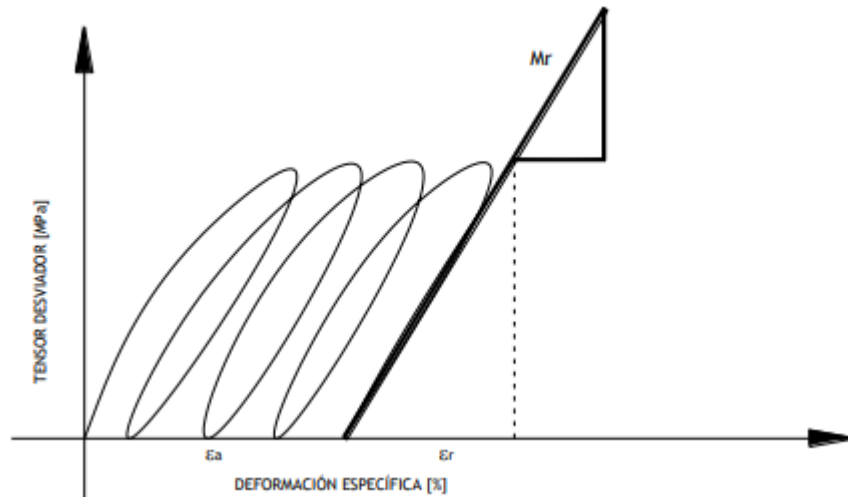
Del mismo modo, recientemente se investigó los efectos de la adición del carbón metacaolín CMK en las propiedades del suelo cemento, demostrando que tiene propiedades que mejoran resistencia a la compresión uniaxial –UCS- del suelo cementado. Los resultados de TG y XRD indican que el consumo de CMK puzolánico CH y genera más productos de hidratación, incluyendo Aft, CA-S-H, y C-S-H. Los resultados de la prueba SEM indican que CMK hizo el interfacial Zona más densa y mejorada la microestructura del bulto en su fase aglutinante. La resistencia mecánica del CMK se atribuyen a su reactividad puzolánica, acelerando la hidratación del cemento, y efecto de relleno (Linhao, Xiangyu, Yin, & Xiaohong, 2018).

Sin embargo, la resistencia de un suelo a diferencia de los concretos hidráulicos, no es una propiedad invariable de este, sino que su valor oscila dentro de unos amplios límites dependiendo de las condiciones impuestas como el drenaje y la presión intersticial en cada caso.

El suelo cemento es un material particular que debe analizarse desde una perspectiva especial a partir de su uso y funcionalidad, ya que su mecánica no se entiende no como un concreto hidráulico, ni como un suelo. Es un híbrido que apropia características de uno y otro, logrando desempeños particulares. Por todo esto, la mejor manera de medir el desempeño mecánico de un suelo cemento es a través de cargas dinámicas, mediante pruebas que determinen el módulo resiliente de un material que formará parte de la estructura de un pavimento diseñado a la fatiga y no como un concreto diseñado a cargas puntuales máximas o como un suelo caracterizado en función a un estado de consolidación. De esta manera se definen los estados admisibles del suelo cemento diseñado bajo distintos estados

de tensiones a partir de combinaciones de tensor desviador y presión de confinamiento, el suelo alcanza una deformación total con una componente elástica, recuperable o resiliente y otra plástica, teniendo en cuenta una el comportamiento no lineal del material (Brizuela, Alderete, & Rivera, 2013).

Figura 9. Definición de módulo resiliente



Fuente: Tomado y editado de (Brizuela, Alderete, & Rivera, 2013, pág. 2)

La normatividad colombiana regulada por el Instituto Nacional de Vías, se fundamenta en la metodología para el diseño de pavimentos flexibles de la AASHTO, y esta a su vez, se soporta en el Módulo de resiliencia –MR–, como parámetro que representa la capacidad de soporte de los materiales de fundación y de la estructura del pavimento. Esta condición se determina mediante ensayos triaxiales dinámicos en muestras compactadas sometidas a cargas repetidas, en condiciones que representan una simulación de las condiciones físicas y estados de tensión entre los materiales debajo de los pavimentos flexibles sujetos a cargas de ruedas en movimiento. El método de la AASTHO T307-99, es aplicado a muestras no modificadas de suelos naturales y compactados, y a muestras naturales compactadas y a muestras alteradas de suelos como bases, subbases compactados en laboratorio (American Association of State Highway, 2017).

Existen actualmente estudios que analizan el comportamiento dinámico de arcillas colombianas, a través de pruebas de módulo resiliente, donde se establecen que

los materiales cohesivos deben ser evaluados desde una repetición de ciclos de carga donde sus deformaciones tengan un comportamiento estable y antes de esto se dan efectos de densificación, acomodamiento y aumento de la rigidez (Monzón Chaparro, 2012). Porque su relación de vacíos disminuye, y ocurre el efecto de compactación por consolidación, modificando su comportamiento natural en las condiciones reales de carga. De la misma manera, se observa que en las arcillas que el MR presenta un comportamiento creciente, contrario a lo definido por la literatura, debido a que para este tipo de materiales cohesivos debe ser calculado cuando las deformaciones se estabilicen, siendo el momento en el cual el suelo experimenta deformaciones elásticas o resilientes (Ídem).

Sin embargo, para las bases granulares ocurre lo contrario, el módulo resiliente disminuye para las condiciones de mayor cantidad de agua y menor compactación, consistente con la teoría, ya que los esfuerzos de cortante octaédricos se vuelven significativamente más influyentes en el comportamiento de los materiales granulares, evidenciado la importancia del contenido óptimo de agua y la buena compactación (Jiménez Acuña, 2009).

3.4 MARCO TEÓRICO

Para comprender la relación entre la temperatura en la madurez del suelo cemento con su resistencia y el módulo resiliente, es necesario dar claridad a los conceptos básicos como el calor de hidratación de mezclas cementantes, la madurez en un concreto, que es un suelo cemento y sus características y el módulo de resiliencia como una resistencia mecánica de los pavimentos, que serán explicados a continuación, a partir de fundamentos teóricos nacionales e internacionales.

3.4.1 ¿Qué es el calor de hidratación en el concreto hidráulico?

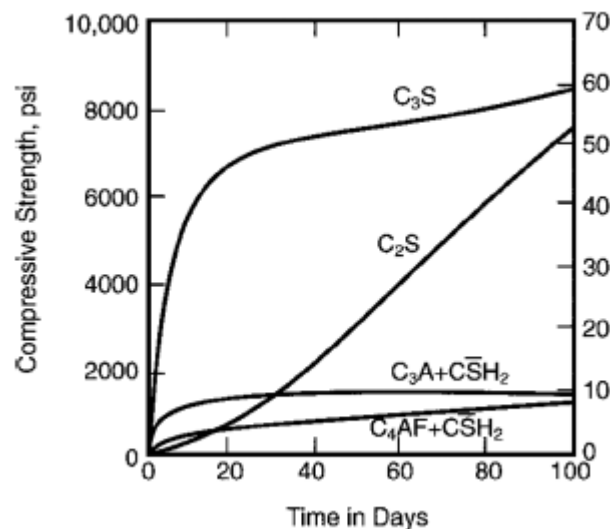
El cemento portland es un pegante inorgánico, compuesto principalmente por silicatos y aluminatos de calcio, los cuales se activan con el agua formando enlaces que le confiere propiedades de solidificación, resistencia mecánica y durabilidad. El cemento se fabrica a través de la combinación química controlada de silicio, aluminio, hierro y otros ingredientes (PCA America's Cement Manufacturers, 2018). Los materiales más comunes que se usan para fabricar cemento incluyen piedra caliza, conchas o marga combinados con esquisto, arcilla, pizarra, escoria de alto horno, arena de sílice y mineral de hierro, estos materiales cuando se calcinan forman una sustancia parecida a una roca (PCA, 2017), y que al enfriarla

abruptamente se activa, rompiendo sus enlaces cristalinos para convertirse en una estructura amorfa, que después de ser llevado a la molienda, se convierte en el polvo gris finamente molido que comúnmente consideramos como cemento.

La composición química resultante de la activación es la combinación de óxido de calcio (CaO), óxido de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3) y una pequeña cantidad de sulfato de calcio (CaSO_4). La proporción de cada uno de estos componentes le da unas características especiales al cemento hidráulico.

El aluminato tricálcico (C_3A) por ejemplo, es mucho más reactivo que silicato tricálcico (C_3S) y puede llevar a un fraguado prematuro e irreversible si la reacción no es moderada, por esta razón la adición de sulfato de calcio en forma de yeso, se utiliza para controlarlo y evitar el fraguado. En la siguiente figura se puede ver que el C_3S adquiere mayores resistencias en las primeras semanas, mientras que el silicato dicálcico (C_2S), contribuye a la resistencia a largo plazo. Aunque las C_3A y C_4AF aportan principalmente a la rigidez temprana, su función principal es servir de catalizador durante la reacción química.

Figura 10. Resistencia de los componentes del cemento



Fuente: (ACI, 2013, pág. 30)

Otra característica del cemento es la finura, esta tiene un efecto directo sobre la velocidad a la que el cemento se hidrata. A mayor finura la hidratación es más rápida por que se generan más rápidamente el calor y se logra una mayor resistencia

inicial. Mientras que el cemento más grueso, es decir de 250 a 280 m² / kg, Blaine tiende a presentar una resistencia temprana más baja y puede aumentar la exudación del concreto. Por el contrario, una finura superior a 400 m² / kg, Blaine tiende a aumentar el desarrollo temprano de la fuerza y reducir la exudación (ACI, 2013).

En ese orden, el calor de hidratación varía mucho con la composición del cemento, la finura y las proporciones del concreto, siendo C₃A y C₃S los principales responsables de la alta evolución del calor. Los cementos finamente molidos aumentan la tasa de hidratación, pero el calor total de hidratación durante un largo tiempo no se ve particularmente afectado. El calor de hidratación se puede definir como la cantidad de calor liberado (en cal / g o kJ / kg de cemento no hidratado) durante el fraguado y endurecimiento del cemento portland a una temperatura dada (Ibíd).

Según el informe E3-13, del Instituto Americano del Concreto, el calor se libera durante las reacciones de hidratación de los compuestos de cemento. El aumento de la temperatura en una masa de concreto dependerá del contenido de cemento; la tasa de hidratación (determinada por la finura del cemento, la temperatura ambiente y los aditivos); la composición del cemento; el volumen de agregados; el espesor del elemento de hormigón; y la velocidad a la que el concreto pierde el calor hacia los alrededores. El calor de hidratación puede causar un aumento considerable de las temperaturas del concreto en los primeros días de hidratación, y la temperatura continuará aumentando en el concreto en masa durante períodos más largos. En clima frío, el calor de hidratación se puede usar para ayudar a proteger el concreto de la congelación y aumentar la tasa de hidratación. Las cenizas volantes y otras puzolanas o el cemento de escoria se pueden usar como un reemplazo parcial del cemento portland para controlar la ganancia de calor de las mezclas en climas cálidos o en concreto en masa.

Para que un concreto hidráulico no enfrente esfuerzos de tensión por cambios bruscos de temperatura, es conveniente llevar un control de temperatura. Estudios indican que en clima frío no es conveniente que el concreto se enfríe a un ritmo más rápido que 3°C por hora para las primeras 24 horas. La mezcla se debe proteger de la congelación empleando materiales y productos aislantes que retienen la humedad, por lo menos hasta que el concreto adquiere una resistencia mínima de 3.5 MPa.

Por lo contrario, en clima caliente una temperatura de curado inicial mayor dará como resultado una ganancia rápida de resistencia y resistencias últimas más bajas. Es conveniente hidratar generosamente la mezcla para bajar la temperatura de curado y protegerse contra cambios abruptos de temperatura en la noche, impidiendo un enfriamiento más rápido de 3°C por hora, por lo menos durante las primeras 24 horas (NRMCA. National Ready Mixed Concrete Association, 2017).

3.4.2 ¿Qué es la Madurez del concreto?

La madurez de un concreto hidráulico se entiende por la relación entre la resistencia mecánica con la edad y el desarrollo de la temperatura. Los métodos de madurez usan el concepto fundamental de que las propiedades del concreto se desarrollan con el tiempo en la medida que el cemento se hidrata y libera calor. La tasa de desarrollo de resistencia se relaciona con la tasa de hidratación del cemento (NRMCA. National Ready Mixed Concrete Association, 2017).

El calor generado por la reacción de la hidratación, registra un incremento de temperatura, que, a su vez se ve reflejado con un incremento de resistencia. Este método permite estimar la resistencia en el sitio usando un perfil de temperatura, calibrado previamente en laboratorio, siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C 1074, *Standard Practique for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*, homologada en Colombia por la NTC 3756, *Procedimiento para estimar la resistencia del concreto por el método de la madurez*.

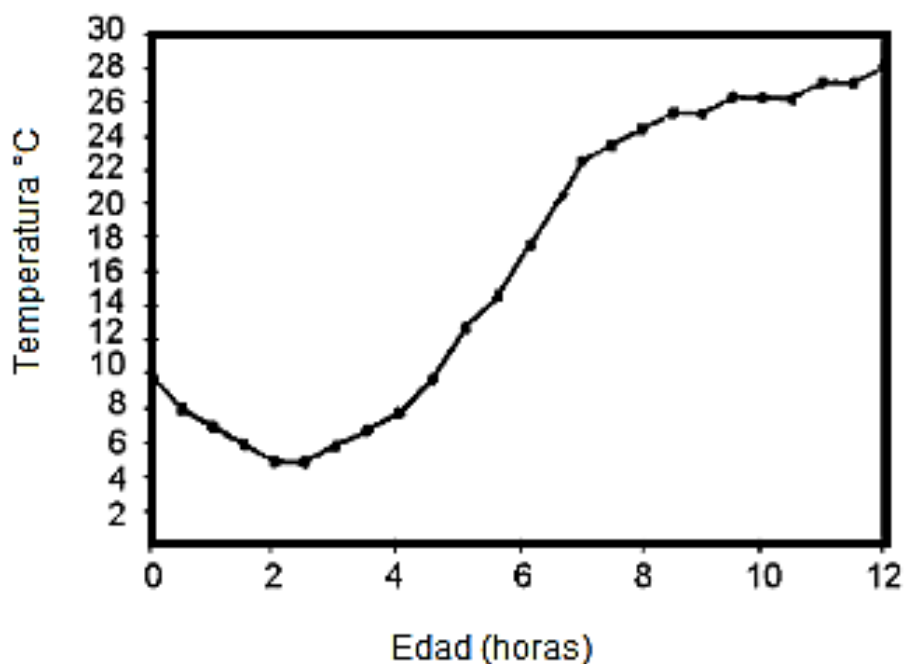
Esta norma contempla dos métodos, una función Nurse-Saul que consiste en establecer una tendencia lineal entre las temperaturas y el tiempo a partir de un dato de temperatura por debajo del cual se asume que no ocurre hidratación del cemento. Y la otra, es la función Arrhenius, donde se asume una tendencia exponencial del desarrollo de resistencia con la temperatura, este índice es expresado en términos de edad equivalente referida a una temperatura. Esta última, es considerada más precisa, sin embargo, la función Nurse-Saul es más usada por varias agencias estatales de carreteras de los EEUU, por su sencillez.

El método de madurez se resume en los siguientes pasos:

- Paso 1. Monitorear el desarrollo de la temperatura en las muestras de prueba introduciendo sensores de temperatura en el centro los especímenes, con registradores de datos, con el fin de establecer un registro histórico en

intervalos de 0.5 horas, para luego realizar el diagrama tal como se muestra en la Figura 11 y encontrar con claridad la etapa de hidratación de la mezcla.

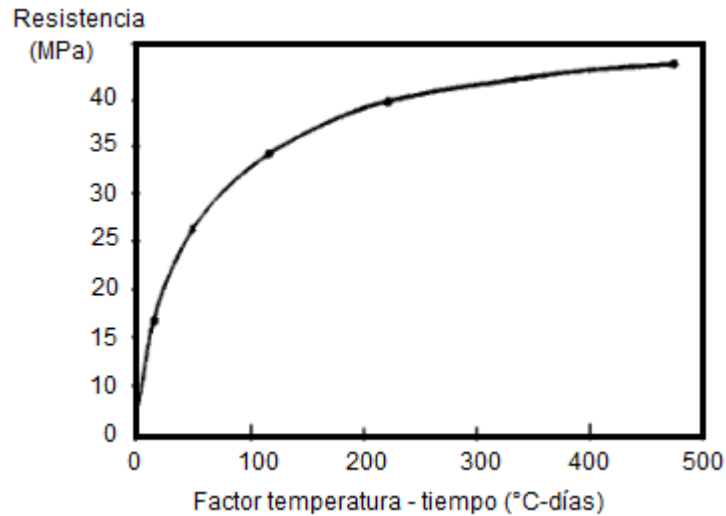
Figura 11. Historia hipotética de la temperatura usada para ilustrar el cálculo de factor temperatura-tiempo y edad equivalente.



Fuente: ICONTEC. Procedimiento para estimar la resistencia del concreto por el método de la madurez. [ed.] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. *Ingeniería Civil y Arquitectura*. Bogotá D.C.: s.n., 2002.

Paso 2. Medir la resistencia a la compresión de cilindros curados en condiciones normales, en diferentes edades de curado. Para cada ensayo se registra el índice de madurez promedio de los valores de temperatura mostrados (ver Figura 12).

Figura 12. Ejemplo de relación entre la resistencia a la compresión y el factor temperatura-tiempo



Fuente: ICONTEC (2002), NTC 3756, pág. 6.

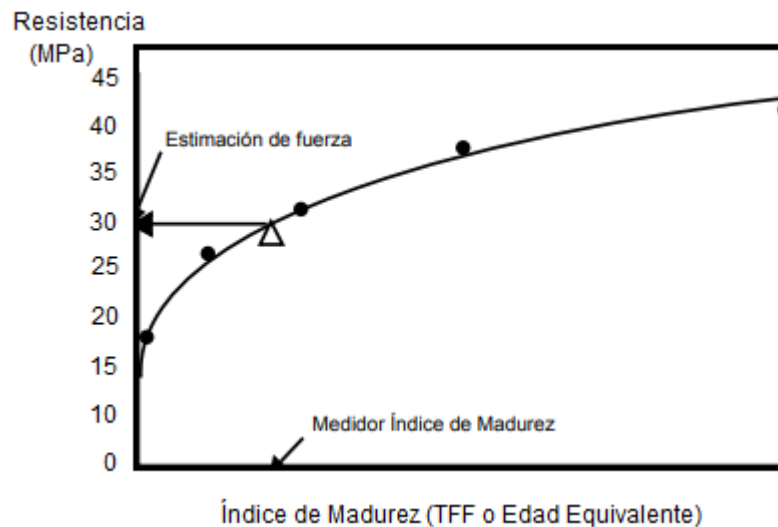
Paso 3. Graficar la función de madurez (Nurse-Saul o Arrhenius), calculando el factor temperatura-tiempo empleando la siguiente ecuación:

$$M(t) = \sum (t_a - t_0) \Delta t$$

Donde, 'M(t)' es el factor temperatura-tiempo a una edad t, en grados-días o en grados-horas. 't' es el intervalo de tiempo, en días u horas. 'Ta' es la temperatura promedio del concreto durante el intervalo de tiempo, Δt, en grados centígrados y 'To' es la temperatura de referencia en grados centígrados (ICONTEC, 2002).

La temperatura de referencia se determina experimentalmente a través de cubos de mortero curados en tres temperaturas diferentes. Dos baños de agua deben estar a la máxima y mínima temperatura que se espera tendrá el concreto en el sitio durante el período en el cual se va a estimar la resistencia, la temperatura del tercer baño debe estar el medio de las dos temperaturas extremas. Después de medir la resistencia de los cubos a 12 horas, 2, 4, 8, 16 y 32 días, se gráfica y se calcula la resistencia promedio.

Figura 13 Relación madurez-resistencia con ensayos a compresión



Fuente: NRMCA (2017) National Ready Mixed Concrete Association, pág. 1.

De esta manera, se puede predecir en obra la resistencia del concreto con la temperatura tomada en obra en un tiempo establecido, para la edad equivalente, tal como se muestra en la Figura 13.

3.4.3 ¿Qué es un suelo cemento y cuáles son sus características?

El Instituto Nacional de Vías define el suelo cemento como:

Capa estructural de pavimento, constituida por una mezcla uniforme de suelos o agregados (material adicionado totalmente o resultante de la escarificación de la capa superficial existente, o una mezcla de ambos, cemento hidráulico, agua y eventualmente aditivos de acuerdo con las dimensiones, alineamientos y secciones de diseño (Instituto Nacional de Vías, INVIAS, 2013).

De la misma manera, la Asociación de Cemento Portland –PCA- define el suelo cemento como una mezcla altamente compacta de suelo/agregado, cemento y agua. Se caracteriza por usarse ampliamente debido a su bajo costo para carreteras, calles residenciales, estacionamientos, aeropuertos y áreas de almacenamiento y manejo de materiales. Este material lo clasifica en tres componentes principales, de acuerdo a su función en la estructura del pavimento: Suelos modificados con cemento (CMS), base tratada con cemento (CTB) y

Recuperación total de pavimento asfáltico con cemento (FDR).

Un suelo modificado con cemento (CMS) es un material del suelo que se ha tratado con una proporción relativamente pequeña de cemento portland, menos cemento del que se requiere para producir un cemento de suelo endurecido. El objetivo del tratamiento es corregir las propiedades no deseadas de los suelos problemáticos o materiales de calidad inferior para que sean adecuados para su uso en la construcción (ver Figura 14). Una buena base es importante para cualquier estructura, especialmente los pavimentos. La base del pavimento proporciona el grosor y la rigidez necesarios para transportar cargas pesadas de tráfico (PCA. Portland Cement Association, 2017).

La estabilización de suelos con cementos aumenta la rigidez y la resistencia, reduce las deflexiones debidas a las cargas de tráfico, retrasando la aparición de daños en la superficie y prolongando la vida útil del pavimento. De la misma manera, reduce el potencial de bombeo de finos de la subrasante, los pavimentos estabilizados forman una base resistente a la humedad que mantiene el agua fuera.

Mejora las propiedades del suelo, reduce las características de plasticidad (IP), aumenta el CBR, aumenta la resistencia a cortante o cizallamiento, disminuye el cambio volumétrico.

De acuerdo al tamaño y gradación de los suelos estabilizados, los suelos modificados con cemento se clasifican en dos: Suelos cohesivos estabilizados con cemento y los Suelos granulares modificados con cemento (PCA. Portland Cement Association, 2017).

Figura 14. Suelo modificado con cemento, proceso constructivo.



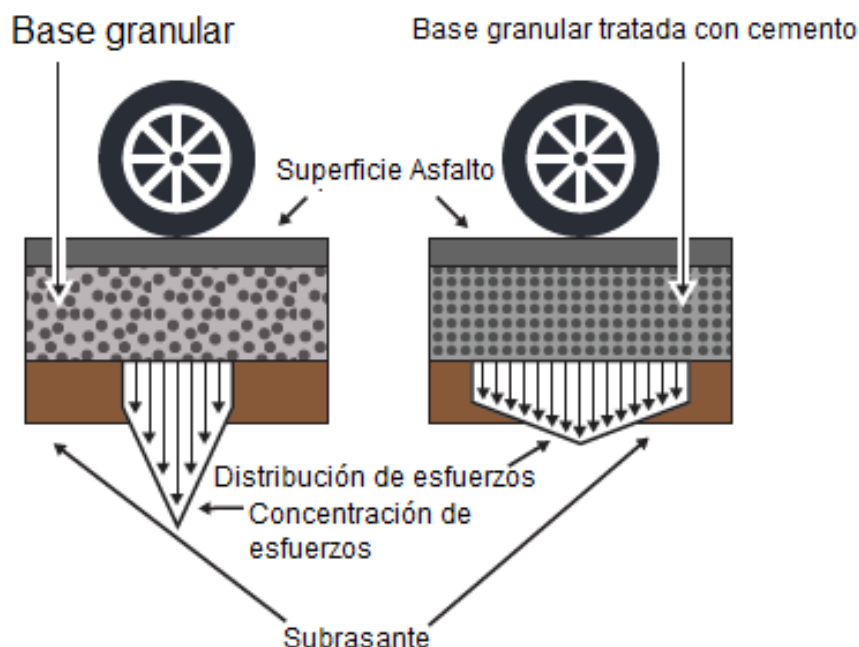
Fuente: PCA (2017), Cement-modified soil.

Base tratada con cemento (CTB) es una mezcla completa de material granular con la cantidad correcta de cemento Portland y suficiente agua para permitir la máxima compactación, éste debe curarse adecuadamente para permitir que el cemento se hidrate y para endurecer la mezcla de cemento y agregado. Se caracteriza por su capacidad de resistir a las heladas. El CTB consiste en suelos nativos, gravas, o agregados manufacturados mezclados con pequeñas cantidades de cemento y agua. CTB se puede mezclar in situ, o en planta pre mezcladora, dependiendo de los requerimientos del proyecto. El rango de contenido de cemento típico de 3 a 10 por ciento, para una resistencia a la compresión inconfiada a 7 días de edad de 300 hasta 800 psi (PCA. Portland Cement Association, 2017).

El espesor de las Bases tratadas con cemento es menor que el requerido para las bases granulares que transportan el mismo tráfico, por ser un material rígido y cementado que distribuye la carga en una mayor superficie tal como se muestra en la Figura 15.

Sus características son muy similares a losas, es fuerte y rígida, además de ser prácticamente impermeable. Resiste la congelación cíclica, la lluvia y los daños causados por la primavera. La base tratada con cemento continúa ganando fuerza con la edad incluso bajo el tráfico.

Figura 15. Distribución de esfuerzos de bases granulares



Fuente: PCA (2017), Integrated Paving Solutions. Hoja Informativa.

La *Recuperación Total de Pavimento Asfáltico*, definido por la PCA como FDR, y en América Latina es conocido como RAP pavimento asfáltico reciclado. Es un método de rehabilitación que implica el reciclaje de un pavimento de asfalto existente y su subyacente capa (s) en una nueva capa base mejorada con cemento hidráulico. El proceso de FDR comienza con el uso de un recuperador de carreteras para pulverizar un pavimento de asfalto existente y una porción de la base, subbase y / o subrasante (ver Figura 16). Generalmente el material pulverizado se mezcla uniformemente con un material estabilizante adicional, como el cemento para proporcionar un material homogéneo. Finalmente, el material estabilizado se compacta en su lugar con rodillos y el resultado es una base rígida y estabilizada que está lista para un nuevo pavimento de superficie rígida o flexible (Reeder, Harrington, Michael, & Adaska, 2017).

Figura 16. Esquema de recuperador de carreteras durante el proceso FDR



Fuente: Reeder, Harrington, Michael, & Adaska, 2017, pág. 63.

En términos generales, el suelo cemento es una técnica que garantiza la reducción de espesores de la estructura de un pavimento. No obstante, a veces se evita su uso por especificadores debido al agrietamiento reflectivo. El agrietamiento por contracción del cemento del suelo es una propiedad natural relacionada con el secado y la hidratación del cemento que lo convierte en un material estructural fuerte. Algunas de las grietas por contracción en el cemento del suelo pueden afectar significativamente el rendimiento del pavimento. La atención adecuada al control de la humedad, la densidad, el curado y la secuencia y el tiempo de las operaciones de construcción minimizarán el agrietamiento por reflexión y proporcionarán un excelente rendimiento del pavimento (Juhlman, 1994).

3.4.4 El módulo de resiliencia como una resistencia mecánica de los pavimentos

Cuando un vehículo circula sobre el pavimento, los neumáticos transmiten cargas que son absorbidas por la estructura, entonces un elemento diferencial de suelo ubicado en la subrasante, estará sometido a esfuerzos que a su vez inducen un estado de deformaciones. Si se considera al material, con un comportamiento elástico, isótropo y homogéneo, los esfuerzos y las deformaciones se relacionarán con el módulo de elasticidad y la relación Poisson, propios del material (Limaymanta Mendoza & Gutiérrez Lázares, 2003).

Sin embargo, la respuesta del suelo está en función de las propiedades que lo

conforman y las cargas impuestas por el tránsito tienen un carácter dinámico con tiempos de aplicación muy cortos, por lo que la deformación se recupera al cesar la carga. Por esta razón, los materiales no presentan un comportamiento elástico y se introduce el término de módulo resiliente, equivalente a un “módulo elástico supuesto” que relaciona las cargas aplicadas con las deformaciones recuperables.

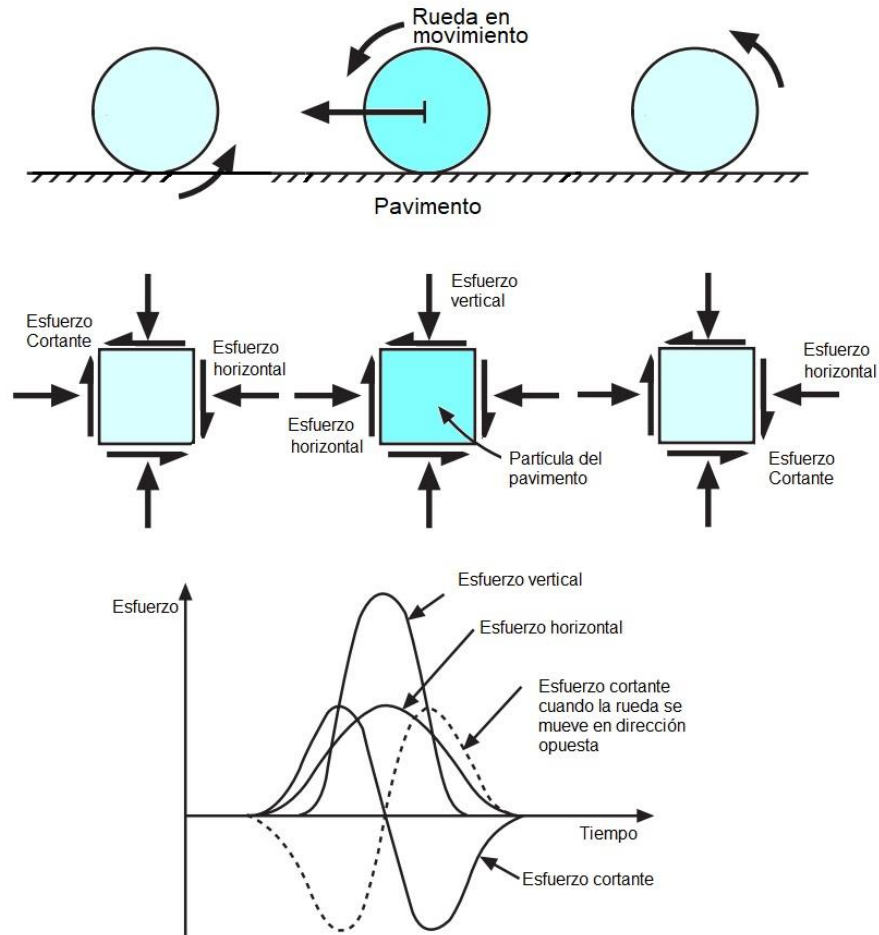
Para determinar este módulo, el Instituto Nacional de Vías establece en la norma INV E-156 el procedimiento que consta de aplicar un esfuerzo axial cíclico repetido, duración (0.1 s) y frecuencias fijas, a un espécimen cilíndrico de ensayo, debidamente preparado y acondicionado. Durante y entre las aplicaciones del esfuerzo dinámico desviador, la muestra está sometida a un esfuerzo estático en su contorno, proporcionado por medio de una cámara Triaxial. Se mide la deformación axial total resiliente (recuperable) de respuesta del espécimen y se calcula el módulo resiliente relacionando el esfuerzo axial desviador con la deformación unitaria resultante (INVIAS, 2013).

El actual método de diseño de pavimentos AASHTO, versión 1993, describe los procedimientos para el diseño de espesores basado en encontrar un número estructural SN suficiente para que pueda soportar una carga específica, y la propiedad fundamental para caracterizar los suelos de la subrasante es el módulo resiliente.

Históricamente, el módulo resiliente se ha estudiado para comprender el agrietamiento por fatiga de las superficies de asfalto y que la carga monotónica lo logra determinar con precisión. En 1955, Hveem desarrolló el tema ‘Comportamiento resiliente de los pavimentos’ a través de la prueba de estabilómetro para caracterizar subrasantes. Seed y otros en 1955 de la Universidad de California siguieron lo establecido por Hveem desarrollaron pruebas de carga repetida e introdujeron el término de módulo resiliente (Moreno Rubio, 2005).

El sistema de esfuerzos soliviantados a una estructura de pavimento como efecto del tránsito vehicular está sujeto a pulsos de carga de esfuerzos normales y cortantes (ver Figura 17). Solo cuando la carga está sobre el punto de estudio los esfuerzos cortantes son nulos y únicamente actúan los esfuerzos normales, es ese momento tiene un estado Triaxial de esfuerzos, debido a que solo presenta esfuerzos normales.

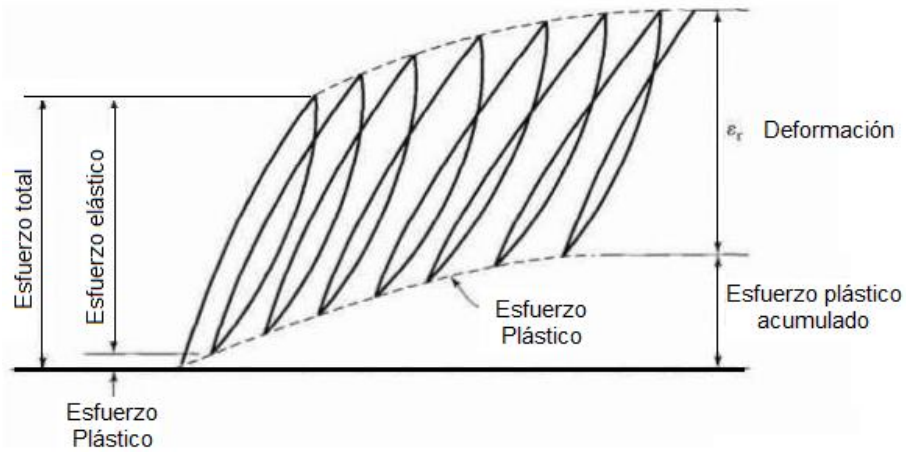
Figura 17. Estados de esfuerzos en pavimentos



Fuente: Propia con información tomada de (Brown, 1996, pág. 393).

En ese orden, con el propósito de contemplar las cargas de naturaleza cíclica que actúan en los materiales que conforman el pavimento, se han caracterizado dos comportamientos de esfuerzo-deformación de un suelo: resiliente y plástico. Las primeras son de recuperación instantánea y suelen deformarse plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento una vez sea suspendida la carga.

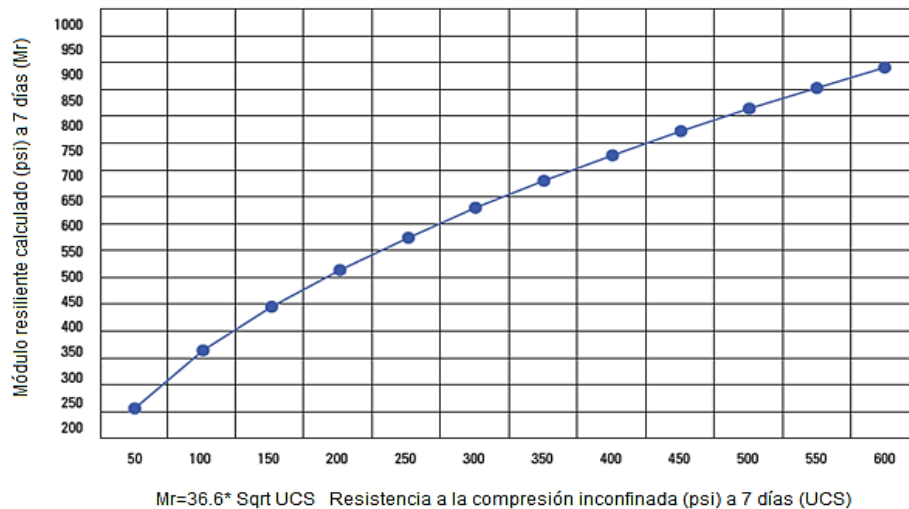
Figura 18. Deformaciones bajo cargas repetitivas



Fuente: (Yang H., 2004, pág. 280)

Tal como muestra la Figura 18, un material bajo carga móvil y repetida, la deformación plástica tiende a hacerse acumulativa y puede llegar a alcanzar valores inadmisibles. Paradójicamente, este proceso suele ir acompañado de una densificación de los materiales, de manera que el pavimento fallado puede ser más resistente que el original. La PCA, en el diseño de espesores de suelos mejorados con cemento, establece un diagrama que correlaciona el módulo resiliente a 7 días de curado con la prueba de compresión inconfiada con la Figura 19:

Figura 19. Relación entre la fuerza de compresión no confinada y el módulo resiliente



Fuente: (Reeder, Harrington, Michael, & Adaska, 2017, pág. 41)

4. MARCO CONTEXTUAL

La temperatura de curado en la madurez del suelo cemento, es un tema relacionado a las condiciones atmosféricas del lugar de instalación. Si bien la normatividad para el diseño de mezclas de suelo cemento es claro, en la asignación de un cuarto húmedo o una cabina especial para el curado húmedo de las muestras, “capaz de mantener la temperatura de $23.0 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ ($73.4 \pm 3^{\circ}\text{F}$) y una humedad relativa no menor a 96%” (INVIAS, 2013, págs. E 613-6).

No obstante, durante el proceso constructivo el curado húmedo se sale del intervalo de temperatura propuesto por la INV E 613-13, y está sujeto al clima local y a la altitud donde se lleva a cabo la instalación. Según el Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales –IDEAM- en Colombia, el clima se define como:

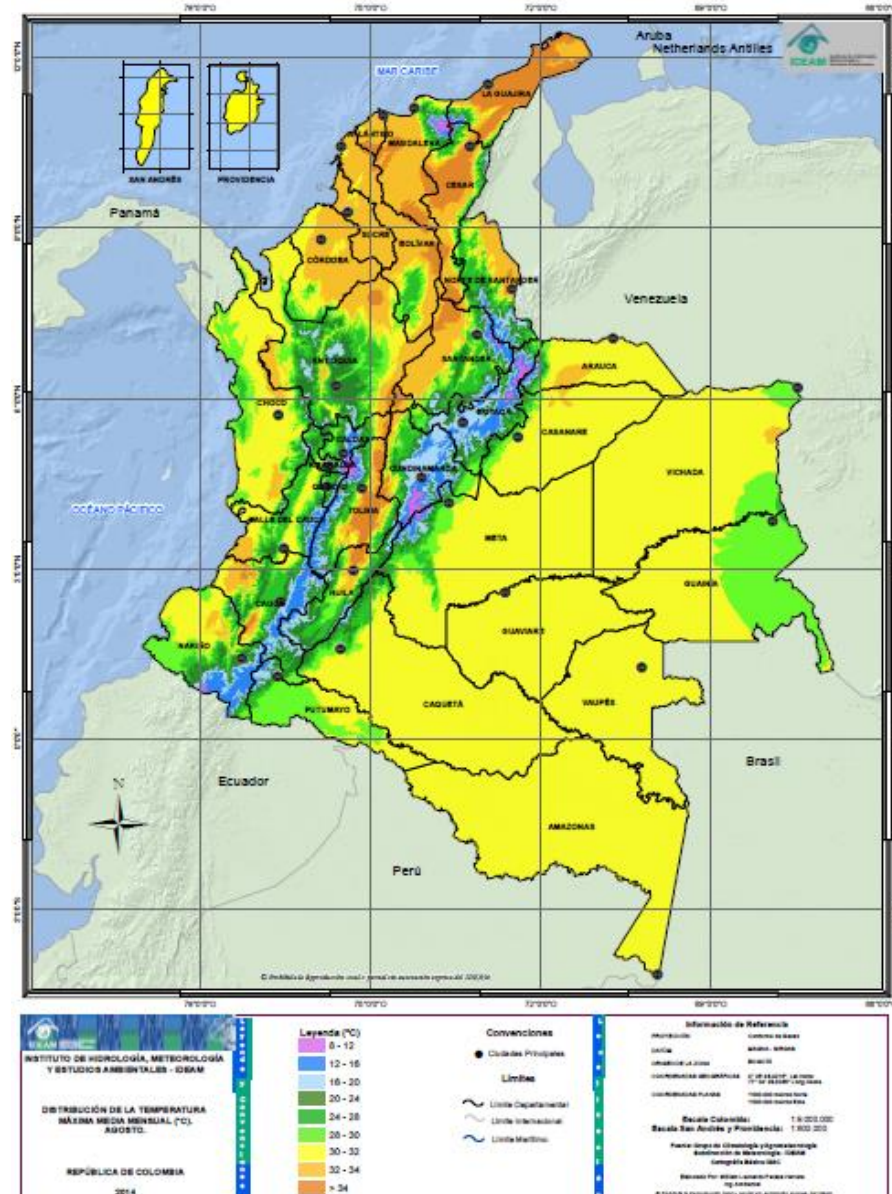
El conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evoluciones del estado del tiempo, durante un periodo de tiempo y un lugar o región dados, y controlado por los denominados factores forzantes, factores determinantes y por la interacción entre los diferentes componentes del denominado sistema climático (atmósfera, hidrosfera, litosfera, criósfera, biosfera y antropósfera). Debido a que el clima se relaciona generalmente con las condiciones predominantes en la atmósfera, este se describe a partir de variables atmosféricas como la temperatura y la precipitación, denominados elementos climáticos; sin embargo, se podría identificar también con las variables de otros de los componentes del sistema climático (IDEAM, 2014).

De acuerdo con la base de datos publicados en el Atlas del Ideam, la compleja fisiografía y la presencia de dos Océanos, en Colombia existen regiones con temperaturas que pueden ser inferiores a 0°C como las zonas de páramo y nieves perpetuas y regiones como la alta y media Guajira, el valle del Cesar, además de los sectores del centro de los departamentos del Atlántico y Magdalena con temperaturas que pueden superar los 34°C .

Además de esto, el comportamiento de las temperaturas tiene una relación con los períodos de sequía y las épocas de lluvia, de manera que, las temperaturas tienen

a disminuir en época de lluvias y aumentar en la temporada de sequía por efecto de la reducción de la nubosidad. Según los registros de las 296 estaciones meteorológicas ubicadas en todo el Estado Colombiano, las menores temperaturas se registran en los meses lluviosos de abril y mayo, y las mayores durante los meses secos de principios de año.

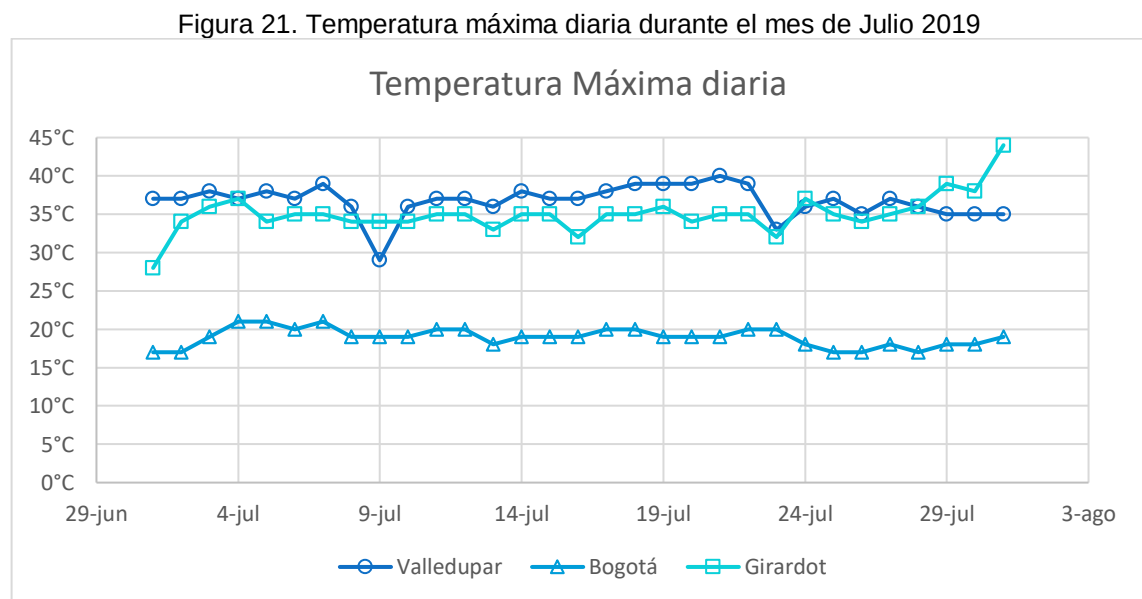
Figura 20. Distribución de la temperatura máxima media mensual (°C) Agosto, Colombia



Fuente: Grupo de Climatología y Agro meteorología Subdirección de Meteorología IDEAM, Cartografía Básica IGAC

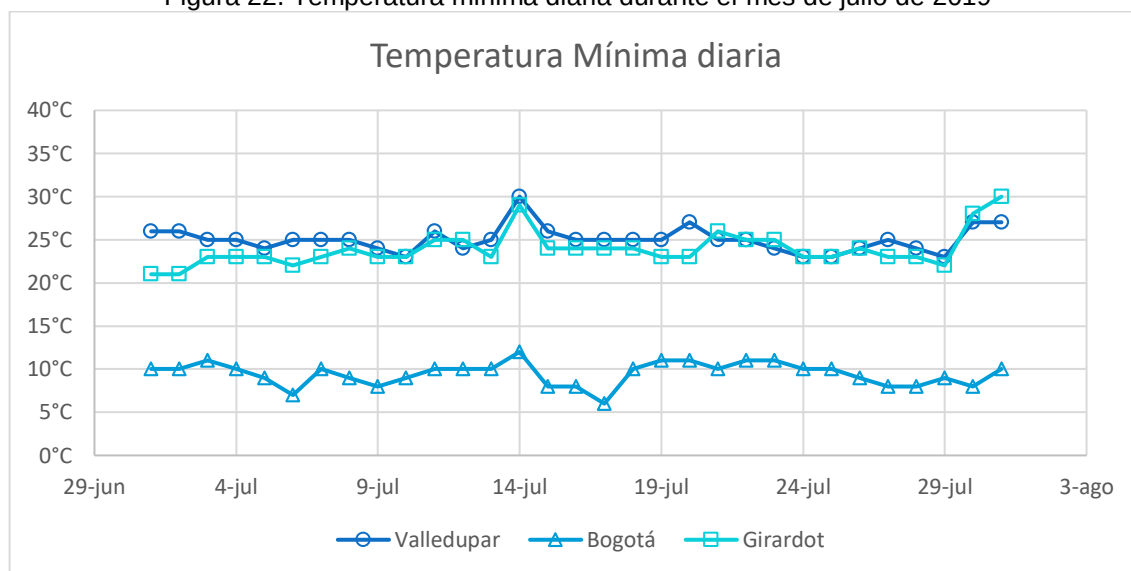
Sin embargo, pese a los registros publicados por el IDEAM la percepción de la población colombiana es otra frente al tema de temperaturas máximas. Para hacer un análisis del intervalo de temperaturas más ajustado a la realidad del contexto, se revisó la base de datos de AccuWeather definida como una fuente de pronósticos y advertencias meteorológicas con sede central en State College, ubicado en el estado de Pensilvania, Estados Unidos; con presencia global, tiene la capacidad de registrar y pronosticar con precisión para cada punto de altitud y longitud en la Tierra (AccuWeather, 2019).

Con los datos meteorológicos históricos, se seleccionó tres puntos de observación: Bogotá D.C., Valledupar y Girardot, durante dos meses: enero y julio de 2019, de los cuales la plataforma registra una temperatura máxima durante el mes de julio de 21°C en Bogotá, 40°C en Valledupar y 44°C en Girardot, mientras que registra una temperatura mínima de 6°C en Bogotá 23°C en Valledupar y 21°C en Girardot, tal como se muestra en la Figura 21.



Fuente: propia con información tomada de (AccuWeather, 2019)

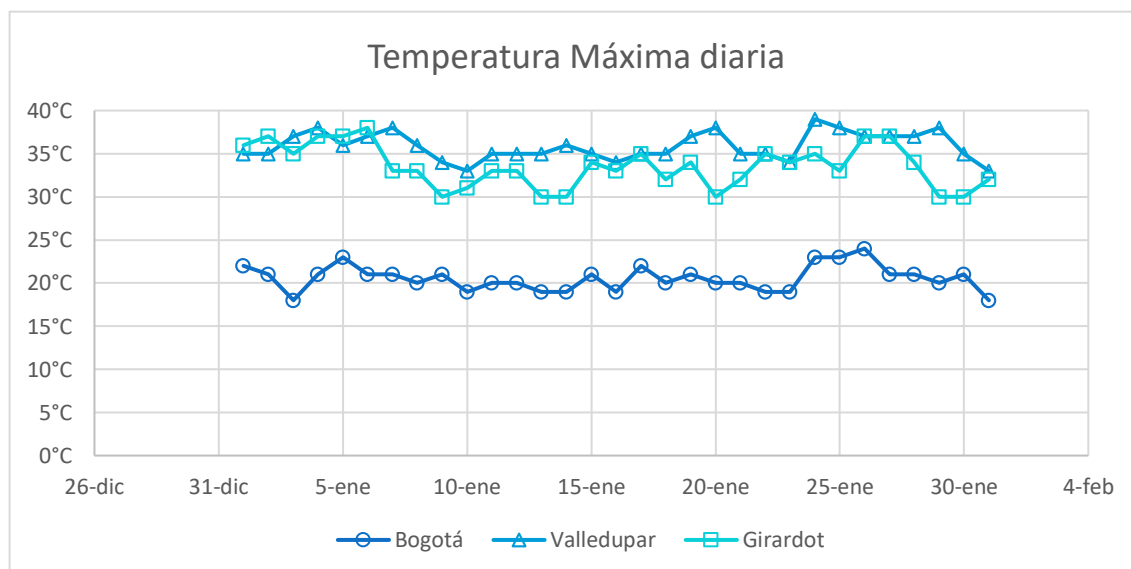
Figura 22. Temperatura mínima diaria durante el mes de julio de 2019



Fuente: propia con información tomada de (AccuWeather, 2019)

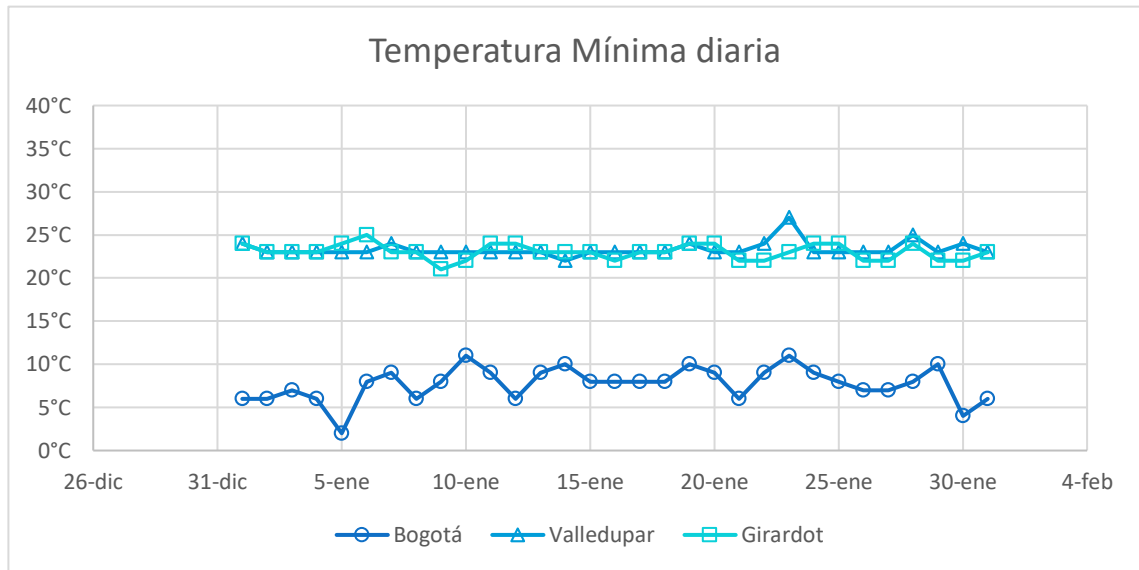
Del mismo modo, durante el mes de enero uno de los períodos más secos del año, la plataforma AccuWeather registra datos históricos de las tres ciudades de la siguiente manera: temperatura máxima de Bogotá 24°C, Valledupar 39°C y Girardot 38°C, mientras que la temperatura mínima de Bogotá fue de 2°C, Valledupar de 22°C y de Girardot 21°C.

Figura 23. Temperatura máxima diaria durante el mes de enero 2019



Fuente: propia con información tomada de (AccuWeather, 2019)

Figura 24. Temperatura máxima diaria durante el mes de enero 2019



Fuente: Información tomada de (AccuWeather, 2019)

En ese orden, la temperatura del lugar donde se prepara, instala y cura el suelo cemento es completamente contraria a la normatividad que rige el diseño de la mezcla, en Colombia, no obstante, es una variable que no se contempla durante el proceso.

Con base a estos intervalos de temperatura se seleccionó para esta investigación tres puntos de temperatura: 11, 30 y 40°C, en los cuales se mide la madurez del suelo cemento.

5. MARCO LEGAL

El método empleado para el desarrollo de este trabajo de investigación, se soportó de las siguientes especificaciones y normas técnicas.

5.1 NTC 121

Especificación de desempeño para cemento hidráulico.

El capítulo de este reglamento hace referencia a la adopción modificada del documento ASTM C1157/ C1157M de 2011, tomado como referencia para especificar los requisitos físicos de los cementos hidráulicos adicionados según su desempeño mecánico. Esta norma estandariza los cementos con base en los requisitos específicos para uso general, alta resistencia temprana, resistencia al ataque por sulfatos y calor de hidratación (ICONTEC, 2002).

Dentro de la clasificación se incluye los cementos -UG- *Uso General* es denominado como un cemento hidráulico para construcción en general, donde no se requiere alguna propiedad específica de desempeño. El tipo ART son de Altas Resistencias tempranas, es decir que, por sus contenidos mineralógicos de preparación, presenta mayores resistencias que los de UG a los 7 días de edad.

El tipo -MCH- Moderado calor de hidratación, es un tipo de cemento con características especiales que reducen su calor de hidratación y por consiguiente la resistencia a la compresión.

A continuación, se presenta la Tabla 1 con los requisitos físicos normalizados para cada uno de los tres tipos de cementos nombrados anteriormente.

Tabla 1. Requisitos físicos normalizados				
Tipo de Cemento	Método de ensayo aplicable	UG	ART	MCH
Tiempo de fraguado inicial	NTC 118	45 min	45 min	45 min
Tiempo de fraguado final		420 min	420 min	420 min
Resistencia mínima a compresión, MPa	NTC 220			
1 día		-	11.0	-
3 días		8.0	22.0	5.0
7 días		15.0	-	11.0

Tipo de Cemento	Método de ensayo aplicable	UG	ART	MCH
28 días		24.0	-	-

Fuente: propia con información tomada de (ICONTEC, Interancional, 2014, pág. 10)

No obstante, para esta investigación se empleó cemento Uso general, Uso Estructural y Uso Estabilización de Suelos de la misma marca que, aunque las tres dan cumplimiento con la NTC 121 de 2014, el productor tiene su propia especificación técnica publicada en su portal Web. A continuación, en la Tabla 2 se relacionan dichas especificaciones:

Tabla 2. Especificaciones técnicas

Tipo de Cemento	Método de ensayo aplicable	Uso General	Uso Estructural	Uso Estabilización de Suelos
Tiempo de fraguado inicial	NTC 118	45 min	70 min	45 min
Tiempo de fraguado final		420 min	330 min	420 min
Resistencia mínima a compresión, MPa	NTC 220			
1 día		-	-	-
3 días		8.0	21.0	5.0
7 días		15.0	28.0	11.0
28 días		24.0	36.6	-

Fuente: propia con información tomada de ARGOS, 2018.

5.2 NTC 3756

Procedimiento para estimar la resistencia del concreto por el método de la madurez.

Esta norma es equivalente a la internacional ASTM C1074-19, usada para proyectar y estimar resistencias del concreto hidráulico a través del registro de la historia de temperaturas tomadas de unas muestras de concreto hidráulico desde el momento en que se prepara hasta lograr su fraguado final. Con este registro, es posible calcular un indicador de la madurez, que se correlaciona con la resistencia a la compresión de cilindros normales fallados a diferentes edades de curado. Estos resultados facilitan la elaboración de una relación empírica entre la resistencia a la compresión y el índice de madurez, que permite predecir la resistencia de un concreto en el sitio de construcción.

La norma describe dos tipos de funciones alternativas para el cálculo de la madurez,

la primera permite el cálculo del factor temperatura-tiempo, expresado de la siguiente manera:

$$M_{(t)} = \sum (T_a - T_0) \Delta t$$

Ecuación 1. Factor temperatura-tiempo para el índice de Madurez

Y la segunda, se emplea para el cálculo de la edad equivalente a una temperatura específica:

$$t_e = \sum e^{-Q\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s}\right)} \Delta t$$

Ecuación 2. Edad equivalente para el índice de Madurez

Donde:

$M(t)$ = es el factor temperatura-tiempo a una edad t , en grados-días o en grados-horas,

t = intervalo de tiempo, en días u horas.

T_a = temperatura promedio del concreto durante el intervalo de tiempo Δt .

T_0 = temperatura de referencia, en grados centígrados.

t_e = edad equivalente a la temperatura especificada T_s , en días u horas.

Q = energía de activación dividida por la constante de gas, en K,

T_s = Temperatura especificada en K

Δt = intervalo de tiempo, en días u horas.

Para calibrar la curva, es necesario elaborar 54 cubos de concreto con la misma relación agua cemento y dosificación de aditivos del diseño de mezcla. Para estas muestras no es necesario incluir los áridos gruesos, por lo que se puede realizar únicamente con arena.

De los 54 cubos, 18 son curados a la mínima temperatura de la investigación, 18 a la máxima temperatura y los 18 restantes a una temperatura intermedia. Al cabo de su fraguado final se curan las muestras y luego se fallan en grupos de tres, a compresión normal a seis edades diferentes: 1, 2, 4, 8, 16 y 32 días. Con estos

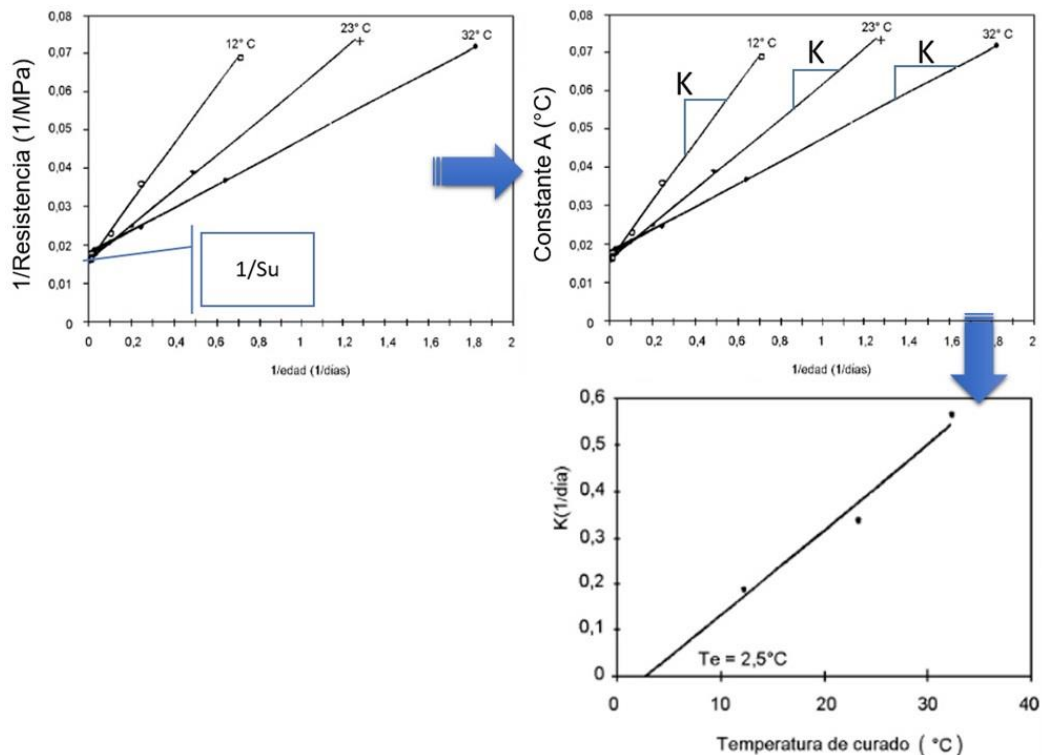
resultados se realiza un diagrama donde en las ordenadas se registrarán los valores de $1/\sigma_{\text{máx}}$ (MPa), y en la abscisas el valor de $1/\text{Edad}_{(\text{días})}$, con cada una de las temperaturas de curado. El punto donde cada curva corta el eje Y corresponde al valor de $1/S_u$, este será utilizado para calcular una constante A empleando la siguiente ecuación:

$$A = \frac{S}{S_u - S}$$

Ecuación 3. Constante A para la estimación de la temperatura de referencia

Donde S es el promedio de la resistencia a la compresión de los cubos a una edad t (1,2,4,8,16 y 32 días). Con estos resultados, de nuevo se realiza un diagrama de tres curvas (una por cada temperatura de curado), donde las ordenadas registrarán los valores de las constantes 'A' y en las abscisas su edad correspondiente en días. La pendiente de una, de las curvas trazadas se registrarán como los valores de la constante -K-. Y con estos datos de nuevo se realiza un último diagrama donde se graficarán estas constantes K en las ordenadas y la temperatura de curado en las abscisas. El punto de corte en las X, será el valor T_0 , conocido como la temperatura de referencia (ver Figura 25).

Figura 25. Diagrama para determinar la Temperatura de Referencia



Fuente: Propia con imágenes tomadas de ICONTEC, 2002, págs. 10-11.

Luego de esto, la misma norma establece que para determinar la energía de activación de la mezcla se debe calcular el logaritmo natural de las constantes K , y el inverso de las temperaturas de curado en Kelvin ($1/^\circ K$), con esto se dibuja la recta del logaritmo natural de K en función de $1/^\circ K$, y la pendiente de esta es igual a ' Q ' (energía de activación dividida entre la constante del gas) empleado en la ecuación 2, para el cálculo de la edad equivalente.

Para desarrollar la relación Resistencia Madurez, se preparan muestras cilíndricas para luego fallarlas a compresión simple a 1, 3, 7, 14 y 28 días de edad para calcular su resistencia a la compresión. Paralelo a esto, se introducen sensores de temperatura en el centro de las muestras, que registran datos continuos de temperatura, teniendo en cuenta que durante las primeras 30 horas se registrarán a intervalos de 30 minutos.

Con los resultados obtenidos en el registro, se realiza un diagrama de resistencia a la compresión en función con el factor temperatura tiempo (ecuación 1) y otro diagrama que relacione la resistencia en MPa con la edad equivalente a $20^\circ C$ (ecuación 2). La curva resultante es la relación resistencia-madurez, que determina el índice de madurez de la mezcla en laboratorio.

Para estimar la resistencia del concreto en la obra, se colocan sensores de temperatura dentro de la sección que va a ser construida antes de vaciar el concreto. Los sensores se conectan a los instrumentos de medición y registro, y cuando se desee estimar la resistencia se lee el índice de madurez del instrumento de medición y con la gráfica se correlaciona el valor de la resistencia a la compresión correspondiente.

5.3 ARTÍCULO 350 DE 2013, INVIAS.

Suelo Cemento

Este artículo establece los criterios técnicos para el diseño y la construcción de Suelo Cemento para carreteras. En él, se definen dos criterios de diseño de mezcla: SC-D por durabilidad y SC-R, por durabilidad y Resistencia. Donde el contenido de cemento mínimo será aquel que permita cumplir los criterios de la siguiente tabla:

Tabla 3. Criterios de diseño para la mezcla de suelo-cemento

Ensayo	Norma de Ensayo INV	SC-D	SC-R
Durabilidad			
Máxima pérdida de masa de la mezcla compactada en prueba de humedecimiento y secado, %	E-612		
Suelos A-1; A-2-4; A-2-5; A-3			14
Suelos A-2-6; A-2-7; A-4; A-5			10
Suelos A-6; A-7			7
Resistencia			
Resistencia a la compresión a 7 días MPa.	E-614		
-Mínima		4.5	2.1
-Máxima			4.5

Fuente: Propia con información tomada de INVIAS, 2013, págs. 350-5

El diseño de mezcla estará gobernado por el criterio de durabilidad, este ensayo reglamentado por la Norma INV-E612, consiste en la elaboración de muestras cilíndricas de Suelo Cemento preparadas con diferentes cantidades de cemento que luego serán compactadas conforme a la Norma INV-E611. Seguidamente, se curan durante 7 días en una cámara húmeda y luego se sumergen los cilindros en agua potable por un período no superior a 5 horas, se retiran registrando su peso antes y luego de la inmersión. Luego se secan en un horno a 71°C durante 42 horas y se registra el peso y dimensiones, se le dan de 18 a 20 pasadas a la muestra con un cepillo metálico en dirección longitudinal, cubriendo toda la superficie expuesta del cilindro. Todo este procedimiento que inicia desde la inmersión y finaliza con el cepillado, corresponde a un ciclo de 48 horas de humedecimiento y secado, que debe repetirse hasta completar 12 ciclos.

El registro de pesos y dimensiones permitirán calcular los cambios de volumen y de humedad, así como las pérdidas de suelo cemento después de los doce ciclos del ensayo (INVIAS, 2013, págs. E612-6).

Al final del ensayo se calcula las pérdidas de suelo cemento empleando la siguiente ecuación:

$$Pérdidas, \% = \frac{Masa\ inicial\ seca\ al\ horno - Masa\ final\ seca\ al\ horno}{Masa\ inicial\ seca\ al\ horno}$$

Ecuación 4. Pérdidas de masa por prueba de durabilidad

Teniendo en cuenta que la masa final seca ha sido corregida mediante un testigo

de prueba que ha realizado los 12 ciclos, pero que al final se fragmenta para tomar la humedad real, es decir que no presenta contenidos de humedad por absorción de la muestra durante el proceso, que puede generar la reacción del cemento en la mezcla.

5.3.1 INV E-611

Relaciones de humedad-densidad de mezclas de suelo cemento

Esta norma describe el método de elaboración de muestras cilíndricas de suelo cemento, que consiste básicamente en establecer la relación entre la densidad de la muestra con un contenido de agua óptimo a partir de un diagrama que relaciona la humedad de compactación con el peso unitario seco de la muestra.

Para esto, es necesario emplear un molde cilíndrico de 4 pulgadas (101.6 mm) de diámetro y una altura de 4.5 pulgadas (116.43 mm) y un martillo de compactación de 3 kg de masa que debe caer en caída libre de 12 pulgadas, en una de sección transversal circular plana de 2 pulgadas de diámetro. El procedimiento consiste en elaborar un cilindro compactado en el molde estándar, de la mezcla preparada de suelo-cemento, en tres capas iguales, de manera que se pueda obtener un espesor total compactado de alrededor de 130 mm (5 pulgadas). Cada capa se compacta mediante 25 golpes del martillo, uniformemente distribuidos, los golpes se deberán distribuir uniformemente sobre la superficie de la capa que se está compactando, y después de la compactación, se enrasa y se determina la masa del molde con la muestra del suelo cemento compactada (INVIAS, 2013).

Seguidamente se extrae la probeta y luego se fracciona de manera longitudinal para tomar una muestra representativa (no menor a 100 gr) para medir su humedad. Este ejercicio se repite de 3 a 4 veces modificando la cantidad de agua de compactación. Con estos valores se realiza un diagrama que relaciona la densidad seca del cilindro con la humedad de compactación empleando las siguientes ecuaciones:

$$Humedad = \frac{Masa\ humeda - Masa\ Seca}{Masa\ seca}$$

Ecuación 5. Humedad de compactación

$$\rho_m = \frac{Masa_{molde+muestra} - Masa_{molde}}{Volumen\ del\ molde}$$

Ecuación 6. Densidad húmeda del cilindro de suelo cemento

$$\rho_{seca} = \frac{\rho_m}{\left[1 + \frac{Humedad}{100}\right]}$$

Ecuación 7. Densidad seca del cilindro de suelo cemento

5.3.2 INV E-613

Preparación y curado de probetas de suelo cemento para pruebas de compresión y flexión en el laboratorio.

Esta norma establece el procedimiento para elaborar muestras de suelo cemento de 2.8 pulgadas de diámetro (71 mm) en una relación de altura/diámetro de 2. Para lograrlo, es necesario emplear un molde cilíndrico con esas dimensiones internas y accesorios adicionales, como dos pistones en acero maquinado ligeramente más pequeños, que entren en el molde sin atascarse, un anillo espaciador y dos discos separadores de aluminio, tal como se muestra en la figura:

Technical drawings of mold components with dimensions in inches and millimeters:

- Pistón superior:**
 - Top diameter: 4.0" (102 mm)
 - Height: 1.775" (45 mm)
 - Inner diameter: 2.795" (70.99 mm)
- Pistón inferior:**
 - Top diameter: 2.795" (70.99 mm)
 - Height: 1.5" (38 mm)
 - Bottom diameter: 4.0" (102 mm)
- Molde:**
 - Height: 9.0" (229 mm)
- Anillo espaciador:**
 - Diameter: 2.8" (71 mm)
- Extension del molde:**
 - Height: 6.0" (152 mm)
 - Note: Ajuste a presión (pressure fit)

Del mismo modo, incluye en el método la opción de compactar las muestras por dos métodos, el primero a través de un aparato para ensayo a compresión o marco de compresión con una capacidad de 270 kN, y el segundo, mediante un martillo de compactación por impacto de 6.8 kg que golpea el pistón superior del molde cilíndrico. El moldeo de las probetas se inicia aplicando una capa delgada de aceite o glicerina en las paredes interiores del molde, se sostiene el molde en posición vertical, con el anillo espaciador sobre el pistón inferior, se coloca en el molde una masa determinada de suelo cemento, y luego se compacta con la varilla apisonadora, introduciendo un extremo recto dentro de la mezcla de forma firme y con poco impacto hasta alcanzar el rechazo y distribuyendo los golpes de manera uniforme en la sección transversal del molde, para no dejar vacíos, hasta que la

mezcla se halle compactada a una altura de 150 mm (6"). Se introduce el pistón superior en el molde y se aplica una carga, bien sea estacionaria mediante una máquina de compresión o mediante una máquina de impacto hasta obtener una altura de 142 mm. Los especímenes se deben curar dentro de los moldes en la cámara húmeda por 12 horas, o más si es necesario, para permitir su remoción posterior con ayuda del extractor (INVIAS, 2013).

Seguido a esto, se procede a curar las muestras en cuarto húmedo hasta cumplir la edad de rotura, que para efectos del artículo INV-350, corresponde a los 7 días.

5.3.3 INV E-614

Resistencia a la Compresión de Cilindros Moldeados de Suelo Cemento

Este procedimiento consiste en la elaboración de cilindros de 4.0 pulgadas (101.6mm) de diámetro y de 4.5 pulgadas (116.4mm) de altura, compactados empleando el método de la norma INV E-611, que luego de días de curado en un cuarto húmedo se sumergen en agua durante 4 horas y se fallan en una máquina de ensayo a compresión simple, ya sea que opere por tornillo a una velocidad de 1mm por minuto o hidráulicamente a una velocidad de 140 kN/m² /seg.

Se calcula la resistencia unitaria a la compresión dividiendo la carga máxima entre el área de la sección transversal.

$$Resistencia, MPa = \frac{Carga\ máxima}{Área\ de\ la\ sección}$$

Ecuación 8. Resistencia a la compresión de muestras de suelo cemento

5.4 INV E-156

Módulo Resiliente de Suelos y agregados

Este método consiste en medir la relación entre las amplitudes del esfuerzo axial repetido y de la deformación unitaria axial resultante, mediante el siguiente proceso:

Se aplica un esfuerzo axial cíclico repetido, de magnitud, duración (0.1s) y frecuencia fija, a un espécimen cilíndrico de ensayo, debidamente preparado y acondicionado. Durante y entre las aplicaciones del esfuerzo dinámico

desviador, el espécimen está sometido a un esfuerzo estático en su contorno, proporcionado por medio de una cámara de presión Triaxial. Se mide la deformación axial total resiliente (recuperable) de respuesta del espécimen y se calcula el módulo resiliente relacionando el esfuerzo axial desviador con la deformación unitaria axial resultante (INVIAS, 2013).

A diferencia de las normas relacionadas anteriormente, este método indica una forma de elaboración de muestras distinta, la primera por vibración que consiste en que:

Los especímenes se deben compactar en seis capas en un molde partido... Las fuerzas de compactación serán producidas por un martillo de impacto vibratorio con acción amasante, alimentado por aire o por electricidad, y de tamaño suficiente para proporcionar a la muestra la densidad requerida sin deteriorar la membrana que la protege. (INVIAS, 2013, págs. E 156-27)

El segundo método consiste en la compactación de muestras en cinco capas, en un molde cilindro cuyos extremos están provisionados de pistones metálicos. Después de introducir la quinta parte de la muestra en el molde se ubican los pistones en los extremos y luego se aplica una carga lentamente hasta que los pistones descansen firmemente contra los extremos del molde y se mantiene la carga durante un minuto. Luego se remueve el pistón y se escarifica la superficie de la capa compactada, se le da la vuelta al molde, se introduce la siguiente quinta parte y se procede a compactar de nuevo. A continuación en la Figura 27, se presenta el orden de compactación, en donde el número representa el orden de las capas compactadas en este método.

Figura 27. Diagrama de compactación de muestras para Módulo Resiliente

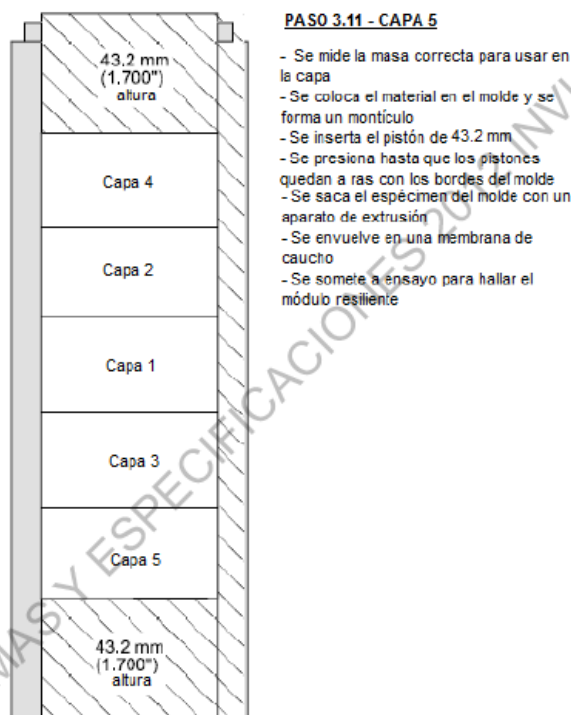


Figura 156C - 6. Compactación de la quinta capa de un suelo de Tipo 2

Fuente: Tomado de (INV E-156. Módulo resiliente de suelos y agregados, 2013, págs. E 156-39)

Las muestras se clasifican en dos tipos de suelos, los de tipo 1 corresponden a los suelos cohesivos y las subrasantes sin tratar cuya granulometría tenga menos del 70% pasa No. 10 (2 mm), menos del 20° pase el tamiz No. 200 (0.075 mm) y el índice de plasticidad sea menor o igual al 10%. Este tipo de suelo, se deben moldear en moldes de 150 mm de diámetro (INVIAS, 2013). Los materiales granulares que no cumplan los criterios del suelo Tipo 1, se clasificarán como suelos Tipo 2.

El tamaño del espécimen debe presentar las siguientes condiciones:

La longitud del espécimen no deberá ser menor de dos veces el diámetro. Se deben usar diámetros de 71 u 86 mm en especímenes inalterados de suelos cohesivos (Tipo 2). Parea materiales tipo 1 o especímenes compactados Tipo 2, el diámetro mínimo del molde debe ser igual a 5 veces el tamaño máximo de las partículas del suelo. Si la partícula mayor del suelo excede el 25% del

diámetro del molde disponible, estas partículas se deben separar (INVIAS, 2013).

Para la determinación del módulo resiliente de materiales Base y Subbase, suelos Tipo 2, se debe aplicar una carga de confinamiento de 103.4 kPa, y luego, justo después de sacar el vacío de la celda llena de agua destilada, se aplica un mínimo de 500 repeticiones de una carga equivalente al esfuerzo máximo de 103.4 kPa y el esfuerzo cíclico de 93.1 kPa usando un pulso de carga medio seno verso. El ejercicio se repite modificando la presión de cámara y la amplitud el esfuerzo cíclico, 15 secuencias, tal como lo indica la tabla 156-2, de la Norma INVIAS.

Figura 28. Secuencia de ensayo para materiales de base/subbase

Secuencia No.	Presión de cámara S_3		Esfuerzo axial máximo $S_{m\acute{a}x}$		Esfuerzo cíclico $S_{c\acute{i}clico}$		Esfuerzo constante $0.1 S_{m\acute{a}x}$		Número de aplicaciones de carga
	kPa	lb/fg ²	kPa	lb/fg ²	kPa	lb/fg ²	kPa	lb/fg ²	
0	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	500-1000
1	20.7	3	20.7	3	18.6	2.7	2.1	.3	100
2	20.7	3	41.4	6	37.3	5.4	4.1	.6	100
3	20.7	3	62.1	9	55.9	8.1	6.2	.9	100
4	34.5	5	34.5	5	31.0	4.5	3.5	.5	100
5	34.5	5	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	34.5	5	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
7	68.9	10	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
8	68.9	10	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
9	68.9	10	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
10	103.4	15	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
12	103.4	15	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
13	137.9	20	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
14	137.9	20	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
15	137.9	20	275.8	40	248.2	36.0	27.6	4.0	100

Fuente: Tomada de la Tabla 156-2 de las Norma INV E-156, página 18.

Al terminar los ciclos se debe verificar la deformación vertical permanente, si no excede el 5% y si se desea obtener la información sobre la resistencia, se continúa con el procedimiento de corte rápido con falla Triaxial.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

Las especificaciones técnicas del Instituto Nacional de vías de Colombia, en los artículos 350 y 351, establecen los criterios de diseño de mezclas la resistencia a la compresión, una edad de 7 días y aclara que sólo se podrá abrir al tránsito público y al de los equipos de construcción a los siete (7) días de su compactación. Donde es necesario que la apertura sea inicialmente durante un tiempo corto que permita verificar el comportamiento de la capa compactada y localizar las áreas que deban ser objeto de corrección. Como resultado de lo observado en esta apertura parcial, el interventor definirá el instante de apertura definitiva de la capa compactada, al tránsito público (Instituto Nacional de Vías, INVIAS, 2013, pág. 12).

No obstante, en el mercado se comercializan cementos hidráulicos, aditivos y adiciones con características especiales para este tipo de mezclas que garantizan altas resistencias a edades tempranas, curados a temperaturas promedio de 25°C.

Cuando la temperatura de curado es modificada, el calor de hidratación se altera cambiando la edad de resistencia final. Tal es el caso del proceso de aceleración de resistencia con vapor, para la elaboración de prefabricados en concreto hidráulico o, por el contrario, cuando se aplica hielo a la mezcla el proceso de curado retrasa la formación de enlaces, provocando una resistencia a edades tempranas menor. No obstante, al acelerar la madurez de la mezcla se aumenta la probabilidad de aparición de fisuras por retracción de fraguado.

De esta manera, se parte de la hipótesis que:

De acuerdo a la variabilidad en el calor de hidratación de cementos hidráulicos adicionados, la madurez de la mezcla se puede ver alterada por la temperatura de curado, haciendo que en vías terciarias ubicadas en climas muy fríos la edad de apertura del tráfico debería ser mayor, que en las vías terciarias ubicadas en climas muy cálidos y en consecuencia este proceso puede incidir en su módulo resiliente del material como parte de la estructura del pavimento.

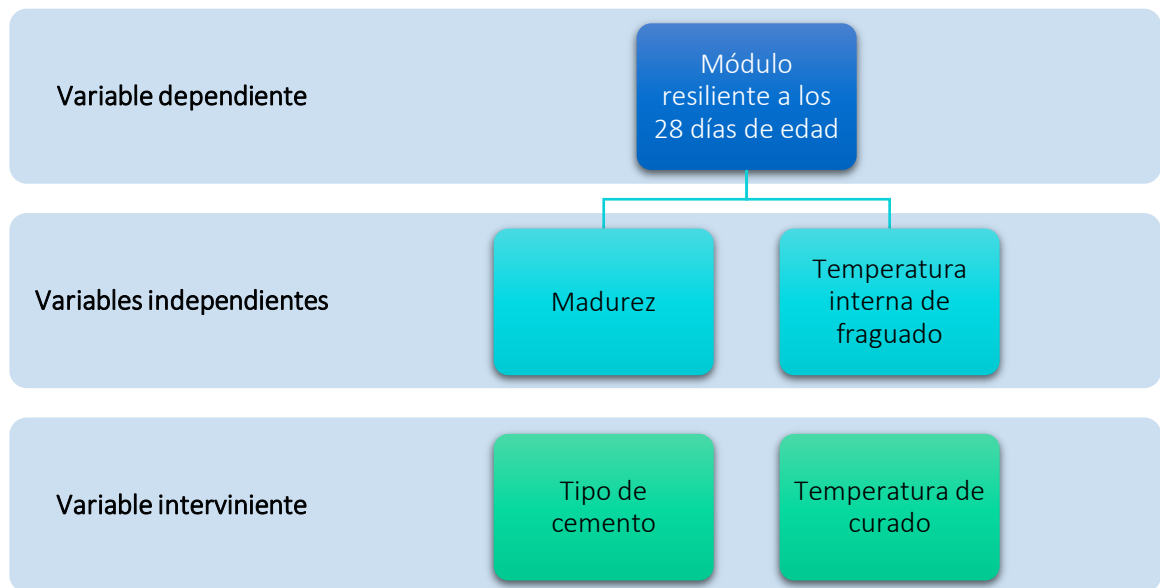
De esta investigación se espera obtener un factor que correlacione esa afectación de la temperatura con el monitoreo de las temperaturas del suelo cemento durante las primeras 30 horas, en función de su madurez con en el módulo de resiliencia del suelo cemento a los 28 días de edad.

Es así como, se daría un aporte importante para los diseñadores de mezclas y constructores que están estabilizando o mejorando suelos con cemento en diferentes sitios del país, que cuentan con condiciones ambientales adversas. Más aún, cuando en las especificaciones y las normas nacionales, definen que el agua de curado debe estar a una temperatura de 20°, condición medible solo en laboratorio, pero, en el momento de la construcción, el agua de curado, especificada a temperatura ambiente, se puede encontrar a 10°C en climas fríos y a 40°C en climas muy cálidos.

6.1 PROCEDIMIENTO

Este trabajo de grado se soporta sobre una metodología experimental, construida en un modelo que involucra dos variables, la variable dependiente y la independiente. La variable dependiente representa una cantidad cuyo valor depende de cómo se modifica la variable independiente. La temperatura de fraguado en función de la madurez del suelo cemento es para este caso la variable dependiente y el módulo resiliente medido a los 28 días de edad es la independiente.

Figura 29. Variables de la investigación



Fuente: propia.

La variable dependiente se medirá con ensayos de módulo resiliente con una

invariante de esfuerzo equivalente al esfuerzo de confinamiento de 4.5 MPa, equivalente a la resistencia a la compresión del diseño de mezclas.

Y las variables dependientes corresponden a la madurez y la temperatura de fraguado, son modificadas con tres tipos de cemento: Moderado Calor de Hidratación, Uso General y Altas Resistencias Tempranas, que presentan diferentes índices calorimétricos, de acuerdo a las fichas técnicas publicadas por sus fabricantes. Y esta a su vez, se afecta cambiando las condiciones de curado, con temperaturas de 11, 30 y 40°C.

El plan de trabajo se distribuirá en dos fases, la primera corresponde al diseño de mezclas ajustado conforme a la metodología definida por el Art. 350-13, para una resistencia por durabilidad del 10% de pérdidas máximas por desgaste, elaborados por el método de los ciclos de humedecimiento y secado y 4.5 MPa de resistencia a la compresión inconfiada. Cabe aclarar, que el diseño de mezclas se realizará a una humedad de curado de 23°C en cuarto húmedo conforme a la norma de ensayo E-612 y E-614.

Para la primera fase, el diseño de mezclas se realizará con un material, proveniente de la cantera T.S. Ingeniería cuya caracterización se ajusta a un material A-25. (tabla 350-3). Con esta metodología y con este material se procederá a realizar dos diseños de mezclas, el primero con cemento de uso estabilización de suelos, de bajo calor de hidratación y el segundo, con cemento de uso general de moderado calor de hidratación y el tercero con Cemento de Uso Estructural, que tiene características muy similares al ART Altas Resistencias Tempranas.

Una vez se encuentren definidas las dosificaciones de las tres mezclas, se procede a dar inicio a la segunda fase experimental, correspondiente a medir la madurez de las mezclas.

Durante esta fase se elaborarán dieciocho muestras de cada diseño de mezclas, curadas a 20°C en un cuarto húmedo con temperatura controlada, dieciocho a 40°C y dieciocho a 30°C, las cuales serán falladas en series de tres a 1, 2, 4, 8, 16 y 32 días de edad con el fin de calcular la constante de Arrhenius Q (Energía de Activación/constante universal del gas) y la Temperatura de Referencia T₀.

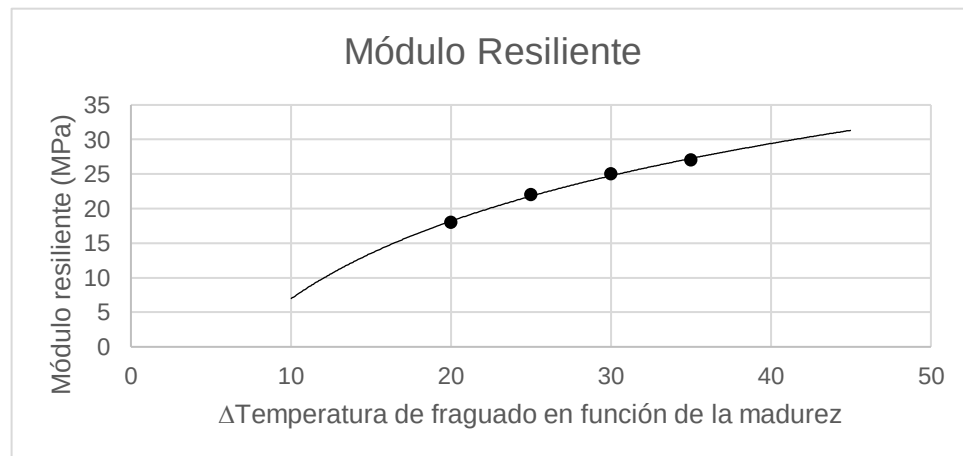
Seguido se registrarán monitoreos de los tres diseños de mezclas realizados durante la primera fase. De manera que se toman lecturas temperaturas durante la

etapa de fraguado inicial y fraguado final de la mezcla, estimado de 24 a 48 horas, a muestras curadas en tres temperaturas: 11°C, 30°C y 40°C.

Paralelo a esto, se elaborarán unas muestras cilíndricas para medir la resistencia a los 7 y 28 días de edad, verificando su temperatura interna una vez sea ejecutado la prueba de compresión simple.

Al terminar el procedimiento experimental se espera realizar un diagrama que confronte la relación de las temperaturas en función de la madurez con el módulo resiliente, para definir la fórmula matemática que estime el módulo resiliente por el método de la madurez del suelo cemento, a partir de la historia de temperaturas medidas durante el fraguado, tal como se muestra en la Figura 30.

Figura 30. Ejemplo de grafica para determinar la incidencia de la temperatura en el módulo resiliente.



Fuente: Elaboración propia

Una vez se tenga identificada la incidencia, se grafica nuevamente la madurez de las tres mezclas dibujando en las abscisas el factor temperatura – tiempo correspondiente a la edad de la rotura de las muestras y en las ordenadas el módulo resiliente de para cada edad.

7. DESARROLLO DEL PROYECTO: FÓRMULA DE TRABAJO

7.1 GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL

El árido utilizado para esta investigación es de origen sedimentario, tomado de la Mina Cerro Alto, Vereda la Esmeralda del municipio de Nilo, Cundinamarca, de propiedad de T.S. Ingeniería y Cía. S en C.(ver Figura 31).

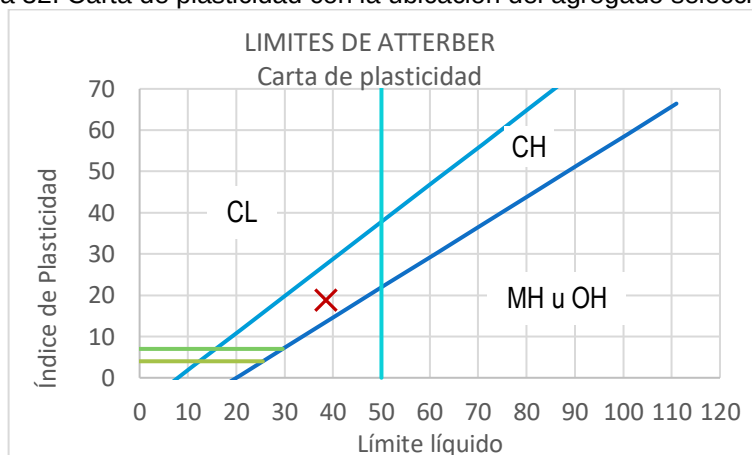
Figura 31. Cantera de exploración de agregados T.S. Ingeniería



Fuente: T.S. Ingeniería y Cía. S. en C., junio 2018.

El agregado es referenciado como ‘Material seleccionado para relleno’ y corresponde a una arena gruesa con arcilla de baja compresibilidad (SC) tal como se muestra en la carta de plasticidad de la Figura 32, registra un límite líquido de 39%, un límite plástico de 20% y un índice de plasticidad del 19% (ver anexo A), por lo que según la clasificación AASHTO, corresponde a un material A-2-6.

Figura 32. Carta de plasticidad con la ubicación del agregado seleccionado.

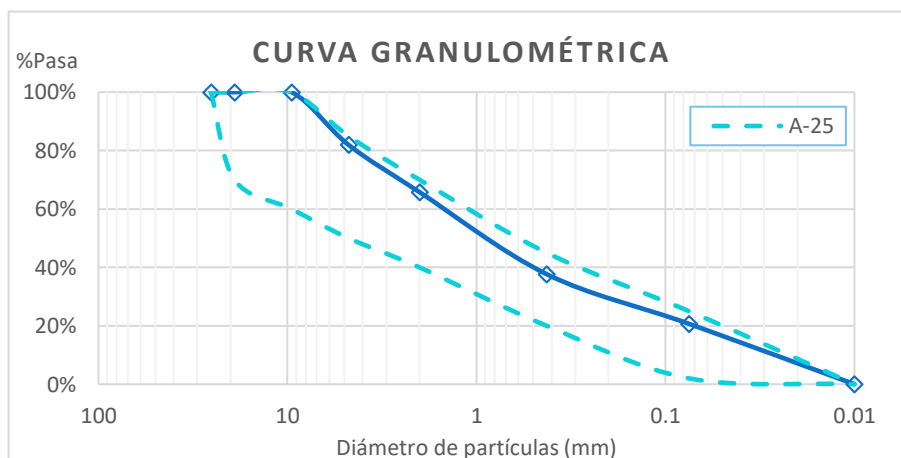


Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S.

Es de aclarar que, todas las pruebas y ensayos de laboratorio se llevaron a cabo en la sede del laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S., ubicado en el municipio de Girardot.

La gradación de la muestra enmarcada con los parámetros establecidos a la especificación del ART-350-13 se encuentra en la Figura 33, y se ajusta a un tipo de suelos A-25, los datos de la prueba se encuentran registrados en el Anexo B.

Figura 33. Curva granulométrica del suelo seleccionado



Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S.

Tabla 4. Resultados comparados con los requisitos de gradación del material

Tamiz		Franja granulométrica INV ART 350-3 (A-25)		Muestra	Condición
25.0 mm	1"	100%	100%	100%	Cumple
19.0 mm	¾"	70%	100%	100%	Cumple
9.5 mm	3/8"	60%	100%	100%	Cumple
4.75 mm	No. 4	50%	85%	82%	Cumple
2.0 mm	No. 10	40%	70%	66%	Cumple
0.425 mm	No. 40	20%	45%	38%	Cumple
0.075 mm	No. 200	2%	25%	21%	Cumple

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S.

Para tener una representación gráfica de la distribución granulométrica del lavado, se presenta la fotografía de la muestra después del lavado sobre el tamiz 200, seca y distribuida conforme a los diferentes tamices del ensayo, tal como se muestra en la Figura 34.

Figura 34. Gradación del suelo seleccionado después del lavado por el tamiz No. 200



Fuente: propia

Dando cumplimiento a la especificación 350, se procede a verificar el contenido de materia orgánica, para esta investigación se aplicó dos métodos el INV E-212

(homologada de la NTC 127), que consiste en sumergir una muestra en solución de hidróxido de sodio al 3% durante 24 horas, para luego compararla con la escala de color, cuyo resultado arrojó un color 3 equivalente al color más oscuro permisible para elaborar concretos hidráulicos según la especificación INV ART-500 (Ver anexo C). Y el segundo método fue realizado mediante el ensayo de pérdida por ignición INV 121 (homologado por la NTC 1886), cuyas pérdidas de masa fue del 0.49% luego de 6 horas de calcinación en una mufla a 445°C, resultado que también resulta permisible conforme a la especificación INV ART-350 para la elaboración de suelo cemento. (ver anexo C).

Figura 35. Muestra del material Seleccionado A-25 luego de la ignición



Fuente: propia

7.2 EL TIPO Y LA MARCA DE CEMENTO EMPLEADO EN EL DISEÑO

La marca de cemento utilizada para esta investigación corresponde al Cemento Argos, gracias al respaldo ya apoyo que ofrece en este tipo de investigaciones. Las muestras aportadas vienen en tres presentaciones: Uso General, Uso Estructural y Uso Estabilización de Suelos. Para el desarrollo de las pruebas será referenciado como (UG) el cemento de uso general, (ART) el cemento de Uso Estructural y (MCH) al cemento de Uso Estabilización de Suelos. Cada uno presenta un color diferente, que sirve de ayuda en el momento de la preparación de las mezclas. (ver Figura 36).

Figura 36. Tipos de Cementos utilizados

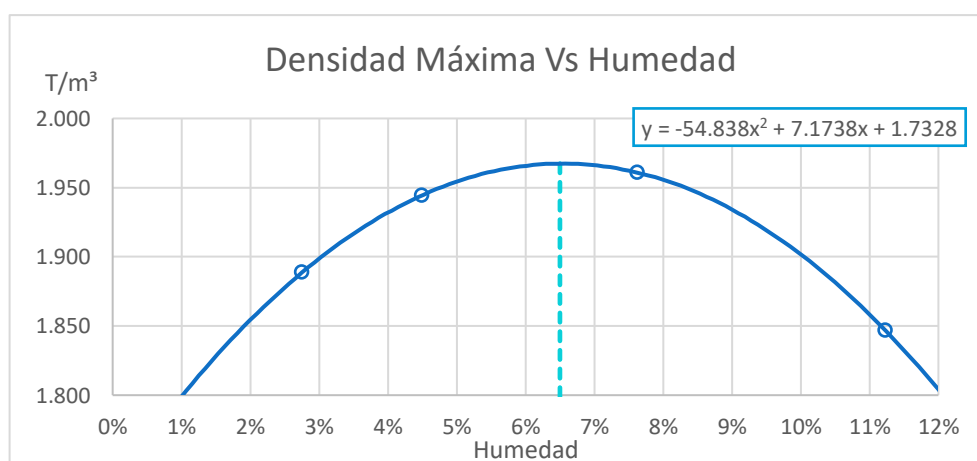


Fuente: propia

7.3 CONTENIDO ÓPTIMO DE CEMENTO

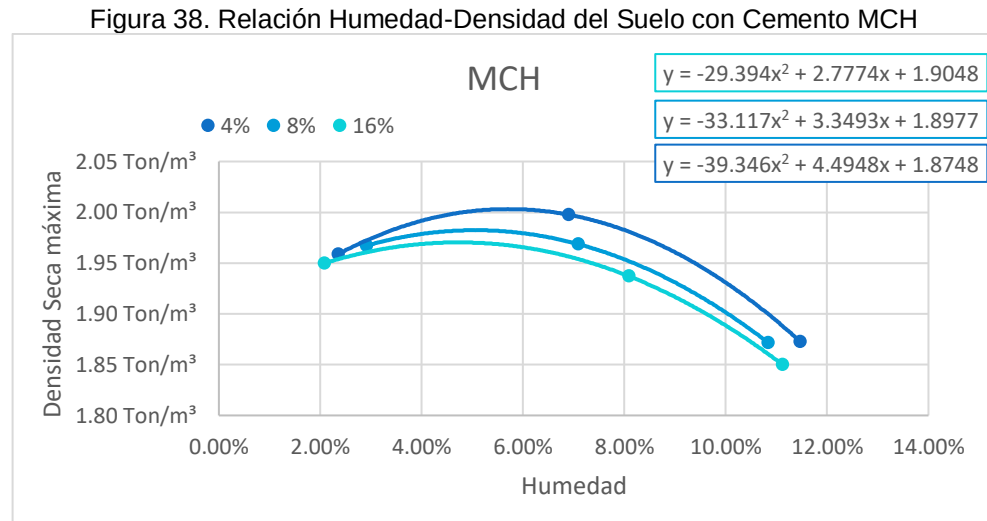
Para dar inicio al diseño de mezclas se procede a conocer la relación entre la densidad máxima del suelo seleccionado y la humedad de compactación, a través del ensayo modificado de compactación INV E-142-13 (ver Anexo D). Registrando como resultado una densidad máxima de 1.967 Ton/m³ y una humedad óptima de 6.5%, tal como se muestra en la Figura 37.

Figura 37. Diagrama que relaciona la Densidad en función de la humedad



Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S.

Siguiendo el procedimiento de la norma INV E-611-13 se procede a medir las relaciones de humedad-densidad de mezclas de suelo cemento, en diferentes proporciones: 4, 8 y 16% de cemento, obteniendo los siguientes diagramas:



Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S.

Tabla 5. Resultados de Densidades Máximas del Suelo Cemento con MCH

Dosificación de cemento MCH	Ecuación de la línea de tendencia	Humedad Óptima	Densidad Máxima
16%	$-29.394x^2 + 2.7774x + 1.9048$	4.7%	1.970 Ton/m ³
8%	$-33.117x^2 + 3.3493x + 1.8977$	5.1%	1.982 Ton/m ³
4%	$-39.346x^2 + 4.4948x + 1.8748$	5.7%	2.003 Ton/m ³

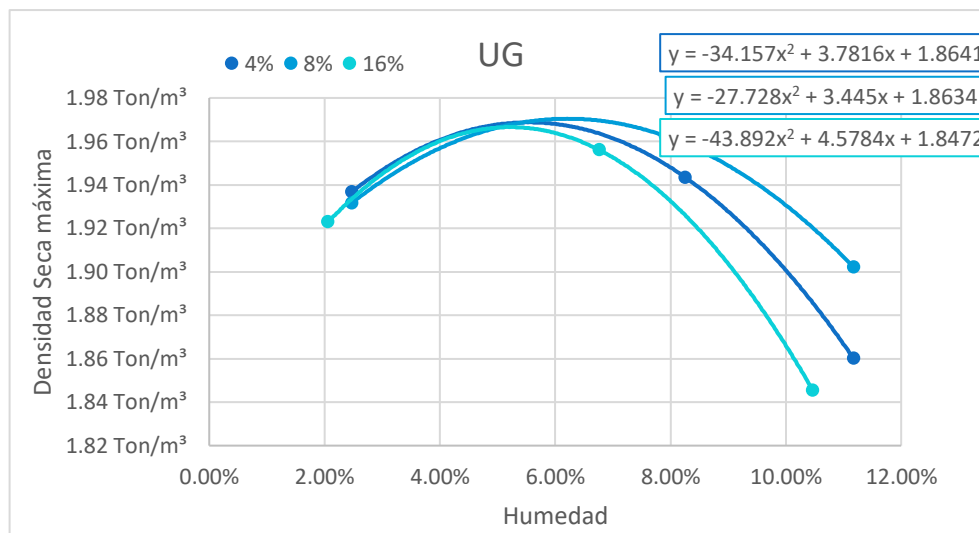
Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S.

De las muestras de suelo cemento elaboradas con cemento tipo MCH se enmarca una tendencia lineal que define que a mayor contenido de cemento menor es su densidad máxima. No obstante, la humedad de compactación dibuja una tendencia que va en contra con lo observado, ya que el cemento deshidrata la mezcla y pareciera que necesitara mayor contenido de agua, sin embargo los registros de humedad son inferiores a la cantidad de agua adicionada a la mezcla, por lo que hace pensar que la humedad de compactación se reduce en la medida en que el cemento reacciona con el agua y encapsula un contenido de agua que no se logra perder después de 24 horas en el horno a 110°C.

Esta observación corresponde a lo que menciona el ACI en su informe 230.1R-09,

respecto a que en la mezcla el cemento produce una floculación con el agua, generando un aumento del contenido óptimo de humedad y una disminución en la densidad máxima. Del mismo modo ocurre con la muestra elaborada con cemento tipo UG, donde se obtienen las tendencias de la Figura 39.

Figura 39. Relación Humedad-Densidad del Suelo con Cemento UG



Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S.

En ella se muestran las ecuaciones, que organizadas en la Tabla 6, se obtiene de manera más precisa la humedad óptima y la densidad máxima.

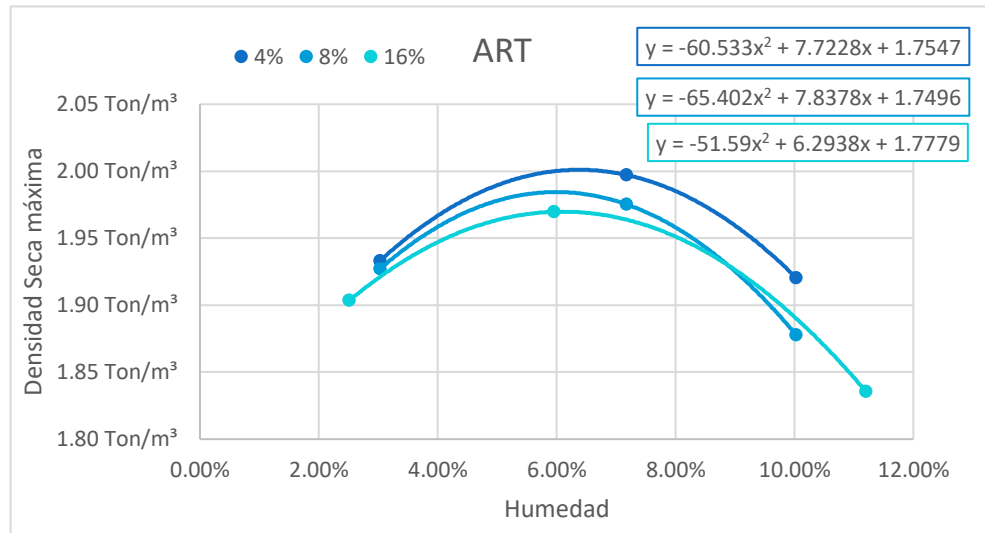
Tabla 6. Resultados de Densidades Máximas del Suelo Cemento con UG

Dosificación de cemento UG	Ecuación de la línea de tendencia	Humedad Óptima	Densidad Máxima
16%	$-43.892x^2 + 4.5784x + 1.8472$	5.2%	1.967 Ton/m³
8%	$-27.728x^2 + 3.445x + 1.8634$	5.3%	1.968 Ton/m³
4%	$-34.157x^2 + 3.7816x + 1.8641$	5.5%	1.969 Ton/m³

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S.

Con el cemento (ART), la muestra SC se cierra un poco más la variación de la densidad máxima y de la humedad, aunque las diferencias ocurren con la milésima del valor de la densidad, llama la atención que la tendencia es similar para los tres tipos de cementos, tal como se muestra en la Figura 40 y en la Tabla 7.

Figura 40. Relación Humedad-Densidad del Suelo con Cemento ART



Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S.

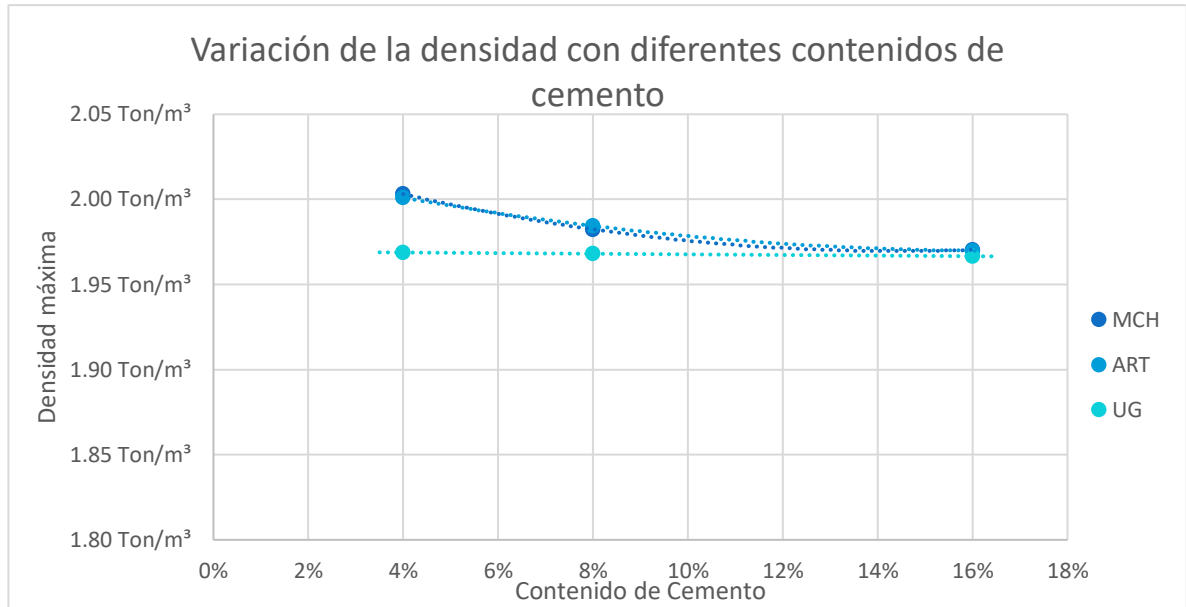
Tabla 7. Resultados de Densidades Máximas del Suelo Cemento con ART

Dosificación de cemento ART	Ecuación de la línea de tendencia	Humedad Óptima	Densidad Máxima
16%	$-43.892x^2 + 4.5784x + 1.8472$	5.2%	1.967
8%	$-27.728x^2 + 3.445x + 1.8634$	5.3%	1.968
4%	$-34.157x^2 + 3.7816x + 1.8641$	5.5%	1.969

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S.

Para ver con mayor claridad la variación de la densidad en función de la dosificación de cemento, se ha elaborado un diagrama que relaciona estas dos variables. Los resultados delinean una tendencia polinómica para los cementos MCH y ART, y una tendencia lineal casi horizontal para el cemento UG, como se ve a continuación:

Figura 41. Densidades máximas en función del contenido de cemento para los tres tipos de suelo cemento



Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

Aunque la tendencia marca un comportamiento muy parecido para los tres tipos de cemento, se asume que la densidad máxima del suelo cemento se encuentra en un valor medio entre el máximo y el mínimo valor con una magnitud de $1.985 \pm 0.018 \text{ Ton/m}^3$.

Siguiendo con el procedimiento de la especificación Art-350, se procede a medir la resistencia a la compresión de las muestras cilíndricas conforme a la norma INV E-613. Para un molde de 4" de diámetro y 4.5" de altura se calcula la masa de la muestra que debe compactarse en el molde para lograr una densidad máxima aplicando las siguientes ecuaciones:

$$Masa_{A-25} = \frac{\rho_{media} \cdot V_{molde}}{(1 + Humedad_{natural})}$$

$$Masa_{agua} = Masa_{A-25} \cdot (Humedad_{\acute{o}ptima} - Humedad_{natural})$$

$$Cemento = (A - 25) \cdot \%Cemento$$

De acuerdo a cada resultado de humedad óptima, se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 8. Dosificación para la elaboración de cilindros de suelo cemento					
Densidad Media:			1.985 Ton/m ³		
Humedad Natural			2.70%		
A-25	Humedad óptima	Agua		Cemento	
1825.0 gr	4.7%	36.5 gr	4%	MCH	73.0 gr
1825.0 gr	5.1%	43.8 gr	8%	MCH	146.0 gr
1825.0 gr	5.7%	54.8 gr	16%	MCH	292.0 gr
1825.0 gr	6.4%	67.5 gr	4%	ART	73.0 gr
1825.0 gr	6.0%	60.2 gr	8%	ART	146.0 gr
1825.0 gr	6.1%	62.1 gr	16%	ART	292.0 gr
1825.0 gr	5.2%	45.6 gr	4%	UG	73.0 gr
1825.0 gr	5.3%	47.5 gr	8%	UG	146.0 gr
1825.0 gr	5.5%	51.1 gr	16%	UG	292.0 gr

Fuente: propia

Así mismo, las muestras cilíndricas para compresión y para la prueba de humedecimiento y secado de suelo cemento se procede inicialmente a compactar las muestras mediante el método del de compactación con martillo. Como la muestra seleccionada corresponde a al material que pasa el tamiz de 19.0 mm, se procede a realizar el reemplazo, y se compacta mediante el método B de la se curan las muestras a una temperatura de 23°C durante siete días. Al cabo del tiempo se fallan las muestras de suelo cemento en compresión inconfiada, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 9. Compresión inconfiada de cilindros de suelo cemento después de 7 días de curado

Muestra	Cemento	Resistencia a la compresión (7 días)		γ seco (7 días)
MCH-1	4%	2.05 kg/cm ²	0.20 MPa	1.931 g/cm ³
MCH-2	8%	4.19 kg/cm ²	0.41 MPa	1.889 g/cm ³
MCH-3	16%	8.23 kg/cm ²	0.81 MPa	1.875 g/cm ³
UG-1	4%	2.00 kg/cm ²	0.20 MPa	1.860 g/cm ³
UG-2	8%	7.84 kg/cm ²	0.77 MPa	1.915 g/cm ³
UG-3	16%	16.08 kg/cm ²	1.58 MPa	1.915 g/cm ³
ART-1	4%	4.36 kg/cm ²	0.43 MPa	1.860 g/cm ³
ART-2	8%	11.62 kg/cm ²	1.14 MPa	1.884 g/cm ³
ART-3	16%	34.82 kg/cm ²	3.41 MPa	1.802 g/cm ³

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

Todos los registros y soportes de laboratorio se adjuntan como Anexo E y para conocer las resistencias finales a los 28 días de curado, se elaboran otras muestras que fueron curadas y falladas aplicando el mismo procedimiento, registrando los siguientes resultados.

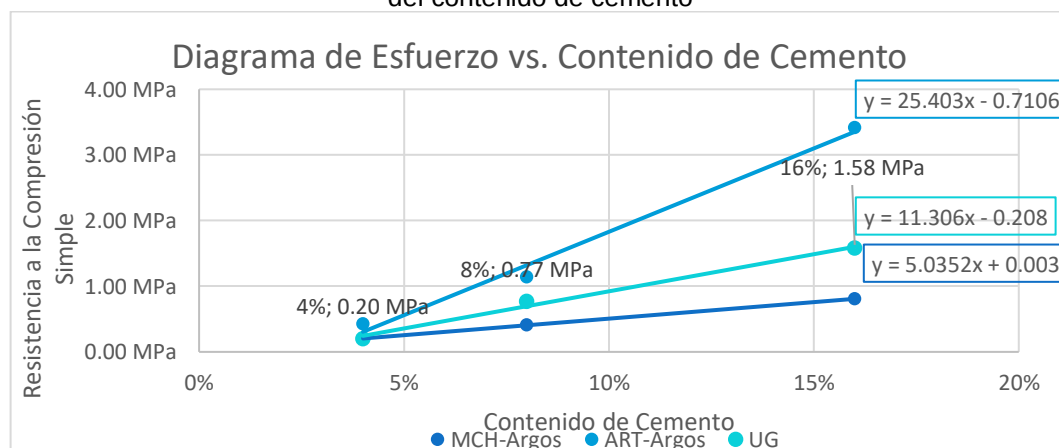
Tabla 10. Compresión inconfiada de cilindros de suelo cemento después de 28 días de curado

Muestra	Cemento	Resistencia a la compresión (28 días)		γ seco (28 días)
MCH-1	4%	7.676 g/cm ³	0.75 MPa	1.830 g/cm ³
MCH-2	8%	9.292 g/cm ³	0.91 MPa	1.908 g/cm ³
MCH-3	16%	11.877 g/cm ³	1.16 MPa	1.880 g/cm ³
UG-1	4%	2.25 kg/cm ²	0.22 MPa	1.904 g/cm ³
UG-2	8%	7.80 kg/cm ²	0.77 MPa	1.924 g/cm ³
UG-3	16%	34.87 kg/cm ²	3.42 MPa	1.936 g/cm ³
ART-1	4%	4.20 kg/cm ²	0.41 MPa	1.924 g/cm ³
ART-2	8%	17.47 kg/cm ²	1.71 MPa	1.900 g/cm ³
ART-3	16%	52.55 kg/cm ²	5.15 MPa	1.877 g/cm ³

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

Con los resultados obtenidos a los siete días se realiza el diagrama que relaciona la resistencia con el contenido de cemento para luego trazar una línea de tendencia que proyecte la cantidad de cemento necesaria para obtener los 4.5 MPa requeridos por la especificación, tal como se muestra en la Figura 42:

Figura 42. Diagrama de Tendencias lineales del Esfuerzo a la compresión inconfiada en función del contenido de cemento



Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

Reemplazando en las ecuaciones de cada curva organizadas en la Tabla 11, se tiene un estimado de contenido de cemento óptimo para lograr la resistencia de diseño, de la siguiente manera:

Tabla 11. Estimación del contenido de cemento mediante la ecuación de tendencia lineal

Tipo de cemento	Ecuación lineal		Contenido óptimo de cemento	Resistencia de diseño
MCH	5.0352	0.003	89%	4.5 MPa
UG	11.306	-0.208	42%	4.5 MPa
ART	25.403	-0.7106	21%	4.5 MPa

Fuente: propia

7.4 OPTIMIZACIÓN DE LA PRUEBA PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS A TRAVÉS DE UN NUEVO DESARROLLO TECNOLÓGICO: MÉTODO DE ELABORACIÓN DE CILINDROS DE SUELO-CEMENTO.

El resultado de dosificación del cemento tipo (MCH) registrado en la Tabla 11 hace pensar que algo falló en el proceso, ya que es un contenido muy alto de cemento que haría cualquier diseño inviable económicamente y constructivamente, por lo que se compararon las densidades obtenidas que se observa que el promedio de las densidades secas de las muestras están por debajo de la densidad máxima, por lo que se procede a realizar un nuevo proceso de compactación, esta vez ya no empleando el método de impacto con martillo, sino mediante la compactación hidráulica empleando una prensa de ensayo a compresión.

Para el desarrollo de este ejercicio no se aplicó ningún método validado por estándares Nacionales ni Internacionales, por lo que se validó mediante pruebas experimentales de ensayo y error.

La compactación consiste en tres etapas, la primera consiste en lubricar el molde de ensayo de 4 pulgadas de diámetro armado con el collar y la base. Segundo, se introduce la muestra y se compacta mediante 25 inserciones con la varilla punto roma de 1/4 de pulgada de diámetro en forma de espiral de adentro hacia afuera. Tercero, se compacta por la cara superior con una presión de 200 ± 3 kN, equivalente a 25 MPa. Cuarto, se quita el collar del molde, se gira el molde y se compacta por la cara inferior con la misma carga. El valor de la presión no debe superar los 25 MPa, ya que se probó con presiones mayores y el molde termina deformándose haciendo que en la tarea de extracción se dañe la muestra

compactada.

Luego del proceso de compactación, se saca la muestra con ayuda de un extractor vertical. No debe pasar mucho tiempo luego de la compactación ya que el lubricante termina infiltrándose en la muestra por absorción y esto impide que los enlaces iniciales con el cemento no se realicen de manera correcta. Es de recordar que los aceites y la silicona no son compatibles con el cemento hidráulico, haciendo que en el exterior las resistencias sean menores que en el interior de la muestra.

Luego de validar el método en el laboratorio, se procede a realizar una curva de relación entre la densidad seca del material seleccionado A-25 en función del contenido de agua, registrando los siguientes resultados:

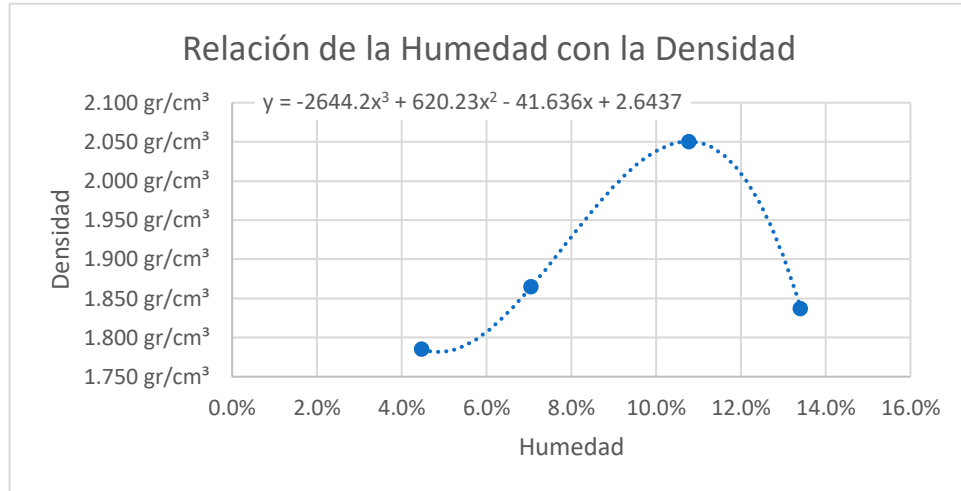
Tabla 12. Relación Humedad-Densidad de mezclas de Suelo Cemento				
A-25	2000.0gr	2000.0gr	2000.0gr	2000.0gr
Contenido de Agua	0%	3%	6%	9%
W	0.0gr	60.0gr	120.0gr	180.0gr
W	1823.0gr	2004.0gr	1906.2gr	2025.4gr
Diámetro	102.6 mm	102.3 mm	102.2 mm	102.6 mm
Diámetro	102.6 mm	102.3 mm	102.2 mm	102.6 mm
Diámetro	102.6 mm	102.3 mm	102.2 mm	102.6 mm
Promedio	102.6 mm	102.3 mm	102.2 mm	102.6 mm
Altura	118.2 mm	122.1 mm	101.1 mm	114.0 mm
Altura	118.2 mm	122.1 mm	99.1 mm	118.2 mm
Altura	118.2 mm	122.1 mm	106.7 mm	120.6 mm
Promedio	118.2 mm	122.1 mm	102.3 mm	117.6 mm
Volumen	977.2 cm ³	1003.6 cm ³	839.2 cm ³	972.3 cm ³
Recipiente	45.1gr	48.6gr	48.4gr	50.4gr
M. Húmeda	229.3gr	159.3gr	218.0gr	126.5gr
M. Seca	221.4gr	152.0gr	201.5gr	117.5gr
Humedad	4.5%	7.1%	10.8%	13.4%
Densidad Húmeda	1.865 gr/cm ³	1.997 gr/cm ³	2.271 gr/cm ³	2.083 gr/cm ³
Densidad Seca	1.785 gr/cm ³	1.865 gr/cm ³	2.050 gr/cm ³	1.837 gr/cm ³

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

Con estos resultados de la Tabla 12 se dibuja la curva que relaciona las densidades en función de la humedad calculada de la muestra, tal como se muestra en Figura

43, obteniendo como densidad máxima 2.058 Ton/m³ con una humedad del 10% del peso de la muestra.

Figura 43. Relación de la densidad de las muestras de suelo cemento en función de la humedad



Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

A continuación en la Figura 44, se presenta la fotografía de las muestras extraídas por el nuevo método validado en el laboratorio. Es de observar que las muestras que las muestras secas, es decir por debajo del 10% tienen riesgo a desmoronarse durante la extracción, mientras que las muestras que superan la humedad óptima además de ser más livianas suelen deformarse perdiendo su geometría cilíndrica.

Figura 44. Muestras cilíndricas compactadas por el método diseñado por los autores



Fuente: propia

De esta manera, solo a partir de la observación se puede calificar una muestra como bien tomada en la medida en que se mantenga su forma, textura y que una vez sea fallada en la prensa su gradación sea homogénea en toda su sección longitudinal. Esto no sucede cuando se compactan por capas, o por impacto ya que las dilataciones, por más que sea descalificado la superficie, es una junta fría que provoca la fisuración, y en el caso de compactación por impacto (golpes con el martillo estandarizado) las gravas suelen fracturarse y los finos suelen saltar fuera del molde alterando su gradación, y en consecuencia las resistencias sean bajas y el diseño sea poco confiable.

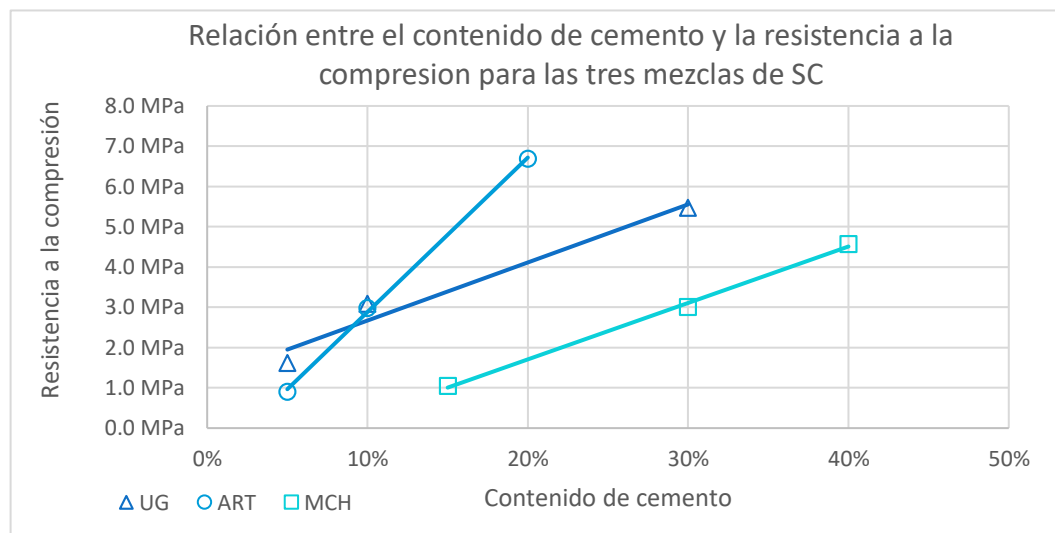
Figura 45. Imperfectos en las muestras elaboradas por los métodos tradicionales



Fuente: propia

Una vez es identificado la densidad máxima, se procede a alistar la masa de la muestra para luego elaborar cilindros con diferentes dosificaciones de cemento. Al cabo de los 7 días de curado, se fallan a compresión simple, esta vez se realizó aplicando la norma INV E-614, utilizando una prensa hidráulica, registrando los resultados adjuntos en el anexo F y utilizados para realizar la Figura 46 de resistencias en función del contenido de cemento:

Figura 46. Diagrama de resistencias a la compresión en función del contenido de cemento



Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

Es de aclarar que, aunque este primer acercamiento a la dosificación de cemento se realizó a través de la medición de un cilindro por dosificación y no el promedio de tres cilindros, con estos valores se determinó el contenido óptimo inicial para realizar las pruebas de durabilidad, que para efectos del artículo 350 es la variable dominante del diseño.

Para medirla se elaboraron dos muestras cilíndricas de tres dosificaciones, la primera calculada con las líneas de tendencias de la Figura 46, y las otras dos con un factor de seguridad de 1.5 y 2.0, tal como se muestra a continuación:

Figura 47. Dosificación del contenido de Cemento para muestras de Suelo Cemento

Tipo de Cemento	Ecuación lineal		Resistencia Teórica	Dosificación Teórica	Factor de Seguridad 1.5	Factor de Seguridad 2.0
MCH	14.015x	-1.0967	4.5	40%	60%	80%
UG	14.423x	+1.2286	4.5	23%	35%	45%
ART	38.351x	-0.952	4.5	14%	21%	28%

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

Con estos contenidos se procede a realizar el ensayo de durabilidad por el ensayo de Máxima pérdida de masa de la mezcla compactada en prueba de humedecimiento y secado INV E-612, registrando los siguientes resultados adjuntos

en el Anexo G, presentados en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados de la prueba de Durabilidad por inmersión y desgaste para las muestras elaboradas con cemento MCH

MCH 40%	Masa Saturada luego de la inmersión	Peso seco inicial	Humedad	Masa seca luego del cepillado	Pérdidas
Ciclo 1	2015.6gr	1820.6gr	10.71%	1780.5gr	2.20%
Ciclo 2	1959.8gr	1780.1gr	10.09%	1759.2gr	1.20%
Ciclo 3	1947.6gr	1757.5gr	10.82%	1741.4gr	1.01%
Ciclo 4	1916.6gr	1739.2gr	10.20%	1724.8gr	0.95%
Ciclo 5	1912.2gr	1722.4gr	11.02%	1710.2gr	0.85%
Ciclo 6	1878.2gr	1707.6gr	9.99%	1697.5gr	0.74%
Ciclo 7	1880.0gr	1694.9gr	10.92%	1686.7gr	0.64%
Ciclo 8	1847.2gr	1684.1gr	9.68%	1677.6gr	0.54%
Ciclo 9	1836.5gr	1676.0gr	9.58%	1672.5gr	0.30%
Ciclo 10	1829.4gr	1671.1gr	9.48%	1668.3gr	0.25%
Ciclo 11	1822.9gr	1666.7gr	9.37%	1664.0gr	0.26%
Ciclo 12	1816.2gr	1662.2gr	9.27%	1659.7gr	0.26%
Total:					9.20%
MCH 60%	Masa Saturada luego de la inmersión	Peso seco inicial	Humedad	Masa seca luego del cepillado	Pérdidas
Ciclo 1	2008.9gr	1822.2gr	10.24%	1795.1gr	1.49%
Ciclo 2	1968.1gr	1794.8gr	9.65%	1781.2gr	0.77%
Ciclo 3	1964.1gr	1780.0gr	10.34%	1767.9gr	0.75%
Ciclo 4	1938.8gr	1766.5gr	9.75%	1756.8gr	0.63%
Ciclo 5	1940.0gr	1755.0gr	10.54%	1746.2gr	0.60%
Ciclo 6	1910.8gr	1744.2gr	9.55%	1736.4gr	0.56%
Ciclo 7	1915.4gr	1734.3gr	10.44%	1727.6gr	0.51%
Ciclo 8	1885.0gr	1725.3gr	9.26%	1719.4gr	0.47%
Ciclo 9	1874.2gr	1716.9gr	9.16%	1711.3gr	0.47%
Ciclo 10	1863.4gr	1708.6gr	9.06%	1703.6gr	0.45%
Ciclo 11	1853.3gr	1700.8gr	8.96%	1696.5gr	0.42%
Ciclo 12	1844.0gr	1693.8gr	8.87%	1690.0gr	0.38%
Total:					7.50%

MCH 80%	Masa Saturada luego de la inmersión	Peso seco inicial	Humedad	Masa seca luego del cepillado	Pérdidas
Ciclo 1	1997.8gr	1818.5gr	9.86%	1802.0gr	0.91%
Ciclo 2	1975.7gr	1801.8gr	9.65%	1793.4gr	0.47%
Ciclo 3	1978.0gr	1792.6gr	10.34%	1785.2gr	0.46%
Ciclo 4	1958.3gr	1784.3gr	9.75%	1778.3gr	0.39%
Ciclo 5	1964.5gr	1777.2gr	10.54%	1771.7gr	0.37%
Ciclo 6	1939.6gr	1770.5gr	9.55%	1765.6gr	0.34%
Ciclo 7	1948.5gr	1764.3gr	10.44%	1760.1gr	0.31%
Ciclo 8	1921.5gr	1758.7gr	9.26%	1755.0gr	0.29%
Ciclo 9	1914.0gr	1753.4gr	9.16%	1749.9gr	0.29%
Ciclo 10	1906.6gr	1748.2gr	9.06%	1745.1gr	0.27%
Ciclo 11	1899.6gr	1743.4gr	8.96%	1740.6gr	0.26%
Ciclo 12	1891.3gr	1738.9gr	8.77%	1736.5gr	0.24%
Total:					4.60%

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

En la imagen de la Figura 48 se puede observar las muestras saturadas luego de la inmersión, para el correspondiente registro de pérdidas de masa.

Figura 48. Muestras luego de la inmersión



Fuente: propia

Con base en los resultados obtenidos, para el suelo cemento con cemento tipo MCH se logra obtener la resistencia por durabilidad requerida para suelos A-2 (gravas y arenas limo arcillosas) de 10% máximo, con una dosificación del 40%.

Tabla 14. Resultados de la prueba de Durabilidad por inmersión y desgaste para las muestras elaboradas con cemento UG

UG 23%	Masa Saturada luego de la inmersión	Peso seco inicial	Humedad	Masa seca luego del cepillado	Pérdidas
Ciclo 1	2025.3gr	1843.4gr	9.87%	1798.5gr	2.44%
Ciclo 2	1971.9gr	1798.0gr	9.67%	1775.1gr	1.27%
Ciclo 3	1956.8gr	1773.1gr	10.36%	1751.4gr	1.22%
Ciclo 4	1920.0gr	1749.1gr	9.77%	1731.1gr	1.03%
Ciclo 5	1910.7gr	1728.2gr	10.56%	1711.1gr	0.99%
Ciclo 6	1871.4gr	1707.9gr	9.57%	1692.2gr	0.92%
Ciclo 7	1865.5gr	1688.8gr	10.46%	1674.7gr	0.83%
Ciclo 8	1826.1gr	1671.1gr	9.28%	1658.0gr	0.78%
Ciclo 9	1805.8gr	1654.0gr	9.18%	1641.2gr	0.77%
Ciclo 10	1785.6gr	1637.0gr	9.08%	1625.0gr	0.73%
Ciclo 11	1766.2gr	1620.6gr	8.98%	1609.5gr	0.69%
Ciclo 12	1746.2gr	1605.2gr	8.78%	1595.2gr	0.62%
Total:					12.30%
UG 35%	Masa Saturada luego de la inmersión	Peso seco inicial	Humedad	Masa seca luego del cepillado	Pérdidas
Ciclo 1	2022.2gr	1842.4gr	9.76%	1808.5gr	1.84%
Ciclo 2	1981.1gr	1808.1gr	9.56%	1790.7gr	0.96%
Ciclo 3	1972.5gr	1789.2gr	10.25%	1772.6gr	0.92%
Ciclo 4	1942.0gr	1770.8gr	9.66%	1757.1gr	0.78%
Ciclo 5	1938.2gr	1754.9gr	10.44%	1741.7gr	0.75%
Ciclo 6	1903.9gr	1739.3gr	9.47%	1727.2gr	0.69%
Ciclo 7	1903.0gr	1724.6gr	10.35%	1713.7gr	0.63%
Ciclo 8	1867.9gr	1710.9gr	9.17%	1700.8gr	0.59%
Ciclo 9	1851.8gr	1697.7gr	9.08%	1687.8gr	0.58%

Ciclo 10	1835.7gr	1684.5gr	8.98%	1675.1gr	0.55%
Ciclo 11	1820.2gr	1671.8gr	8.88%	1663.1gr	0.52%
Ciclo 12	1803.9gr	1659.8gr	8.69%	1651.9gr	0.47%
Total:					9.30%
UG 45%	Masa Saturada luego de la inmersión	Peso seco inicial	Humedad	Masa seca luego del cepillado	Pérdidas
Ciclo 1	2015.3gr	1844.7gr	9.25%	1816.9gr	1.50%
Ciclo 2	1981.3gr	1816.6gr	9.07%	1802.3gr	0.79%
Ciclo 3	1976.0gr	1801.1gr	9.71%	1787.5gr	0.76%
Ciclo 4	1949.5gr	1786.0gr	9.16%	1774.6gr	0.64%
Ciclo 5	1948.3gr	1772.8gr	9.90%	1762.0gr	0.61%
Ciclo 6	1917.8gr	1759.9gr	8.97%	1750.0gr	0.57%
Ciclo 7	1919.2gr	1747.8gr	9.81%	1738.8gr	0.51%
Ciclo 8	1887.5gr	1736.5gr	8.70%	1728.1gr	0.48%
Ciclo 9	1873.9gr	1725.5gr	8.60%	1717.3gr	0.48%
Ciclo 10	1860.4gr	1714.5gr	8.51%	1706.7gr	0.45%
Ciclo 11	1847.4gr	1703.9gr	8.42%	1696.7gr	0.42%
Ciclo 12	1833.4gr	1693.9gr	8.23%	1687.4gr	0.39%
Total:					7.60%

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

De los resultados correspondientes a la mezcla de suelo cemento elaborado con cemento tipo UG, el desgaste que más se ajusta a la condición del ART 350, corresponde a la dosificación del 35% de cemento.

Tabla 15. Resultados de la prueba de Durabilidad por inmersión y desgaste para las muestras elaboradas con cemento ART

ART 14%	Masa Saturada luego de la inmersión	Peso seco inicial	Humedad	Masa seca luego del cepillado	Pérdidas
Ciclo 1	2028.9gr	1840.6gr	10.23%	1780.1gr	3.29%
Ciclo 2	1957.9gr	1779.5gr	10.03%	1748.9gr	1.72%
Ciclo 3	1933.8gr	1746.2gr	10.74%	1717.4gr	1.65%
Ciclo 4	1887.9gr	1714.3gr	10.13%	1690.5gr	1.39%
Ciclo 5	1871.3gr	1686.7gr	10.95%	1664.1gr	1.34%

Ciclo 6	1824.7gr	1659.9gr	9.92%	1639.4gr	1.24%
Ciclo 7	1812.2gr	1634.9gr	10.84%	1616.6gr	1.12%
Ciclo 8	1766.8gr	1611.8gr	9.62%	1594.8gr	1.06%
Ciclo 9	1740.8gr	1589.5gr	9.51%	1573.0gr	1.04%
Ciclo 10	1715.0gr	1567.5gr	9.41%	1552.0gr	0.99%
Ciclo 11	1690.3gr	1546.4gr	9.31%	1532.1gr	0.93%
Ciclo 12	1665.6gr	1526.6gr	9.10%	1513.7gr	0.84%
Total:					16.60%
ART 21%	Masa Saturada luego de la inmersión	Peso seco inicial	Humedad	Masa seca luego del cepillado	Pérdidas
Ciclo 1	2026.3gr	1842.4gr	9.98%	1796.1gr	2.52%
Ciclo 2	1971.2gr	1795.6gr	9.78%	1772.0gr	1.31%
Ciclo 3	1955.4gr	1769.9gr	10.48%	1747.6gr	1.26%
Ciclo 4	1917.6gr	1745.1gr	9.88%	1726.6gr	1.06%
Ciclo 5	1907.7gr	1723.7gr	10.68%	1706.0gr	1.02%
Ciclo 6	1867.5gr	1702.7gr	9.68%	1686.6gr	0.95%
Ciclo 7	1861.1gr	1683.1gr	10.58%	1668.6gr	0.86%
Ciclo 8	1821.0gr	1664.9gr	9.38%	1651.4gr	0.81%
Ciclo 9	1800.1gr	1647.2gr	9.28%	1634.1gr	0.80%
Ciclo 10	1779.4gr	1629.8gr	9.18%	1617.4gr	0.76%
Ciclo 11	1759.4gr	1613.0gr	9.08%	1601.5gr	0.71%
Ciclo 12	1739.0gr	1597.1gr	8.88%	1586.8gr	0.64%
Total:					12.70%
ART 30%	Masa Saturada luego de la inmersión	Peso seco inicial	Humedad	Masa seca luego del cepillado	Pérdidas
Ciclo 1	2023.1gr	1877.2gr	7.77%	1843.4gr	1.80%
Ciclo 2	1983.4gr	1843.1gr	7.61%	1825.7gr	0.94%
Ciclo 3	1973.0gr	1824.2gr	8.16%	1807.7gr	0.90%
Ciclo 4	1944.8gr	1805.9gr	7.69%	1792.2gr	0.76%
Ciclo 5	1938.8gr	1790.0gr	8.31%	1776.9gr	0.73%
Ciclo 6	1908.1gr	1774.4gr	7.54%	1762.4gr	0.68%
Ciclo 7	1904.7gr	1759.7gr	8.24%	1748.9gr	0.62%
Ciclo 8	1873.6gr	1746.1gr	7.30%	1736.0gr	0.58%

Ciclo 9	1858.1gr	1732.9gr	7.23%	1723.0gr	0.57%
Ciclo 10	1842.6gr	1719.7gr	7.15%	1710.4gr	0.54%
Ciclo 11	1827.7gr	1707.0gr	7.07%	1698.3gr	0.51%
Ciclo 12	1812.2gr	1695.0gr	6.92%	1687.2gr	0.46%
Total:				9.10%	

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

A diferencia de los dos anteriores, la dosificación más apropiada en relación con la durabilidad, para suelo cemento elaborado con cemento ART corresponde al 30%.

En ese orden, el diseño de mezclas para las muestras de suelo cemento de esta investigación, parte de la dosificación óptima de cemento así: MCH =40%, UG=35% y ART=30%.

Sin embargo, el contenido de agua se debe ajustar a la dosificación ya que, el cemento presenta mayor porcentaje de absorción que la muestra de suelo, en el momento del moldeo de muestras, el contenido de agua se debe aumentar en relación con el contenido de cemento, Además de esto, un porcentaje de agua entra a formar parte de los enlaces y no se percibe a la hora de medir la humedad por el método del secado en el horno durante 24 hrs. Ya que el ejercicio realizado en el laboratorio indique que, aunque se adiciona una cantidad de agua en la mezcla, los resultados de humedad indican que esa cantidad fue menor. Por esta razón, se realizó el ejercicio de medir la relación entre la densidad y el contenido de agua, esta vez midiendo la cantidad de agua adicionada en gramos, aplicando la metodología de compactación desarrollada durante esta investigación. Registrando los siguientes resultados:

Tabla 16. Resultados de la prueba que relaciona la densidad en función del contenido de agua, en las muestras de suelo cemento con MCH por el método de compactación propio

Prueba	1	2	3
MCH	800,0gr	800,0gr	800,0gr
A-25	2000,0gr	2000,0gr	2000,0gr
Contenido de Agua	11%	15%	25%
	212,0gr	300,0gr	500,0gr
W	2047,1gr	1918.7gr	2283,3gr
Diámetro	101,6 mm	101,6 mm	102,3 mm
	101,7 mm	101,5 mm	103,3 mm
	101,7 mm	101,5 mm	101,7 mm

Promedio	101,7 mm	101,5 mm	102,4 mm
Altura	124,7 mm	112,7 mm	134,9 mm
	119,1 mm	113,3 mm	131,0 mm
	129,8 mm	113,4 mm	132,7 mm
Promedio	124,5 mm	113,1 mm	132,9 mm
Volumen	1011,0 cm ³	916,0 cm ³	1094,9 cm ³
Recipiente	49,2gr	45,8gr	59,0gr
M. Húmeda	290,3gr	350,2gr	315,0gr
M. Seca	270,4gr	315,5gr	278,1gr
Humedad Calculada	9,0%	12,9%	16,8%
Densidad Húmeda	2,025 gr/cm ³	2,095 gr/cm ³	2,085 gr/cm ³
Densidad Seca	1,858 gr/cm ³	1,856 gr/cm ³	1,785 gr/cm ³

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

Tabla 17. Resultados de la prueba que relaciona la densidad en función del contenido de agua, en las muestras de suelo cemento con UG por el método de compactación propio

Prueba	1	2	3	4
UG	700,0gr	700,0gr	700,0gr	700,0gr
A-25	2000,0gr	2000,0gr	2000,0gr	2000,0gr
Contenido de Agua	10%	15%	20%	25%
	200,0gr	300,0gr	400,0gr	500,0gr
W	1983,8gr	1980,5gr	2370,5gr	1932,3gr
Diámetro	101,3 mm	101,6 mm	102,3 mm	101,9 mm
	101,6 mm	101,5 mm	103,3 mm	101,6 mm
	101,7 mm	101,5 mm	101,7 mm	101,6 mm
Promedio	101,5 mm	101,5 mm	102,4 mm	101,7 mm
Altura	115,5 mm	112,7 mm	134,9 mm	113,4 mm
	115,3 mm	113,3 mm	131,0 mm	112,5 mm
	114,7 mm	113,4 mm	132,7 mm	110,2 mm
Promedio	115,2 mm	113,1 mm	132,9 mm	112,0 mm
Volumen	932,5 cm ³	916,0 cm ³	1094,9 cm ³	910,1 cm ³
Recipiente	49,2gr	45,8gr	59,0gr	50,9gr
M. Húmeda	290,3gr	350,2gr	315,0gr	460,9gr
M. Seca	270,4gr	315,5gr	278,1gr	388,7gr
Humedad Calculada	9,0%	12,9%	16,8%	21,4%
Densidad Húmeda	2,127 gr/cm ³	2,162 gr/cm ³	2,165 gr/cm ³	2,123 gr/cm ³
Densidad Seca	1,952 gr/cm ³	1,916 gr/cm ³	1,853 gr/cm ³	1,749 gr/cm ³

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

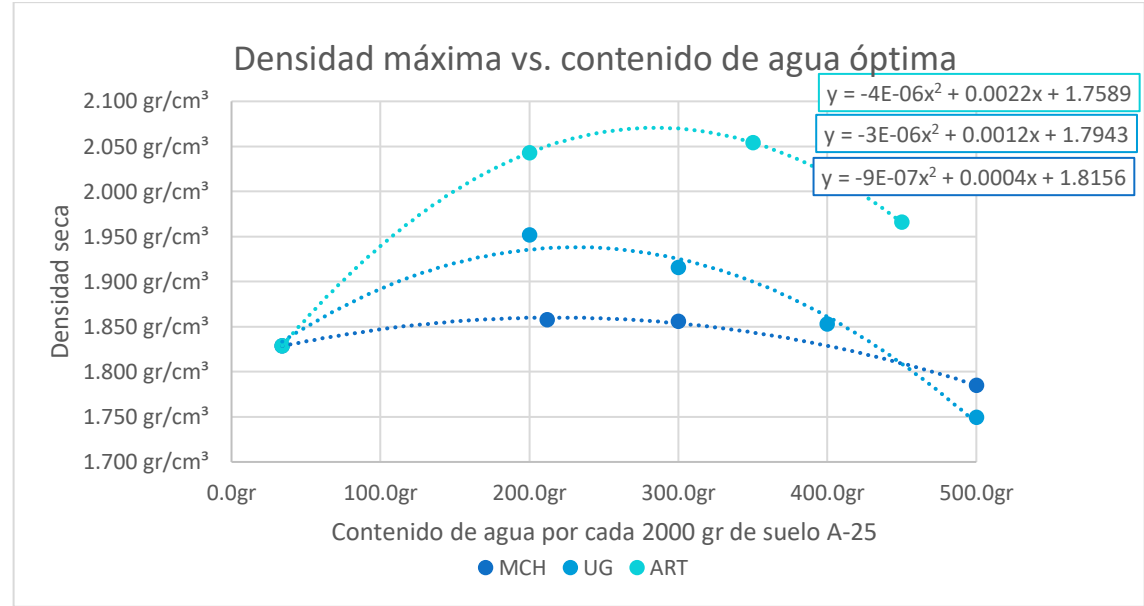
Tabla 18. Resultados de la prueba que relaciona la densidad en función del contenido de agua, en las muestras de suelo cemento con ART por el método de compactación propio

ART	700,0gr	700,0gr	700,0gr
A-25	2000,0gr	2000,0gr	2000,0gr
Contenido de Agua	10,0%	17,5%	22,5%
	200,0gr	350,0gr	450,0gr
W	1625,4gr	2096,1gr	2141,8gr
Diámetro	101,7 mm	102,1 mm	101,0 mm
	101,9 mm	102,0 mm	102,1 mm
	101,7 mm	101,9 mm	101,9 mm
Promedio	101,8 mm	102,0 mm	101,7 mm
Altura	88,8 mm	108,2 mm	111,2 mm
	89,6 mm	108,0 mm	112,1 mm
	89,9 mm	108,6 mm	111,9 mm
Promedio	89,4 mm	108,3 mm	111,7 mm
Volumen	727,4 cm ³	884,7 cm ³	907,0 cm ³
Recipiente	45,7gr	47,4gr	47,2gr
M. Húmeda	303,7gr	317,4gr	295,5gr
M. Seca	281,6gr	281,5gr	253,9gr
Humedad	9,4%	15,3%	20,1%
Densidad Húmeda	2,234 gr/cm ³	2,369 gr/cm ³	2,361 gr/cm ³
Densidad Seca	2,043 gr/cm ³	2,054 gr/cm ³	1,966 gr/cm ³

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

Cabe resaltar que mientras que los resultados de la humedad calculada, medida con una muestra de suelo ya mezclada con el contenido de cemento y el agua, tomada de lo que sobra de la elaboración de cilindros, pesada desde el primer instante en que el agua entra en contacto con la mezcla, con una masa superior a 100 gr, y que luego se expone a una temperatura controlada 110°C en un horno eléctrico durante 24 horas; es muy inferior a la masa de agua adicionada a la mezcla dividida entre la masa de suelo seca. Esto hace reflexionar sobre la función de esa diferencia de humedad, que luego de reaccionar con el cemento, no se logra medir con un ensayo normalizado de medición de humedad. Haciendo un poco más complejo el método de diseño de dosificación de la mezcla de suelo cemento. Por tal razón, se realiza el diagrama de densidades en función del contenido de cemento de la mezcla, tal como se muestra en la Figura 49.

Figura 49. Diagrama que relaciona la densidad en función del contenido de agua, en muestras de suelo cemento



Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

Es así como para la preparación de las siguientes muestras se calcula el contenido óptimo de agua, empleando las ecuaciones de las tendencias de la figura anterior, de la siguiente manera:

Tabla 19. Dosificación óptima para la elaboración de muestras de suelo cemento					
Tipo de cemento	Ecuación de la línea de tendencia	Densidad máxima	Masa de suelo A-25	Masa de cemento	Masa de agua
ART	$-4E-06 x^2 + 0,0022x + 1,7589$	2,057 gr/cm³	2000 gr	600 gr	240,0 gr
UG	$-3E-06 x^2 + 0,0012x + 1,7943$	1,907 gr/cm³	2000 gr	700 gr	150,0 gr
MCH	$-9E-07 x^2 + 0,0004x + 1,8169$	1.861 gr/cm³	2000 gr	800 gr	200,0 gr

Fuente: propia con información validada en el laboratorio P.C. Diseños y Construcción S.A.S

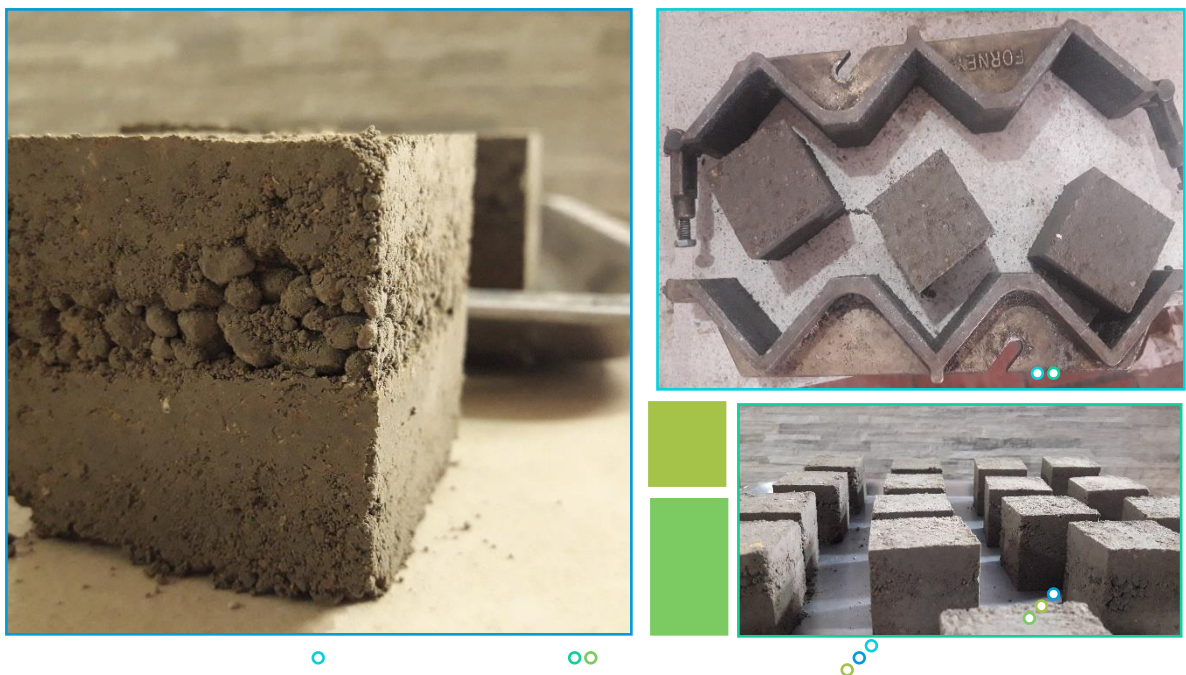
8. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE REFERENCIA Y LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN POR EL MÉTODO DE LA MADUREZ

8.1 MADUREZ DEL SUELO CEMENTO

Con el diseño de mezcla definido, se procede realizar el procedimiento de la Norma Técnica NTC 3756, para determinar la curva de calibración del índice de madurez. Para dar inicio, es necesario realizar cubos de suelo cemento para medir su resistencia a diferentes días de edad en tres temperaturas de curado, son 54 cubos por cada diseño de mezclas. Para tres diseños que se desarrolla en esta investigación, es necesario elaborar 162 cubos.

El procedimiento para elaborar cada cubo está definido por la norma NTC 220 y consiste en compactar en dos capas la muestra compactada por apisonamiento empleando un pisón rectangular con 32 inserciones, sobre cada capa. Sin embargo, los resultados de textura, y homogeneidad de las muestras se muestran en la Figura 50.

Figura 50. Cubos de suelo cemento



Fuente: propia

Esa irregularidad en la textura, gradación y forma de las muestras hacen pensar que los resultados de la compresión simple van a presentar un alto grado de variabilidad, por lo que, para dar cumplimiento al procedimiento, y en lo posible no alterar las condiciones de cálculo y sus coeficientes, se procede a elaborar muestras cilíndricas con las mismas dimensiones, manteniendo la relación de altura y ancho igual a uno, como en los cubos. Solo que las nuevas muestras serán elaboradas por el mismo método validado en esta investigación, para lo cual se elaboró un molde de 2 pulgadas de diámetro, con una base, un collar y un pistón.

Figura 51. Muestras de suelo cemento equivalentes a los cubos de mortero



Fuente: propia

Se calibró la carga de compresión hasta lograr unas muestras lo suficientemente confiables físicamente. La carga de compactación para estas muestras fue de 20 kN $\pm$ 3. Y su proceso fue similar a las muestras de 4 pulgadas de diámetro: primero se calcula la masa de la muestra para la densidad deseada, seguido se apisona con 25 inserciones de la varilla punto roma de $\frac{1}{4}$ ", luego se pone el pistón haciendo giros

de 45°, para nivelar la superficie, seguido se compacta por la cara superior con una carga de $20 \text{ kN} \pm 3$, se quita el pistón y se le da la vuelta al molde para luego compactarlo por la cara inferior, y al cabo lograrlo, se extrae la muestra para luego llevarla al cuarto de curado. Para evitar confundir las muestras, debido a la cantidad, estas fueron marcadas con vinilo blanco, tal como se muestra en la Figura 52.

Figura 52. Muestras marcadas cilíndricas de relación altura/ancho igual a 1.



Fuente: propia.

Con los resultados obtenidos en la compresión de muestras cilíndricas adjuntos en el Anexo H, se construye la gráfica para determinar la madurez de la mezcla, tal como se muestra sección 9.2.

8.2 CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN Y DE LA TEMPERATURA DE REFERENCIA DEL CEMENTO ART.

De los resultados obtenidos de la compresión simple de cubos de mortero, que para

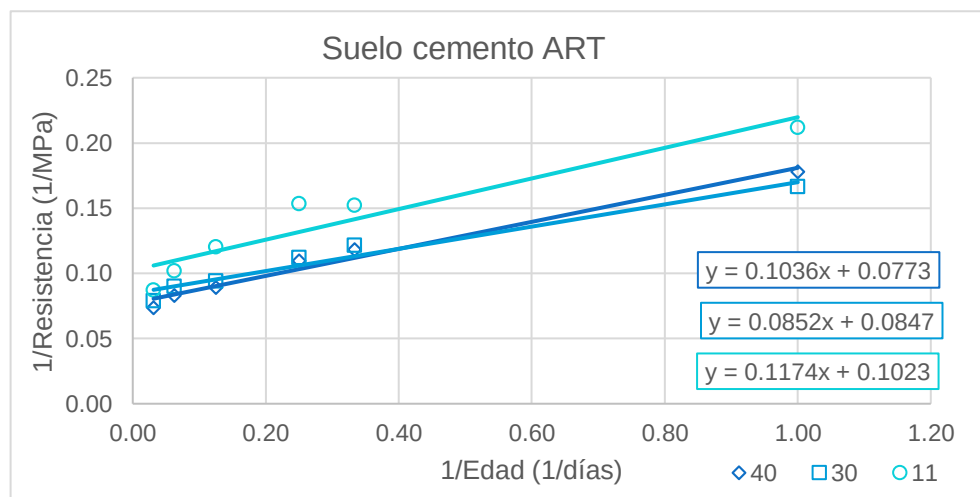
esta investigación fueron reemplazados por cilindros de suelo cemento con relación ancho/altura igual a 1.0; se realizó la tabla de cálculo de la resistencia a compresión con el promedio de tres cilindros fallados por cada edad (Ver Anexo H). Seguido se calculó el inverso de la resistencia y el inverso de la edad tal como se muestra en la Tabla 20. Con estos valores, se procede a realizar el diagrama que relaciona el inverso de la resistencia ($1/R$, en $1/\text{MPa}$) en función con el inverso de la edad ($1/\text{días}$), por cada temperatura de curado. Sobre estos puntos se traza la recta de tendencia que permite trazar un corte en las ordenadas (y) obteniendo el dato de $1/S_u$.

Tabla 20. Valores Inversos de la resistencia y la edad obtenidas en la prueba de compresión de cubos (cilindros de suelo cemento ART)

Edad	1/Edad	1/Resistencia (1/MPa)	40°C	30°C	20°C
1	1,00		0.18	0.17	0.21
3	0,33		0.12	0.12	0.15
4	0,25		0.11	0.11	0.15
8	0,13		0.09	0.09	0.12
16	0,06		0.08	0.09	0.10
32	0,03		0.07	0.08	0.09
1/Su			0.0773	0.0847	0.1023
Su			12.94	11.81	9.78
Ecuación recta 40°			$y = 0.1036x + 0,0773$		
Ecuación recta 30°			$y = 0.0852x + 0,0847$		
Ecuación recta 20°			$y = 0.1174x + 0,1023$		

Fuente: propia

Figura 53. Diagrama para determinar $1/S_u$ en Suelo Cemento ART



Fuente: propia

Después de identificar los indicadores de Su (resistencia límite), se calcula la constante A con la ecuación 3, de la sección 6.2 del presente documento. Para cada temperatura de curado, registrando los valores de la Tabla 21.

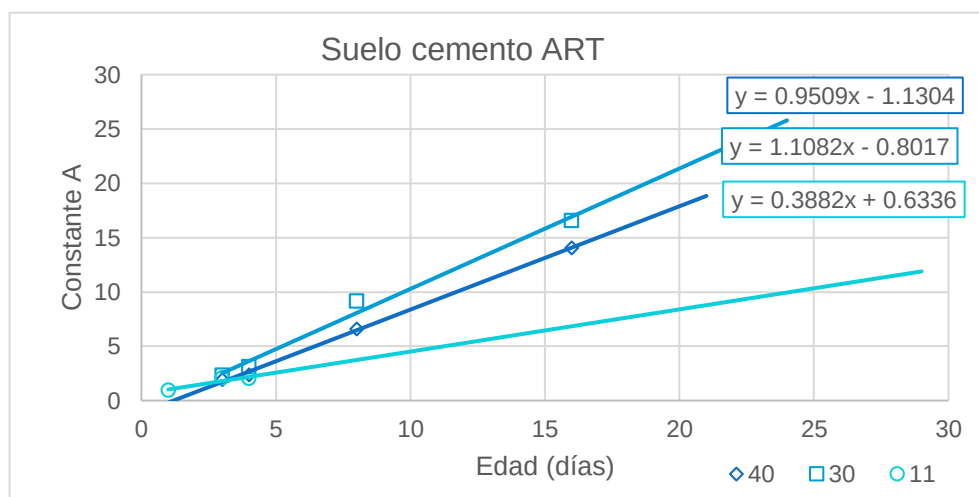
Tabla 21. Resultados del cálculo de la constante A del Suelo Cemento ART

Edad	1/Edad	S Resistencia promedio	40°C	30°C	20°C	Constante A	40°C	30°C	20°C
1 día	1,00		5.6 MPa	6.0 MPa	4.7 MPa		0.7693	1.0386	0.936
3 días	0,33		8.5 MPa	8.3 MPa	6.6 MPa		1.9065	2.3236	2.053
4 días	0,25		9.1 MPa	8.9 MPa	6.5 MPa		2.3935	3.1245	2.015
8 días	0,13		11.2 MPa	10.6 MPa	8.3 MPa		6.5960	9.1472	5.726
16 días	0,06		12.1 MPa	11.1 MPa	9.8 MPa		14.058	16.551	
32 días	0,03		13.6 MPa	12.7 MPa	11.5 MPa		20.7609	14.466	

Fuente: propia

Siguiendo el orden, se realiza el diagrama de la Figura 54 de la constante A en función de la edad en días.

Figura 54. Diagrama que relaciona la constante A en función del tiempo, para cada temperatura de curado para Suelo Cemento ART



Fuente: propia

Atendiendo la función de una recta $y = mx + y$, donde m es la pendiente de la curva, la constante K, equivalente a la pendiente de la recta, se calculó trazando la línea de tendencia recta de los puntos de cada una de las temperaturas de curado, con su respectiva ecuación despejando la constante K, de la siguiente manera:

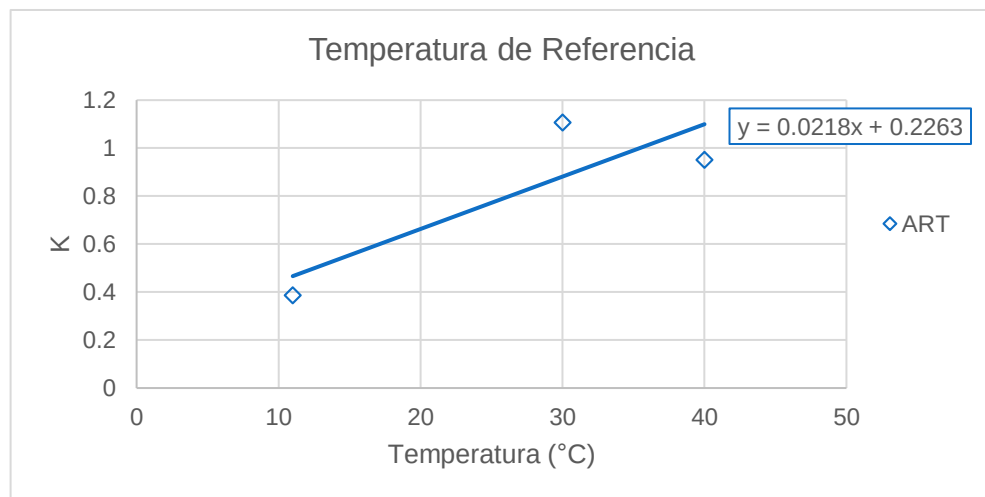
Tabla 22. Selección de la pendiente de la recta K para cada temperatura de curado

		K
Ecuación recta 40°C	$y = 0,9509 x - 1.1304$	0.9509
Ecuación recta 30°C	$y = 1.1082 x - 0,8017$	1.1082
Ecuación recta 20°C	$y = 0.3882 x + 0,6336$	0.3882

Fuente: propia

Por último, se realiza el diagrama que correlaciona las constantes K en función con la temperatura de curado, de donde se obtiene Q (energía de activación) y Te (Temperatura equivalente), tal como se muestra a continuación:

Figura 55. Diagrama que correlaciona la constante K con la temperatura de curado

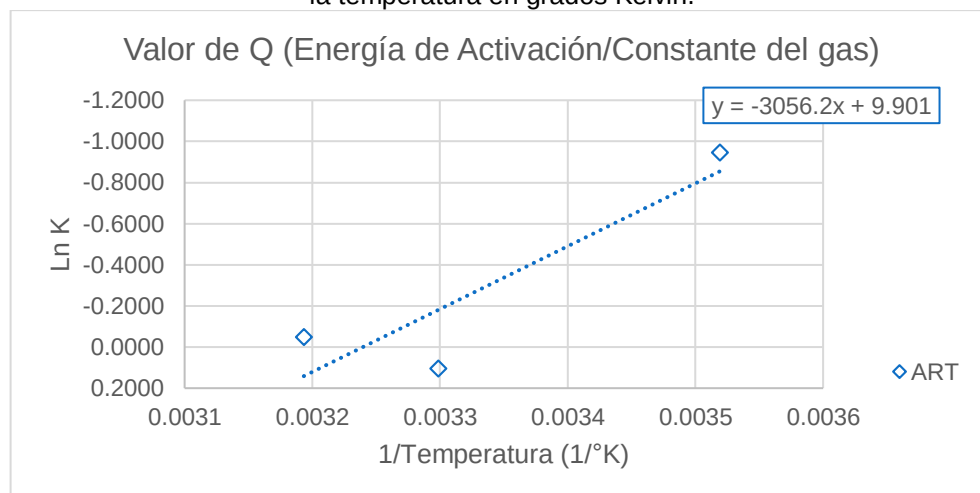


Fuente: propia

De esta manera, y con la ecuación de la línea de tendencia de la Figura 55 se obtiene la temperatura de referencia T_0 con un valor de -10.30°C , es decir que a diferencia del concreto hidráulico el suelo absorbe hasta 10.3 grados centígrados en el desarrollo de su resistencia. Este valor se emplea luego en la ecuación del índice de madurez dada como: $M_{(t)} = \sum (T_a - T_0) \Delta t$.

Luego se calcula el logaritmo natural de los coeficientes K, y el inverso de la temperatura, pero esta vez no en grados centígrados, si no en grados Kelvin. Con estos valores se trazan los puntos en un plano cartesiano, donde luego se dibuja la línea de tendencia recta que más se acerque a los puntos, y la pendiente de esa recta equivale al valor de Q (energía de activación/constante del gas), tal como se muestra en la Figura 56, el Q para suelo cemento ART es igual a 3056.2°K .

Figura 56. Línea de tendencia recta entre los logaritmos naturales de K en función del recíproco de la temperatura en grados Kelvin.



Fuente: propia.

8.3 CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN Y DE LA TEMPERATURA DE REFERENCIA DEL CEMENTO UG.

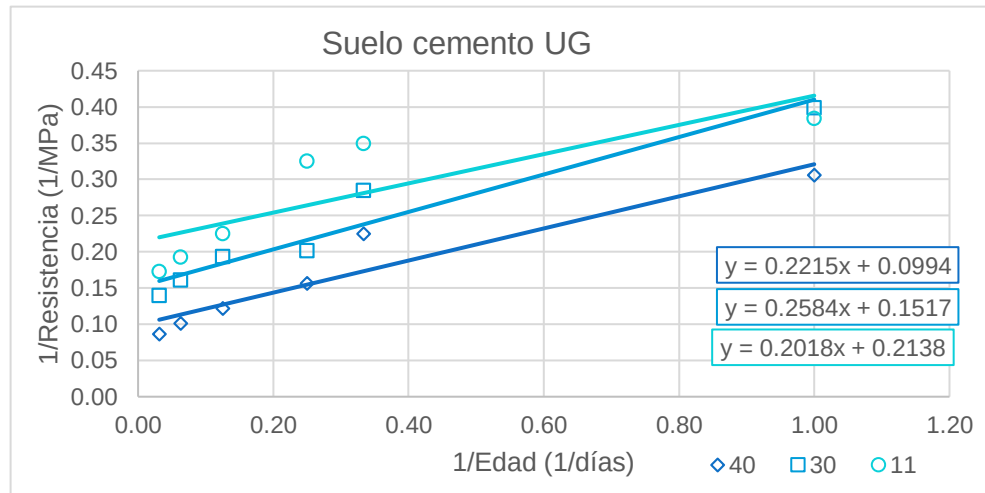
Tal como se desarrolló con el suelo cemento elaborado con cemento ART, se procede a calcular el Q y la Temperatura de Referencia T0, para los diseños de mezclas elaborados con cementos tipo MCH y UG, tal como se muestra en la Tabla 23 y en la Figura 57.

Tabla 23. Valores Inversos de la resistencia y la edad obtenidas en la prueba de compresión de cubos (cilindros de suelo cemento UG)

Edad	1/Edad		40°C	30°C	20°C
1	1,00	1/Resistencia (1/MPa)	0.31	0.40	0.38
2	0,50		0.22	0.28	0.35
4	0,25		0.16	0.20	0.32
8	0,13		0.12	0.19	0.22
16	0,07		0.10	0.16	0.19
32	0,05		0.09	0.14	0.17
1/Su			0.0994	0.1517	0.2138
Su			10.06	6.59	4.68
Ecuación recta 40°C			$y=0.2215 x + 0.0994$		
Ecuación recta 30°C			$y=0.2584 x + 0.1517$		
Ecuación recta 20°C			$y=0.2018 x + 0.2138$		

Fuente: propia

Figura 57. Diagrama para determinar 1/Su en Suelo Cemento UG



Fuente: propia

La resistencia límite para este tipo de suelo cemento, se determina conforme a las ecuaciones de cada una de las rectas de la figura anterior, y con base a estos se calcula la constante A, organizada en la Tabla 24.

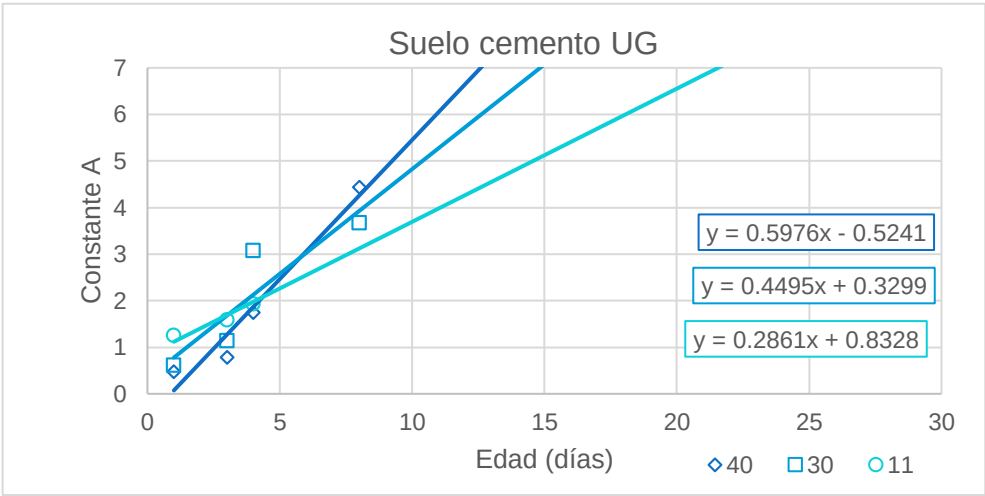
Tabla 24. Resultados del cálculo de la constante A del Suelo Cemento UG

Edad	1/Edad		40°C	30°C	20°C	40°C	30°C	20°C
1	1,00	S Resistencia promedio	3.3 MPa	2.5 MPa	2.6 MPa	0.482	0.614	1.261
2	0,50		4.4 MPa	3.5 MPa	2.9 MPa	0.792	1.146	1.585
4	0,25		6.4 MPa	5.0 MPa	3.1 MPa	1.745	3.082	1.929
8	0,13		8.2 MPa	5.2 MPa	4.4 MPa	4.444	3.669	
16	0,07		9.9 MPa	6.2 MPa	5.2 MPa	55.71	17.34	
32	0,05		11.6 MPa	7.2 MPa	5.8 MPa	-7.39	11.82	9.998
						Constante A		

Fuente: propia

Con esta información se trazan las rectas de la constante A en función de la edad en días, tal como se muestra en la Figura 58. Diagrama que relaciona la constante A en función del tiempo, para cada temperatura de curado, para Suelo Cemento UG Figura 58 y con las funciones se calcula la constante K, organizada en la Tabla 25.

Figura 58. Diagrama que relaciona la constante A en función del tiempo, para cada temperatura de curado, para Suelo Cemento UG



Fuente: propia

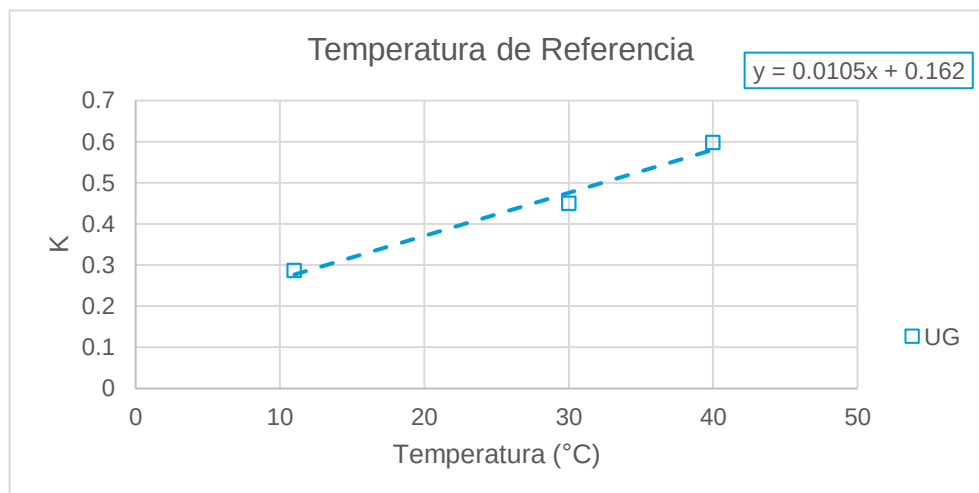
Tabla 25. Selección y cálculo de las variables para la curva de Energía de Activación Q y Temperatura de referencia T0, para suelo cemento UG

Ecuación recta 40°C	$y = 0.5976x - 0.5241$	
Ecuación recta 30°C	$y = 0.4495x + 0.3299$	
Ecuación recta 20°C	$y = 0.2861x + 0.8328$	
K	0.5976	0.4495
ln K	-0.5148	-0.7996
T°	40°C	30°C
K°	313.15	303.15
1/K°	0.00319	0.00329

Fuente: propia

Finalmente, con esta información se trazan la recta de la constante K en función de la temperatura en grados centígrados para calcular la temperatura de referencia T0, tal como se muestra en la Figura 59.

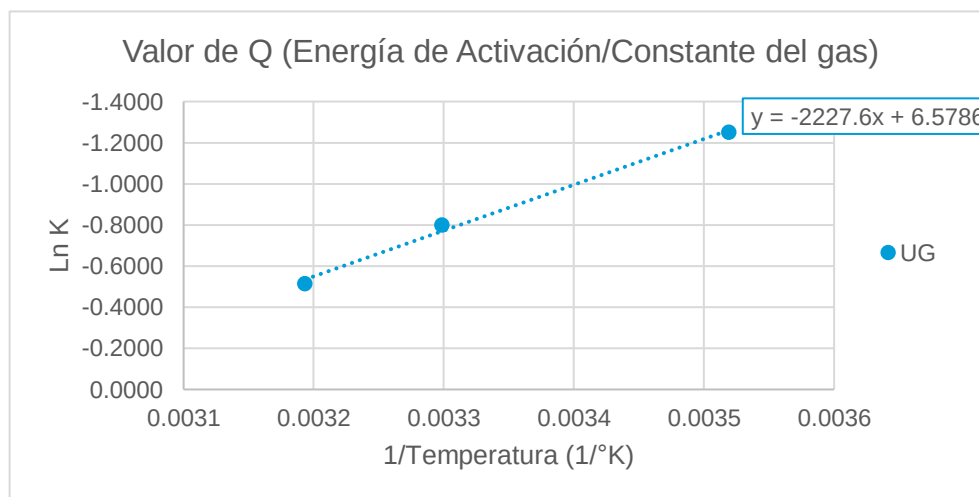
Figura 59. Diagrama de Temperatura de Referencia T0 para Suelo Cemento UG



Fuente: propia

Con estos resultados se define para el suelo cemento UG la temperatura de referencia correspondiente a -15.43° , mientras que la pendiente de la recta de la Figura 60, correspondiente al valor de Q es igual a 2227.6°K .

Figura 60. Diagrama de la Energía de Activación Q para suelo cemento UG



Fuente: propia

8.4 CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN Y DE LA TEMPERATURA DE REFERENCIA DEL CEMENTO MCH.

Del mismo modo que en los anteriores procedimientos, se presenta en la Tabla 26 los valores inversos de la resistencia y su correspondiente resistencia límite Su.

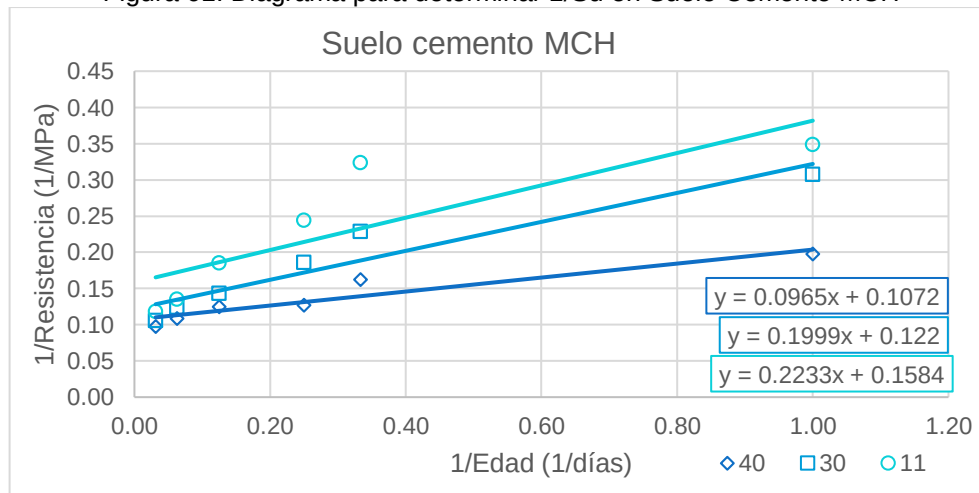
Tabla 26. Valores Inversos de la resistencia y la edad obtenidas en la prueba de compresión de cubos (cilindros de suelo cemento MCH)

Edad	1/Edad	1/Resistencia (1/MPa)	40°C	30°C	20°C
1	1.00		0.20	0.31	0.35
2	0.50		0.16	0.23	0.32
4	0.25		0.13	0.19	0.24
8	0.13		0.12	0.14	0.18
16	0.07		0.11	0.12	0.14
32	0.05		0.10	0.11	0.12
1/Su			0.1072	0.122	0.1584
Su		9.33	8.20	6.31	
Ecuación recta 40°C				y=0.0965 x	+ 0.1072
Ecuación recta 30°C				y=0.1999 x	+ 0.122
Ecuación recta 20°C				y=0.2233 x	+ 0.1584

Fuente: propia

Teniendo en cuenta que dichas ecuaciones fueron tomadas de cada una de las rectas de la Figura 61.

Figura 61. Diagrama para determinar 1/Su en Suelo Cemento MCH



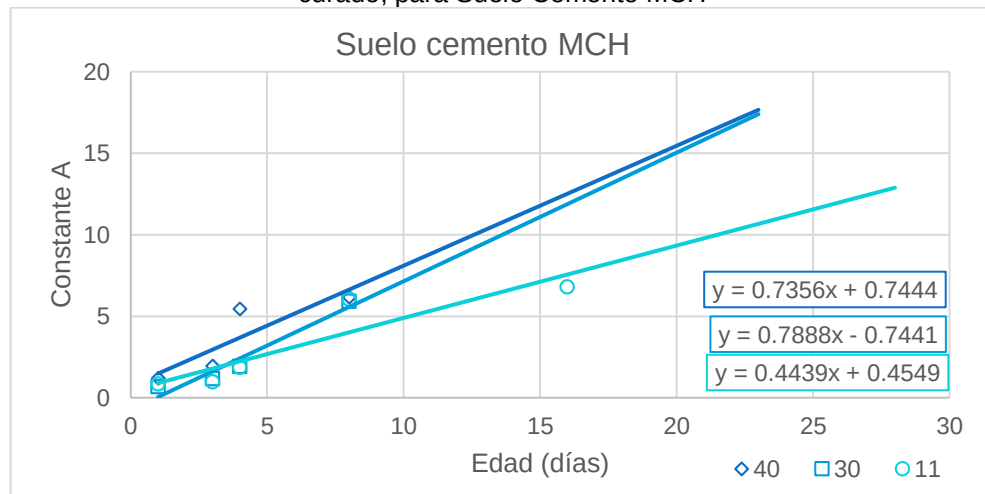
Fuente: propia

Tabla 27. Resultados del cálculo de la constante A del Suelo Cemento MCH

Edad	1/Edad		40°C	30°C	20°C		40°C	30°C	20°C
1	1.00	S Resistencia promedio	5.1 MPa	3.3 MPa	2.9 MPa	Constante A	1.19	0.66	0.83
2	0.50		6.2 MPa	4.4 MPa	3.1 MPa		1.94	1.15	0.96
4	0.25		7.9 MPa	5.4 MPa	4.1 MPa		5.45	1.93	1.86
8	0.13		8.0 MPa	7.0 MPa	5.4 MPa		6.16	5.91	6.03
15	0.07		9.2 MPa	8.1 MPa	7.4 MPa		85.41	77.19	6.80
20	0.05		10.3 MPa	9.5 MPa	8.5 MPa		-11.09	-7.35	-3.92

Fuente: propia

Figura 62. Diagrama que relaciona la constante A en función del tiempo, para cada temperatura de curado, para Suelo Cemento MCH



Fuente: Propia

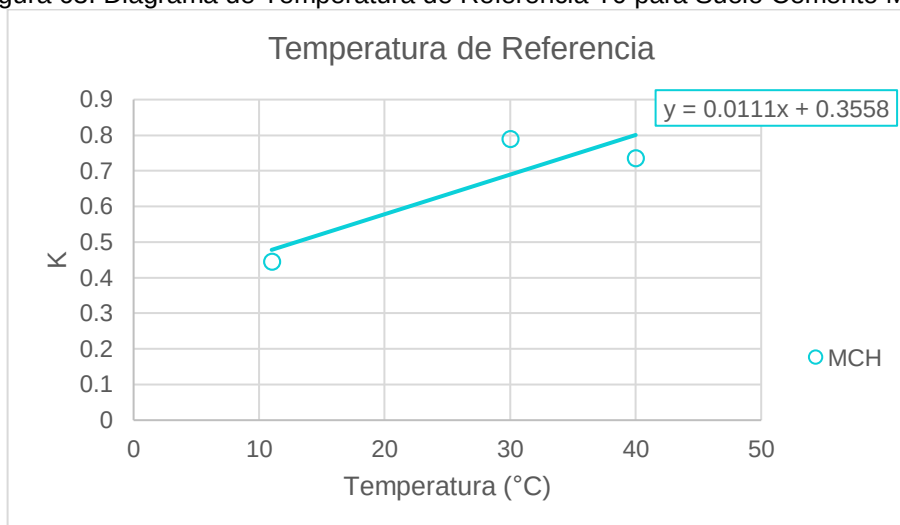
Las ecuaciones de la Figura 62 se calcula la constante K de la Tabla 28.

Tabla 28. Selección y cálculo de las variables para la curva de Energía de Activación Q y Temperatura de referencia T0, para suelo cemento MCH

Ecuación recta 40°C	y= 4.0493 x	- 9.499	4.0493
Ecuación recta 30°C	y= 1.0793 x	- 1.7764	1.0793
Ecuación recta 20°C	y= 0.518 x	- 0.3326	0.518
K	0.7356	0.7888	0.4439
ln K	-0.3071	-0.2372	-0.8122
T°	40°C	30°C	11°C
K°	313.15	303.15	284.15
1/K°	0.00319	0.00329	0.00352

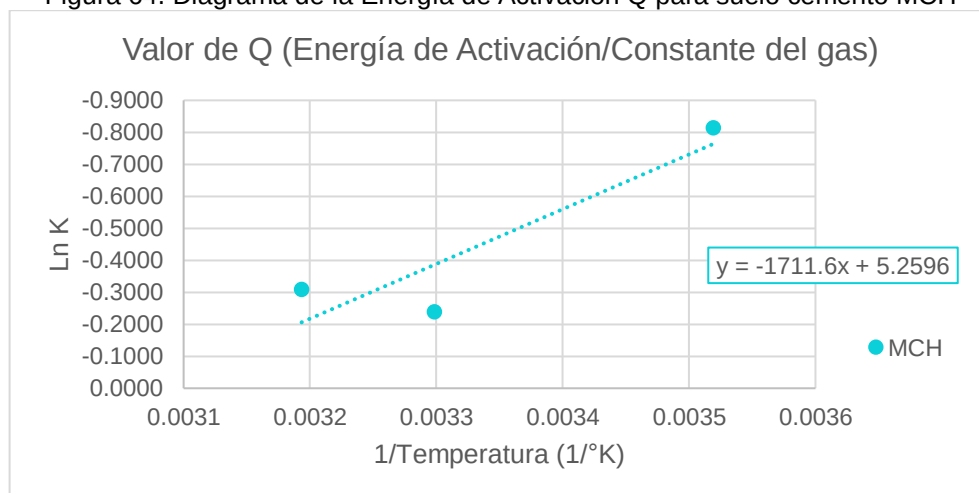
Fuente: propia

Figura 63. Diagrama de Temperatura de Referencia T0 para Suelo Cemento MCH



Fuente: propia

Figura 64. Diagrama de la Energía de Activación Q para suelo cemento MCH



Fuente: propia

De este modo se define para el suelo cemento MCH un valor de Q igual a 1711.6°K y una temperatura de referencia T0 de -32.05°C.

Al cabo de todo el proceso después de estimar los valores de Q, se despeja el valor de la Energía de Activación multiplicando la constante universal del gas igual a 8.31 J/(K-mol) y T0 para los diferentes tipos de suelo cemento, consolidados en la siguiente tabla:

Tabla 29. Consolidado de resultados de Energía de Activación y Temperatura de referencia

	MCH	UG	ART
Q=E/R	1711.6 °K	2227.6 °K	3056.2 °K
E	14223.40 J/mol	18511.36 J/mol	25397.02 J/mol
T0	-10.38 °C	-15.43 °C	-32.05 °C

Fuente: propia

Se observa en la Tabla 29 que todas las temperaturas de referencia (T0) registran valores negativos, si entiende que este valor es restado a la temperatura monitoreado en campo para calcular la madurez, de acuerdo a la Ecuación 1. Se podría pensar que al ser este un valor negativo no resta si no que suma en la función, corroborando que la madurez se adquiere no solo por la formación de enlaces reflejado en el calor de hidratación, si no por otra variable que no tiene el concreto hidráulico y que el suelo cemento sí tiene.

Es así como toma fuerza el discurso del ACI en su informe 320-09, donde afirma que la resistencia es propia del porcentaje de compactación, la humedad, el tipo de cemento y su cantidad de cemento. Comparándolo con las muestras elaboradas, la densidad de las mezclas es proporcional a la dosificación del cemento y al tipo de cemento. Para las muestras MCH tienen mayor contenido de cemento y menor densidad con respecto a las muestras UG, y estas con las de ART. De manera que se podría afirmar que la temperatura de referencia, es proporcional a la densidad seca de la muestra.

9. MONITOREO DE TEMPERATURAS DEL SUELO CEMENTO DURANTE LA ETAPA DEL FRAGUADO

Con el propósito de medir la incidencia de la temperatura ambiente durante el curado en la madurez del suelo cemento, el diseño de mezcla definido en la sección 8 de este documento, fue sometido a tres temperaturas de curado: la primera a 40°C, empleando un equipo conocido como Baño María, con un nivel de agua que solo alcanza al nivel del área de calentamiento y que humedece las muestras a través de vapor o gotas de agua al punto rocío, tal como se muestra en la Figura 65.

Figura 65. Hidratación de las muestras de Suelo Cemento curadas a 40°C



Fuente: propia.

Otro grupo de muestras, elaboradas con el mismo diseño de mezclas fueron expuestas a temperaturas bajas (11°C). Esto se logró con ayuda de un recipiente

de cierre hermético plástico, un nivel de agua de 1 cm de altura, y un sobre piso en el fondo del recipiente que protegían las muestras de la saturación, que se mantuvo dentro de una nevera en la zona de refrigeración durante toda la etapa de maduración de las muestras (ver Figura 66).

Figura 66. Hidratación de las muestras de Suelo Cemento curadas a 11°C



Fuente: propia

Del mismo modo, empleando otro recipiente plástico de cierre hermético se almacenaron las muestras que fueron curadas a temperatura ambiente, registrando valores promedio de 30°C. Todas las muestras fueron envueltas previamente por una tela absorbente tipo toalla, que mantuvo la humedad de las muestras y las protegió del goteo por punto de rocío que se presentaba al interior del recipiente.

Estas condiciones de curado, fueron el origen de la pregunta de investigación y para lograr medir su impacto en la resistencia, se ha recurrido al método de medición de temperatura.

Este método poco usado en las obras de infraestructura de Colombia, cada vez

toma más fuerza en las investigaciones experimentales de los concretos hidráulicos, y lo más común es tomar una muestra concreto introducirla en un recipiente de icopor y protegerla de la temperatura ambiente usando neveras plásticas portátiles, para luego introducirle una termocupla o sensor de temperatura en el interior de la mezcla y registrar lecturas de temperatura a diferentes edades.

Si bien, el monitoreo de temperaturas es un ejercicio que pocos constructores practican, la medición de la temperatura en suelo cemento es un tema totalmente desconocido y nunca usado. Por esto, y por la falta de bibliografía referente al tema, se tomó la decisión de elaborar muestras de suelo cemento dentro de recipientes de papel de 10 cm de diámetro y 7 cm de altura, compactadas en tres capas con ayuda del pisón usado para medir la absorción de las arenas, logrando una textura uniforme en toda la superficie de la muestra. Después de extender la primera capa se ubicó en el centro del vaso un pitillo plástico delgado conocido comercialmente como 'pitillo mezclador' y luego se extendieron y compactaron las dos capas restantes. La función del pitillo es permitir introducir el cable de la termocupla o sensor hasta la superficie de la primera capa, con el fin de poder leer la temperatura interna de la muestra de suelo cemento, sin inconvenientes. Luego de instalar el cable del sensor, se sella el recipiente con una tapa plástica y la boca del pitillo con silicona líquida, para evitar que el aire de la superficie altere la temperatura interna de la muestra.

Figura 67. Preparación de muestras para calorimetrías



Fuente: propia

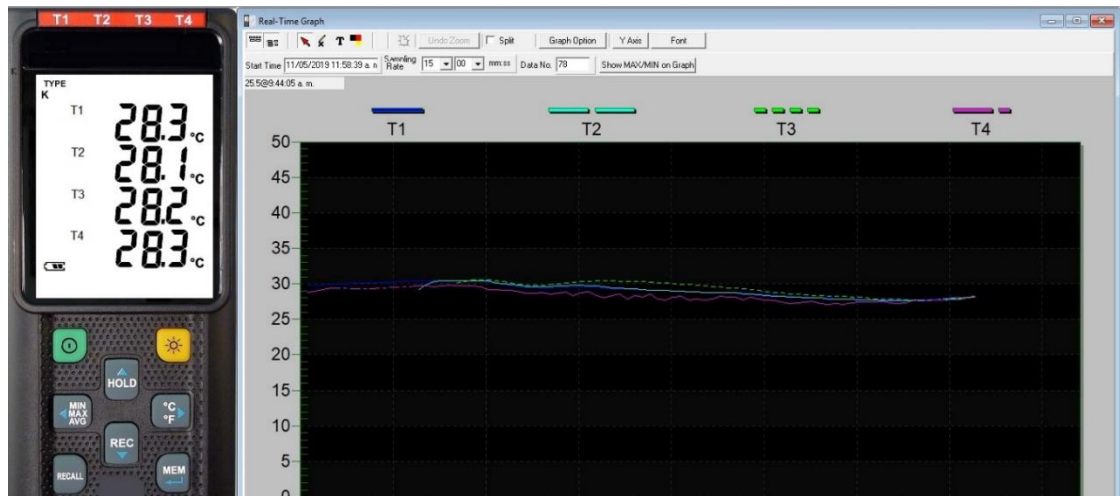
Luego de elaborar las muestras con los tres diseños de mezclas, ART, UG y MCH, se procede a realizar las lecturas de temperatura con ayuda de un Datalogger Marca Center 520, como se muestra en la Figura 68 y en la Figura 69.

Figura 68. Registro de temperaturas en condiciones normales (30°C)



Fuente: propia

Figura 69. Registro de temperaturas mediante el uso del Datalogger Marca Center 520.



Este ejercicio se dio en los tres ambientes, a 40, 30° y 11°C, con los tres diseños de mezclas: ART, UG y MCH.

Figura 70. Registro de temperaturas en el Baño María a 40°C

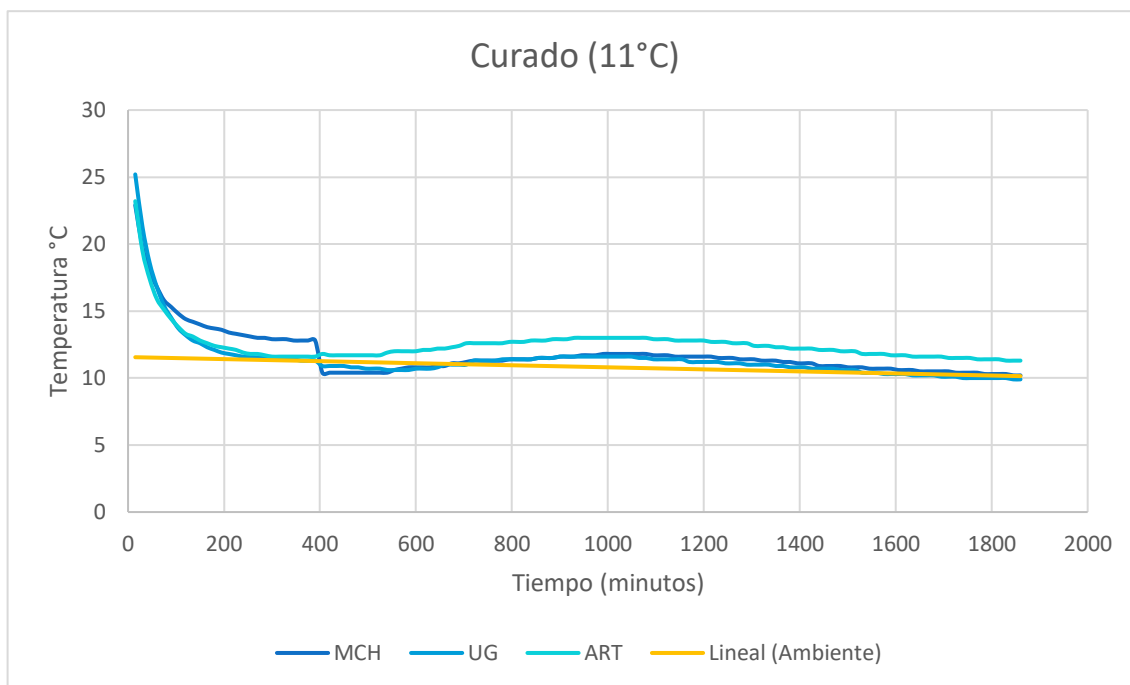


Fuente: propia

Es de aclarar que las temperaturas controladas, como el caso de 40° en el Baño María y 11° en el refrigerador, no fue difícil mantener la temperatura promedio. Mientras que, con el registro realizado a temperatura ambiente, se hizo con las muestras ubicadas en la ciudad de Girardot, en un lugar protegido del sol y con un ventilador eléctrico encendido frente a las muestras, se hizo más complicada la tarea de mantenerlas a 30° ya que la temperatura del municipio puede bajar hasta los 21°C en la madrugada y subir en pocas horas hasta 43°C al medio día.

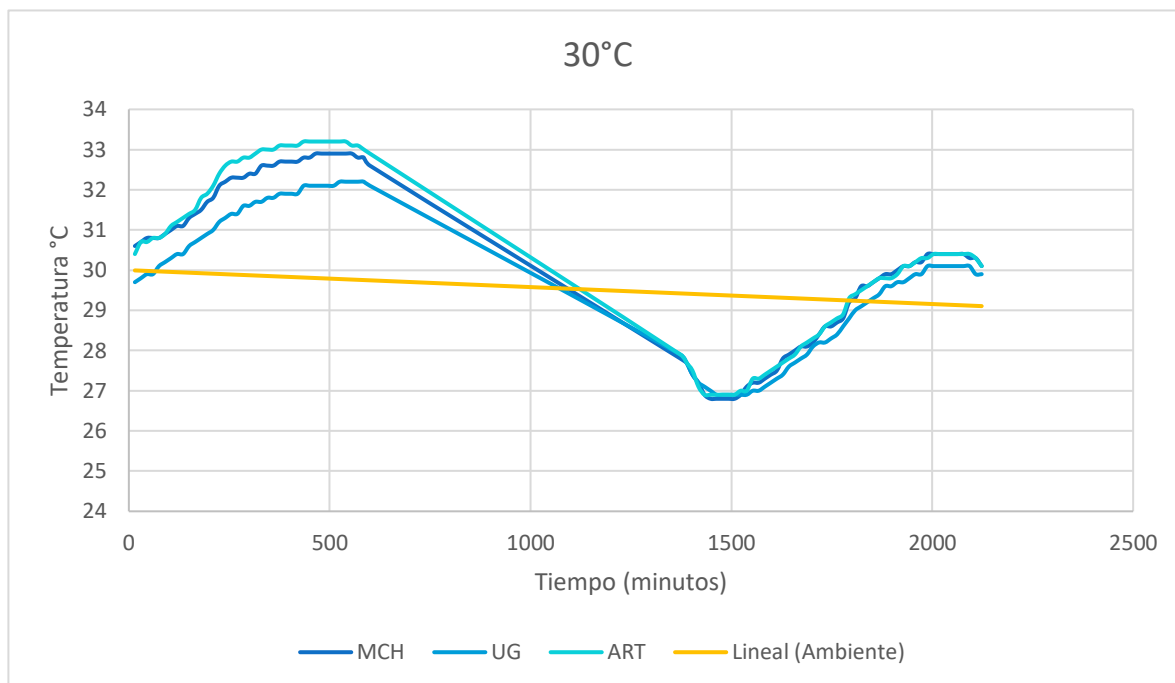
Pese a todo esto, los resultados obtenidos se registran en el Anexo I y se pueden observar en Figura 71 el desarrollo de temperaturas en el refrigerador a 11°C, en la Figura 72 el desarrollo de las temperaturas a 30° C, y en la Figura 73 el desarrollo de temperaturas en el baño maría.

Figura 71. Calorimetrías tomadas en las muestras curadas a 11°C



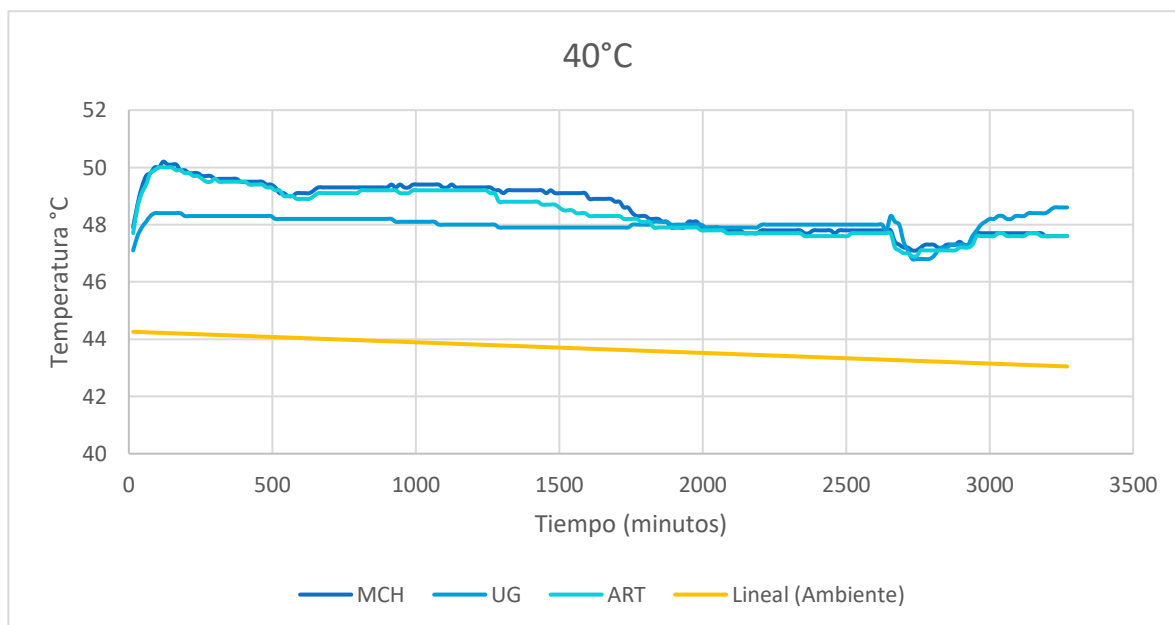
Fuente: Propia

Figura 72. Calorimetrías tomadas en las muestras curadas a 30°C



Fuente: Propia

Figura 73. Calorimetrías tomadas en las muestras curadas a 40°C

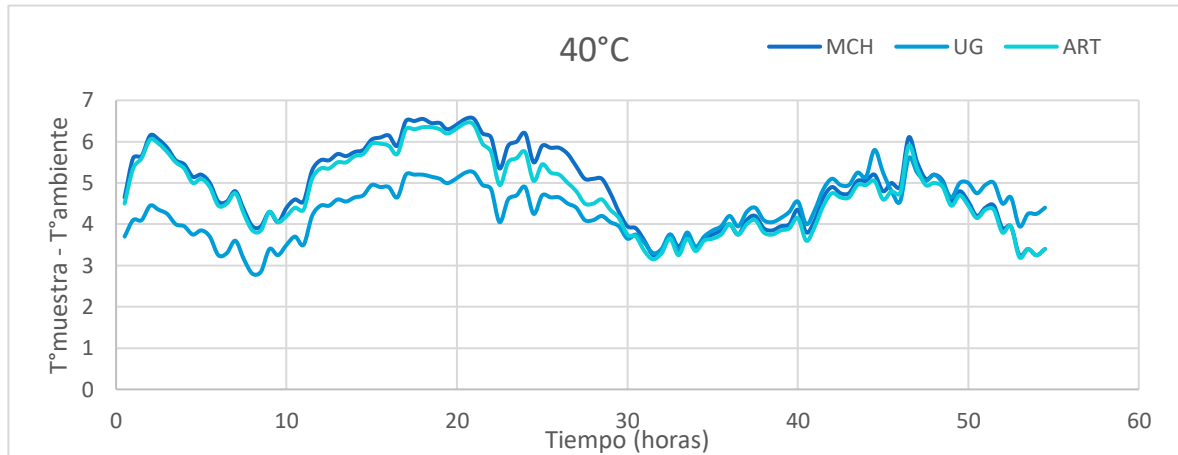


Fuente: Propia

Es de notar que las muestras retienen rápidamente la temperatura ambiente, alternando su curva normal de calor de hidratación. Para identificarlo más claramente, se realizó un diagrama entre la diferencia de la temperatura de la muestra y la temperatura ambiente en las tres condiciones de curado, obteniendo en la Figura 74 el incremento para las muestras curadas en el baño María a 40°, en la Figura 75 el incremento para los 30°, y en la

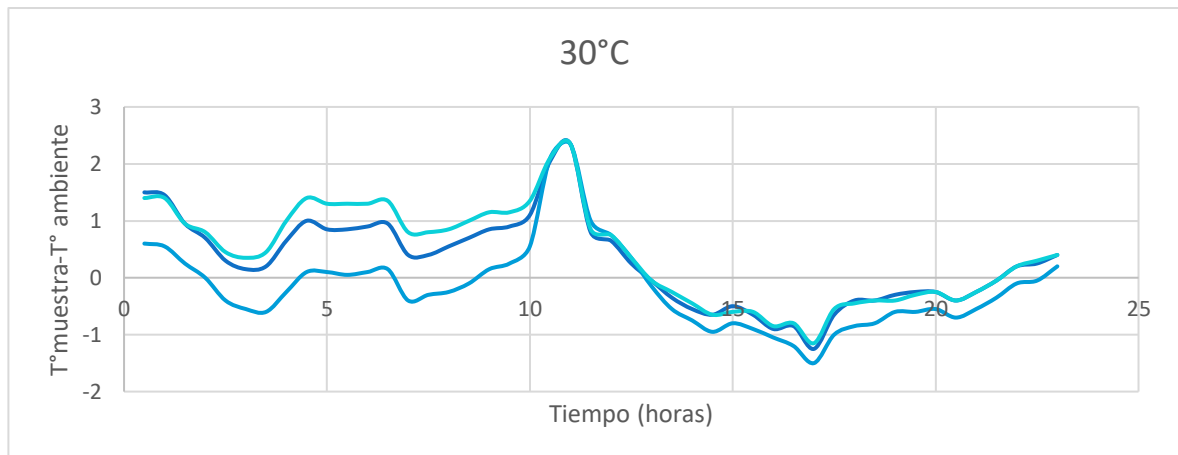
Figura 76 el incremento para los 11°C.

Figura 74. Incremento de temperatura de la muestra con respecto a la temperatura ambiente en el tiempo a 40°C de curado



Fuente: propia

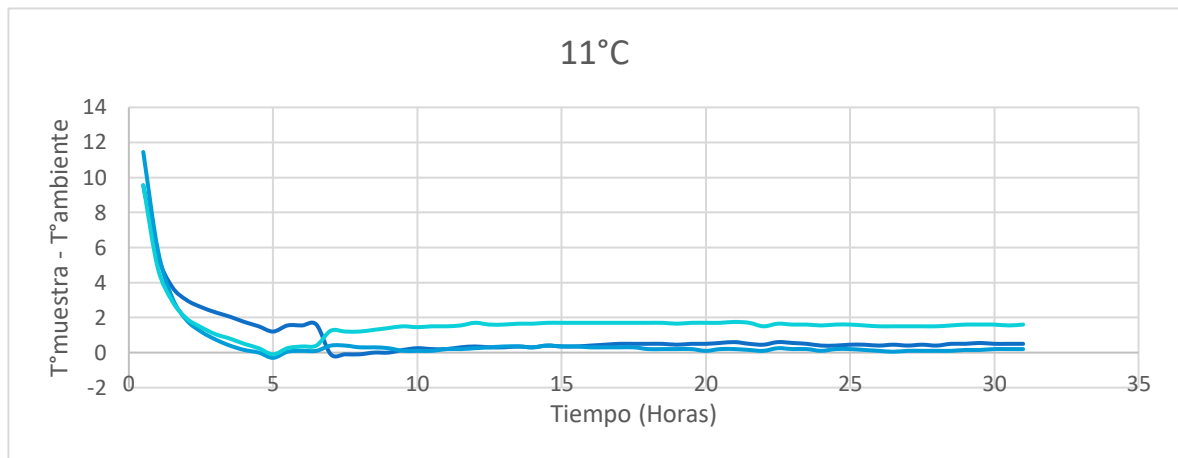
Figura 75 Incremento de temperatura de la muestra con respecto a la temperatura ambiente en el tiempo a 30°C de curado



Fuente: propia

Figura 76. Incremento de temperatura de la muestra con respecto a la temperatura ambiente en el

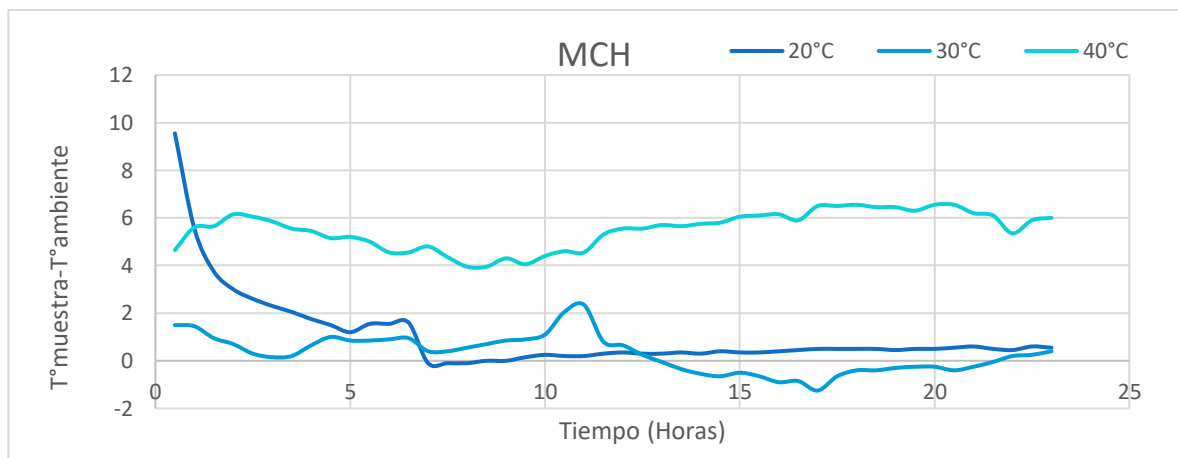
tiempo a 11°C de curado

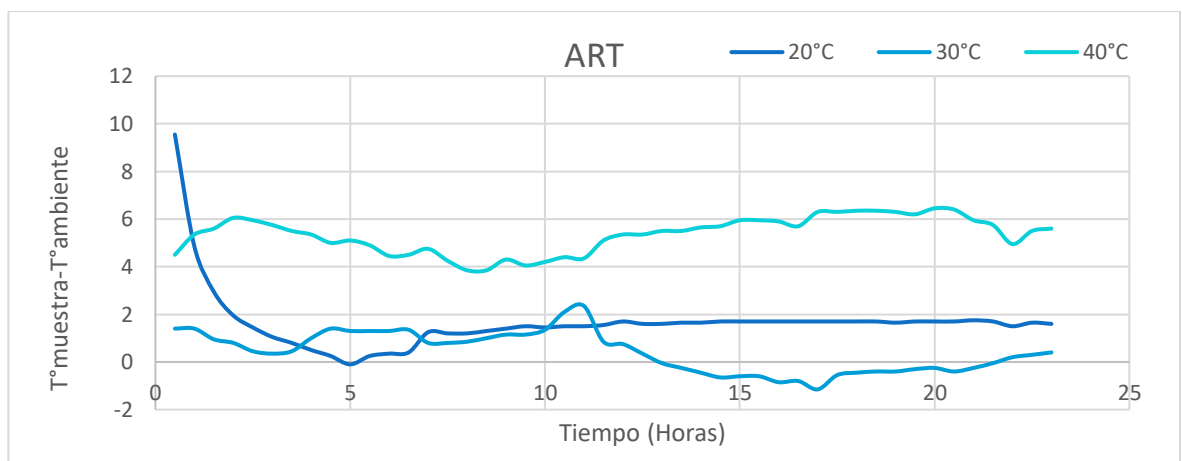
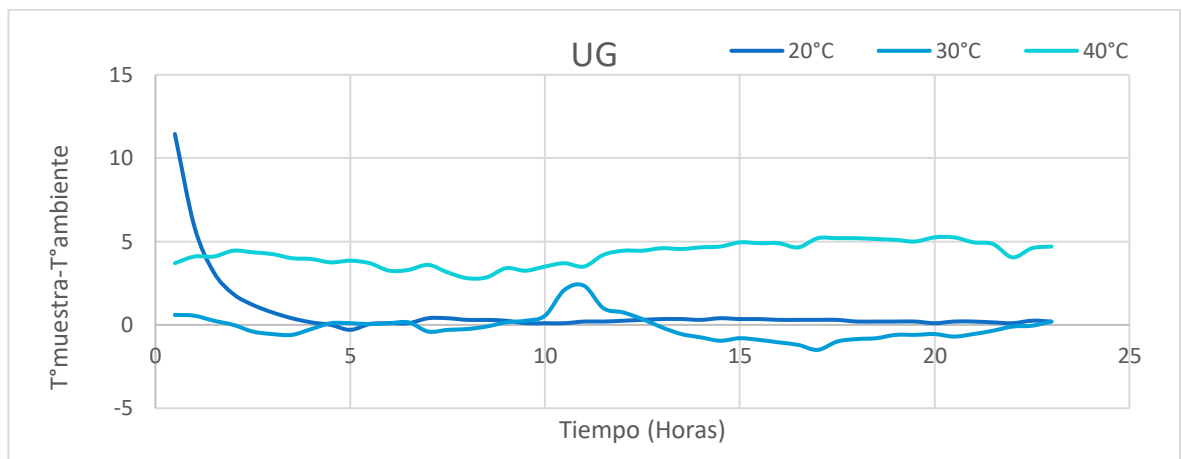


Fuente: propia

Tal como se muestra, cada tipo de cemento tiene una capacidad de incrementar su temperatura con respecto a la temperatura ambiente, de manera que las curvas de hidratación se ven alteradas de acuerdo a su temperatura de curado. Es de notar en la Figura 77 que solo en la temperatura ambiente, las muestra logran bajar su temperatura interna después de su fraguado final, mientras que en las otras dos condiciones de curado la temperatura está siempre por encima de la temperatura ambiente.

Figura 77. Diagramas que relacionan el incremento de temperatura de las muestras con la temperatura de curado para los tres diseños de mezclas: MCH, UG y ART





Fuente: propia

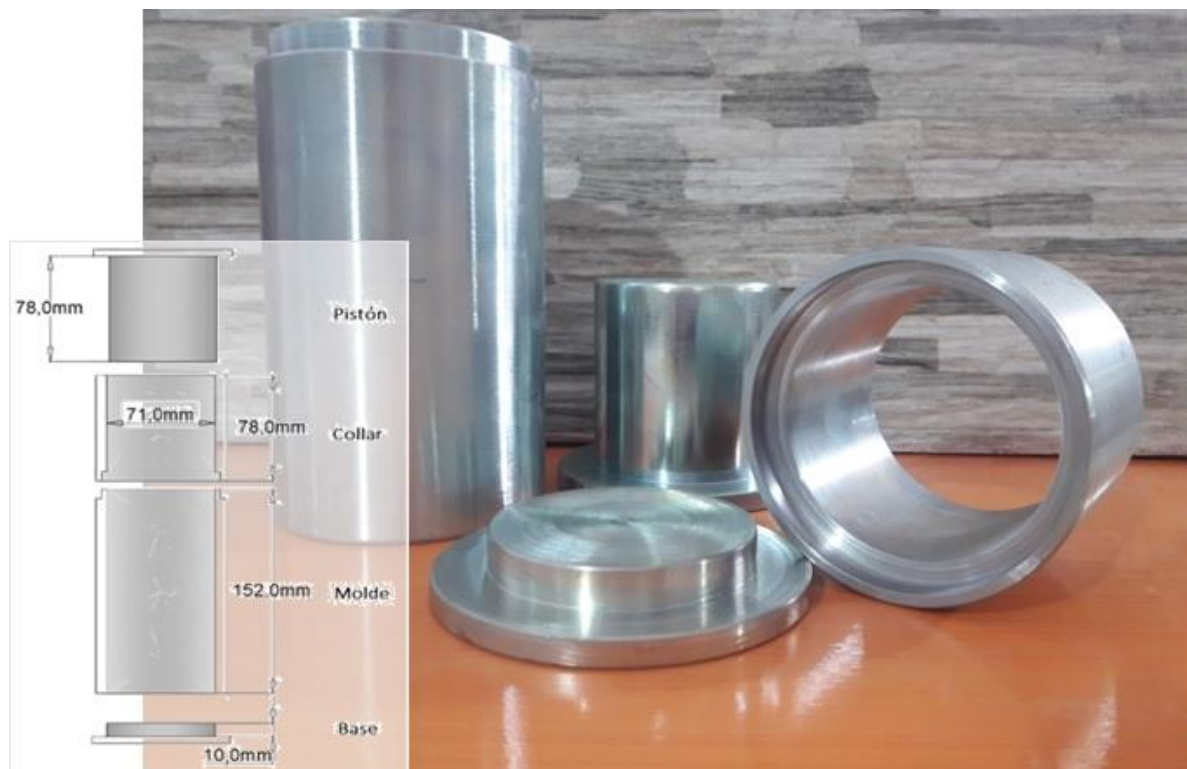
10. MADUREZ DEL SUELO CEMENTO

Tal como se mencionó en el marco teórico “La madurez de un concreto hidráulico se entiende por la relación entre la resistencia mecánica con la edad y el desarrollo de la temperatura”. Para identificar los diagramas de madurez, fue necesario elaborar muestras cilíndricas de 71 mm de diámetro y 142 mm de altura, para curarlas en las mismas condiciones de temperatura que los cubos empleados en el cálculo de la Energía de Activación y la Temperatura de Referencia.

Y con el fin de obtener una textura homogénea, y los resultados sean coherentes con la información obtenida hasta ahora, el proceso de compactación se replicó tal como se desarrolló en las pruebas de densidad, durabilidad y madurez, pero ahora con las nuevas dimensiones.

En ese orden, fue necesario fabricar un molde en acero maquinado con las siguientes dimensiones:

Figura 78. Detalle del molde metálico de 71 mm de diámetro



Fuente: Propia

El proceso de compactación, similar a los demás ensayos realizados se estandarizó con una carga de compactación cercana a los 17 MPa, por lo que se validó con 26 kN, tal como se muestra en la figura:

Figura 79. Proceso de compactación de las muestras de suelo cemento



Fuente: propia

Luego de compactar la muestra, se saca la muestra del molde con ayuda de un extractor vertical, y se someten al curado según corresponda su temperatura.

Al cabo de los 7 días las muestras de suelo cemento elaboradas con los diseños de mezclas establecidos para cada tipo de cemento, se realiza la prueba de compresión, registrando de igual manera la temperatura interna de las muestras

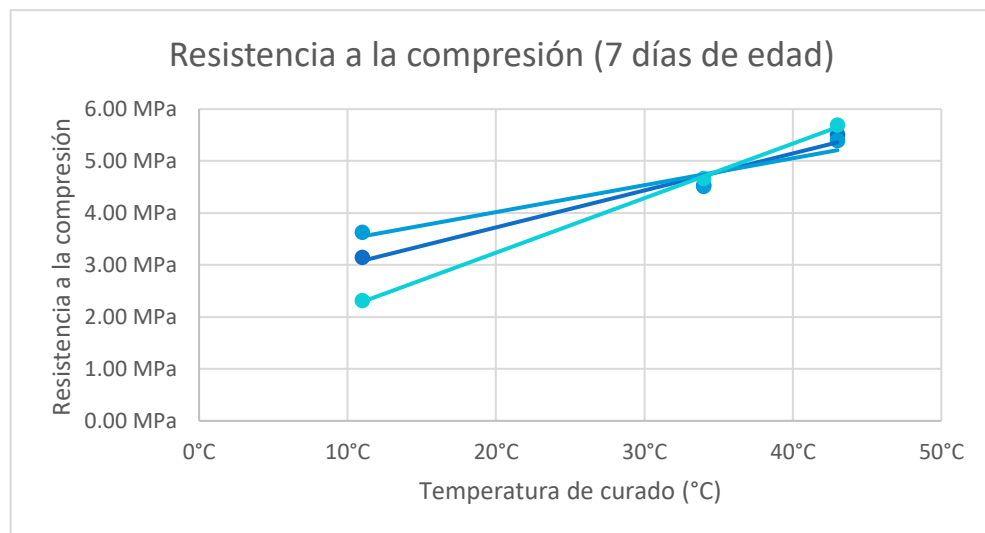
antes de ser sacadas del cuarto húmedo (Ver anexo J). Los resultados se muestran en la Figura 81.

Figura 80. Compresión de muestras cilíndricas de suelo cemento



Fuente: Propia

Figura 81. Resultados de las pruebas

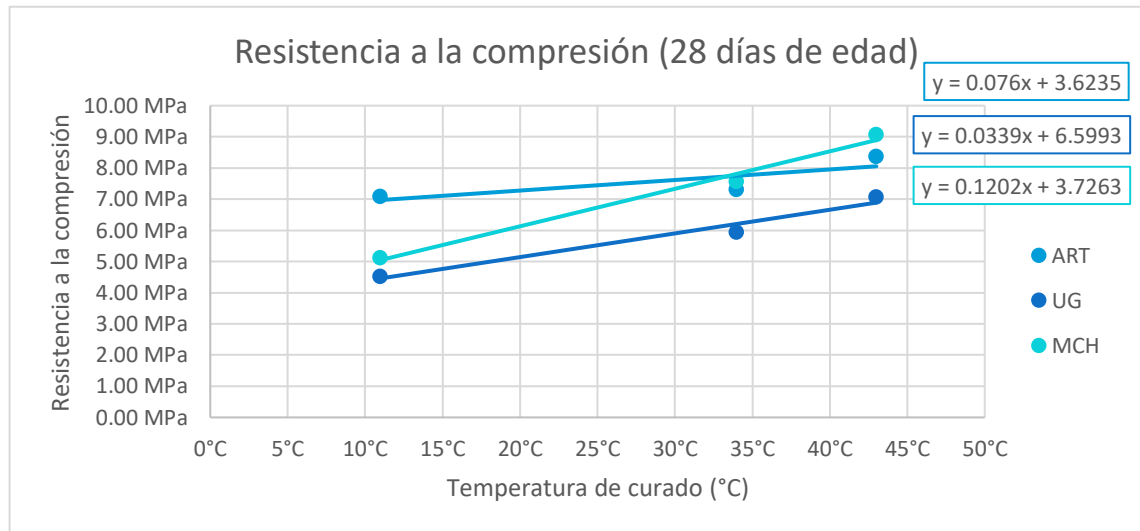


Fuente: propia

Luego de 28 días, se fallan las siguientes muestras a compresión registrando los

datos adjuntos en el anexo J. Es de aclarar, que cada punto cada diagrama, tanto el de la Figura 81, como el de la Figura 82, se elabora con el promedio de tres cilindros fallados a compresión.

Figura 82. Resultados de la compresión de cilindros de suelo cemento en función de su temperatura interna



Fuente: propia

Una vez falladas las muestras, se revisa una fracción en sentido longitudinal para observar la distribución granulométrica. El método diseñado para esta investigación, a diferencia de los métodos definidos por la normatividad INVIAS, permite que la muestra presente homogeneidad en toda su sección, como se muestra en la Figura 83. Mientras que los métodos normalizados de compactación por capas hacen que se presenten unas franjas de finos en cada junta, haciendo desapareja su gradación a lo largo del cilindro.

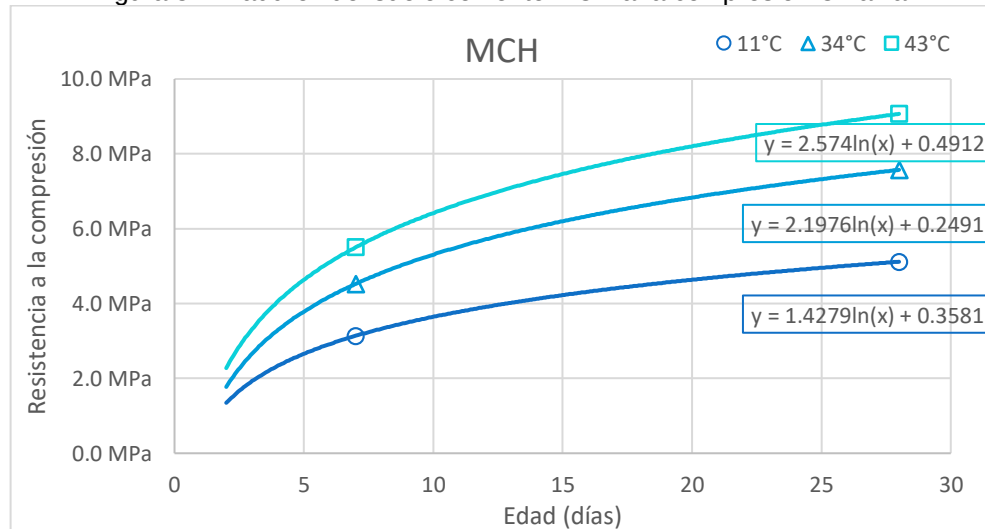
Figura 83. Tipo de falla de las muestras sometidas a carga de compresión confinada



Fuente: propia.

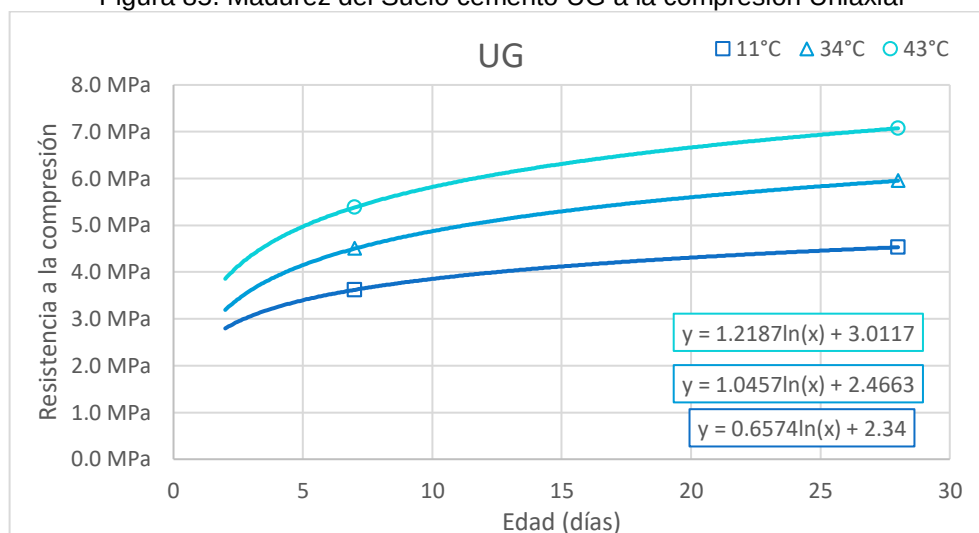
Una vez, se confirma si las muestras están bien tomadas, se analizan los resultados de manera que se visualice la madurez del suelo a través de diagramas que confronten la resistencia a la compresión uniaxial en función de la edad de las muestras obteniendo los siguientes resultados:

Figura 84. Madurez del suelo cemento MCH a la compresión Uniaxial



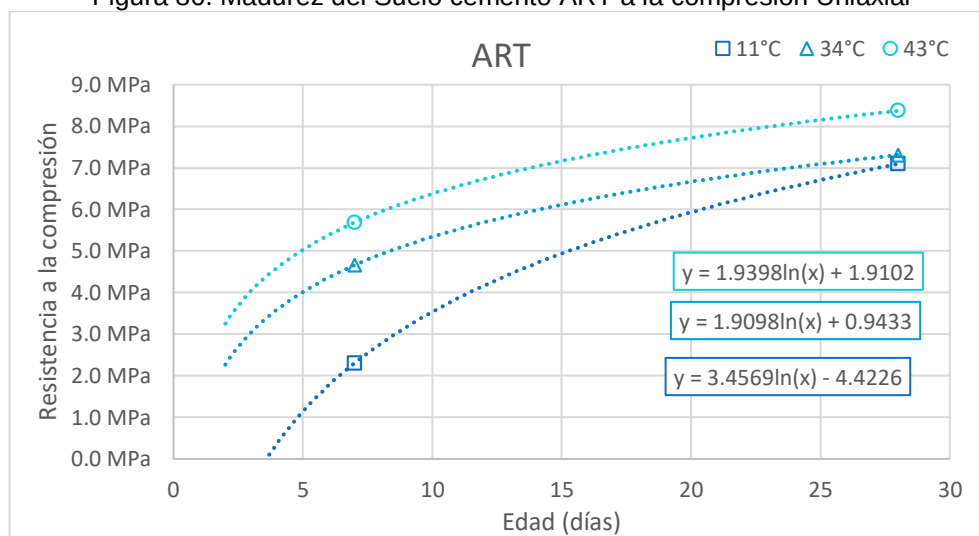
Fuente: propia

Figura 85. Madurez del Suelo cemento UG a la compresión Uniaxial



Fuente: propia

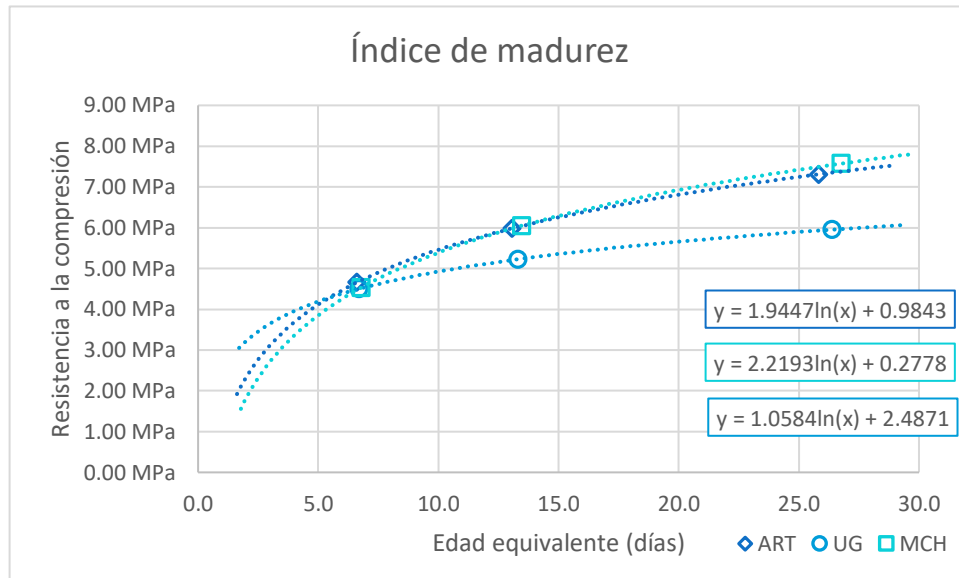
Figura 86. Madurez del Suelo cemento ART a la compresión Uniaxial



Fuente: propia

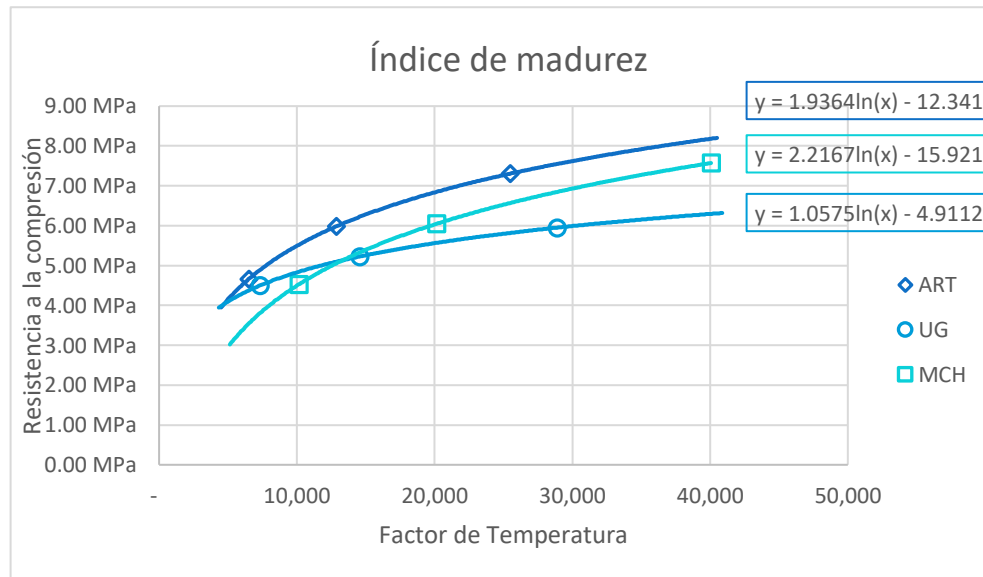
Desarrollando el procedimiento del cálculo de la edad equivalente y el factor de temperatura – tiempo, con el monitoreo de las temperaturas internas de las muestras conforme a la NTC 3756 (ver anexo K), se elabora el diagrama de Índice de madurez en las dos funciones, de los tres tipos de Suelo Cemento curados a 30°C tal como se muestran en la Figura 87 y en la Figura 88.

Figura 87. Índice de Madurez en relación con la edad equivalente



Fuente: propia

Figura 88. Índice de madurez en relación con el Factor temperatura - tiempo



Fuente: propia

Para dar claridad con los valores usados en los diagramas, se ha desarrollado la xx que relaciona la información tomada del Anexo K.

Tabla 30. Consolidado de los factores de madurez, edad equivalente y la resistencia a la compresión

Tipo de cemento	Temperatura	Edad	Resistencia	Edad equivalente	Factor de madurez
ART	28.1	7	4.66 MPa	6.6	6,499
	28.0	14	5.98 MPa	13.1	12,880
	28.1	28	7.31 MPa	25.8	25,507
UG	30.8	7	4.50 MPa	6.7	7,334
	29.0	14	5.23 MPa	13.3	14,563
	27.6	28	5.95 MPa	26.4	28,886
MCH	28.1	7	4.53 MPa	6.8	10,137
	28.0	14	6.05 MPa	13.5	20,159
	26.0	28	7.57 MPa	26.8	40,069

Fuente: propia

Con las regresiones lineales (ecuación de la curva) de las figuras anteriores, es posible predecir la resistencia a la compresión de un suelo cemento en campo, a través de equipos portátiles que calculan el factor de temperatura a través de monitoreos desde el momento de su instalación en la obra, tal como se realiza en construcciones verticales y horizontales de los concretos hidráulicos. No obstante, es necesario hacer la correlación con pruebas que realmente midan el desempeño de los pavimentos, para estimar realmente su resistencia a la carga que va a ser aplicada en su vida de servicio.

Es por esto, que esta investigación desarrolla pruebas de módulos resilientes a los 28 días de edad, cuando se estima que las muestras han alcanzado su mayor etapa de maduración, de las muestras curadas en las mismas tres condiciones de curado, a 11°C, 30°C y 40°C.

11. CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE Y LA TEMPERATURA POR EL MÉTODO DE LA MADUREZ

11.1 MEDICIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE LOS TRES DISEÑOS DE MEZCLAS

Antes de elegir el método de valoración del módulo resiliente del suelo cemento, es de aclarar que no existe normatividad para validarlo. Por lo que, se ajusta el procedimiento de la norma INV E-156, para esta investigación.

La muestra según la gradación y el índice de plasticidad corresponde a un suelo Tipo 2, clasificado como materiales bases y sub bases, no obstante, el tamaño máximo según la granulometría expuesta en la sección 8.1 de este documento, es de 9.5mm, que al multiplicarlo por el factor 5.0, el tamaño de la muestra debe ser mayor a 47.5mm. (ver sección 6.4, pág. 57) Por lo que, las muestras elaboradas para esta prueba fueron tomadas desde un molde en acero maquinado de 2 pulgadas de diámetro, cuya medida interna corresponde a 51 mm.

Figura 89. Molde de acero maquinado para elaborar las muestras para Módulo resiliente



Fuente: propia

Del mismo modo, para la muestra Tipo 2 la norma INV-156 determina las cargas de compresión axial, confinamiento y la amplitud de la carga dinámica de acuerdo al tipo de suelo, que para este caso se aplicaron usando la máquina Triaxial cíclica. Es necesario aclarar que los reportes están registrados para nueve muestras referenciadas de la siguiente manera:

Tabla 31. Referenciación de las muestras cilíndricas para ser falladas en la máquina Triaxial cíclica.

Código	Cemento	Temperatura de curado (°C)	Fecha de Toma	Fecha de Rotura	Edad
13	MCH	11	30-jun	28-jul	28
14	MCH	30	30-jun	28-jul	28
15	MCH	40	30-jun	28-jul	28
16	MCH	T	30-jun	28-jul	28
17	UG	11	30-jun	28-jul	28
18	UG	30	30-jun	28-jul	28
19	UG	40	30-jun	28-jul	28
20	UG	T	30-jun	28-jul	28
21	ART	11	30-jun	28-jul	28
22	ART	30	30-jun	28-jul	28
23	ART	40	30-jun	28-jul	28
24	ART	T	30-jun	28-jul	28

Fuente: propia.

Los resultados de las pruebas se adjuntan como Anexo M y a continuación, se muestran el resumen de las pruebas con su respectivo módulo resiliente promedio.

Figura 90. Reporte para la prueba de módulo resiliente de la Muestra 13, MCH-20°C

Invariante de esfuerzos σ	Esfuerzo de Desviación Nominal σ_d	Presión de Cámara	Deformación Recuperada Promedio	ϵ_r promedio	σ_d Aplicado Promedio	Módulo Resiliente σ_d / ϵ_r
(kPa)	(kPa)	(kPa)	mm	mm/mm	(kPa)	(MPa)
413.7	103.4	103.4	0.039	0.00040	103.47	260.8
79.2	20.7	20.7	0.018	0.00018	17.05	96.5
106.7	41.4	20.7	0.030	0.00031	44.65	145.6
125.0	62.1	20.7	0.039	0.00039	62.91	162.1
140.5	34.5	34.5	0.025	0.00025	36.96	145.7
171.2	68.9	34.5	0.040	0.00040	67.75	167.9
205.8	103.4	34.5	0.052	0.00052	102.30	197.2
278.3	68.9	68.9	0.035	0.00035	71.64	205.1
341.5	137.9	68.9	0.055	0.00055	134.77	243.5
406.3	206.8	68.9	0.075	0.00075	199.59	265.9
383.4	68.9	103.4	0.031	0.00032	73.17	232.2
412.4	103.4	103.4	0.040	0.00040	102.23	254.7

507.0	206.8	103.4	0.065	0.00066	196.83	299.6
518.3	103.4	137.9	0.037	0.00038	104.57	277.6
546.0	137.9	137.9	0.045	0.00045	132.32	293.6
673.6	275.8	137.9	0.077	0.00077	259.91	335.9

Fuente: propia, con información validada en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana.

En la Figura 91 se muestra la el montaje de la muestra en la cámara Triaxial de la Universidad Pontificia Javeriana de Bogotá.

Figura 91. Montaje la muestra en el equipo Triaxial cíclico



Fuente: propia

Tabla 32. Reporte para la prueba de módulo resiliente de la Muestra 15, MCH-40°C

Invariante de esfuerzos σ (kPa)	Esfuerzo de Desviación Nominal σ_d (kPa)	Presión de Cámara (kPa)	Deformación Recuperada Promedio (mm)	ϵ_r promedio (mm/mm)	σ_d Aplicado Promedio (kPa)	Módulo Resiliente σ_d / ϵ_r (MPa)
419.7	103.4	103.4	0.053	0.00052	109.51	221.2
78.4	20.7	20.7	0.016	0.00015	16.25	105.6
109.8	41.4	20.7	0.028	0.00028	47.71	170.6
128.3	62.1	20.7	0.037	0.00036	66.20	183.8
142.3	34.5	34.5	0.024	0.00024	38.78	162.3
177.1	68.9	34.5	0.038	0.00038	73.64	195.7
209.6	103.4	34.5	0.050	0.00049	106.08	214.9
281.1	68.9	68.9	0.036	0.00035	74.41	212.4
349.9	137.9	68.9	0.060	0.00059	143.23	242.5
411.7	206.8	68.9	0.085	0.00084	205.03	244.9
384.6	68.9	103.4	0.034	0.00034	74.40	219.9
418.2	103.4	103.4	0.046	0.00045	107.99	240.1
512.7	206.8	103.4	0.077	0.00076	202.50	266.5
523.8	103.4	137.9	0.045	0.00044	110.06	249.1
560.2	137.9	137.9	0.056	0.00055	146.52	264.7
678.8	275.8	137.9	0.100	0.00099	265.05	271.2

Fuente: propia, con información validada en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana.

A continuación, en la Figura 92 se observa la falla de la muestra con la carga Triaxial.

Figura 92. Falla transversal de la muestra sometida a cargas cíclicas y esfuerzo Triaxial.



Fuente: propia

No obstante, debido a la magnitud de la resistencia de las muestras obtenida a los 28 días, la celda de carga de la cámara Triaxial, muchas muestras se quedaron sin registrar los valores máximos. Ya que el esfuerzo sobre pasaba su rango de carga, por lo cual, en este ejercicio solo se toma como valor importante el módulo resiliente.

Figura 93. Registro de temperatura interna de las muestras de Suelo Cemento falladas en el Triaxial cíclico



Fuente: propia

De igual manera, para las muestras elaboradas con cemento UG, se registró los siguientes resultados para dos condiciones de curado:

Tabla 33. Reporte para la prueba de módulo resiliente de la Muestra 15, UG Curadas a 11°C

Invariante de esfuerzos σ	Esfuerzo de Desviación Nominal σ_d	Presión de Cámara	Deformación Recuperada Promedio	ϵ_r promedio	σ_d Aplicado Promedio	Módulo Resiliente σ_d / ϵ_r
(kPa)	(kPa)	(kPa)	mm	mm/mm	(kPa)	(MPa)
413.8	103.4	103.4	0.042	0.00042	103.58	250.6
78.6	20.7	20.7	0.016	0.00016	16.51	103.9
109.8	41.4	20.7	0.030	0.00031	47.66	156.2
126.4	62.1	20.7	0.037	0.00037	64.27	171.8
139.7	34.5	34.5	0.024	0.00024	36.23	149.2
175.1	68.9	34.5	0.038	0.00039	71.65	185.5
204.8	103.4	34.5	0.048	0.00049	101.31	205.2
280.2	68.9	68.9	0.034	0.00035	73.52	209.6
339.9	137.9	68.9	0.052	0.00053	133.17	249.4
409.8	206.8	68.9	0.074	0.00075	203.08	270.7

387.3	68.9	103.4	0.033	0.00033	77.09	231.6
416.5	103.4	103.4	0.040	0.00041	106.27	261.6
509.5	206.8	103.4	0.065	0.00066	199.28	301.1
519.7	103.4	137.9	0.037	0.00037	105.98	283.7
545.6	137.9	137.9	0.043	0.00044	131.93	298.0
677.3	275.8	137.9	0.076	0.00077	263.59	343.1

Fuente: propia, con información validada en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana.

Tabla 34. Reporte para la prueba de módulo resiliente de la Muestra 17, UG Curadas a 40°C

Invariante de esfuerzos σ	Esfuerzo de Desviación Nominal σ_d	Presión de Cámara	Deformación Recuperada Promedio	ϵ_r promedio	σ_d Aplicado Promedio	Módulo Resiliente σ_d / ϵ_r
(kPa)	(kPa)	(kPa)	mm	mm/mm	(kPa)	(MPa)
413.8	103.4	103.4	0.042	0.00042	103.58	250.6
78.6	20.7	20.7	0.016	0.00016	16.51	103.9
109.8	41.4	20.7	0.030	0.00031	47.66	156.2
126.4	62.1	20.7	0.037	0.00037	64.27	171.8
139.7	34.5	34.5	0.024	0.00024	36.23	149.2
175.1	68.9	34.5	0.038	0.00039	71.65	185.5
204.8	103.4	34.5	0.048	0.00049	101.31	205.2
280.2	68.9	68.9	0.034	0.00035	73.52	209.6
339.9	137.9	68.9	0.052	0.00053	133.17	249.4
409.8	206.8	68.9	0.074	0.00075	203.08	270.7
387.3	68.9	103.4	0.033	0.00033	77.09	231.6
416.5	103.4	103.4	0.040	0.00041	106.27	261.6
509.5	206.8	103.4	0.065	0.00066	199.28	301.1
519.7	103.4	137.9	0.037	0.00037	105.98	283.7
545.6	137.9	137.9	0.043	0.00044	131.93	298.0
677.3	275.8	137.9	0.076	0.00077	263.59	343.1

Fuente: propia, con información validada en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana.

Y, por último, para las muestras elaboradas con cemento ART curadas en tres condiciones de curado, registraron los siguientes datos:

Tabla 35. Reporte para la prueba de módulo resiliente de las muestras elaboradas con cemento MCH

MCH 11°C		MCH 30°C		MCH 40°C	
Invariante de esfuerzos θ	Módulo Resiliente σ_d / ϵ_r	Invariante de esfuerzos θ	Módulo Resiliente σ_d / ϵ_r	Invariante de esfuerzos θ	Módulo Resiliente σ_d / ϵ_r
413.7 KPa	260.8 MPa	421.3 KPa	154.2 MPa	419.7 KPa	221.2 MPa
79.2 KPa	96.5 MPa	72.9 KPa	43.4 MPa	78.4 KPa	105.6 MPa
106.7 KPa	145.6 MPa	109.1 KPa	121.1 MPa	109.8 KPa	170.6 MPa
125.0 KPa	162.1 MPa	126.2 KPa	128.1 MPa	128.3 KPa	183.8 MPa

140.5 KPa	145.7 MPa	139.7 KPa	105.6 MPa	142.3 KPa	162.3 MPa
171.2 KPa	167.9 MPa	175.0 KPa	132.4 MPa	177.1 KPa	195.7 MPa
205.8 KPa	197.2 MPa	211.4 KPa	146.0 MPa	209.6 KPa	214.9 MPa
278.3 KPa	205.1 MPa	279.0 KPa	139.2 MPa	281.1 KPa	212.4 MPa
341.5 KPa	243.5 MPa	347.9 KPa	157.6 MPa	349.9 KPa	242.5 MPa
406.3 KPa	265.9 MPa	405.3 KPa	166.6 MPa	411.7 KPa	244.9 MPa
383.4 KPa	232.2 MPa	383.9 KPa	144.4 MPa	384.6 KPa	219.9 MPa
412.4 KPa	254.7 MPa	420.1 KPa	154.4 MPa	418.2 KPa	240.1 MPa
507.0 KPa	299.6 MPa	513.0 KPa	174.0 MPa	512.7 KPa	266.5 MPa
518.3 KPa	277.6 MPa	523.6 KPa	160.3 MPa	523.8 KPa	249.1 MPa
546.0 KPa	293.6 MPa	554.9 KPa	166.8 MPa	560.2 KPa	264.7 MPa
673.6 KPa	335.9 MPa	684.0 KPa	189.5 MPa	678.8 KPa	271.2 MPa

Fuente: propia, con información validada en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana.

Tabla 36. . Reporte para la prueba de módulo resiliente de las muestras elaboradas con cemento UG

UG 11°C		UG 30°C		UG 40°C	
Invariante de esfuerzos θ	Módulo Resiliente $\sigma d / \varepsilon r$	Invariante de esfuerzos θ	Módulo Resiliente $\sigma d / \varepsilon r$	Invariante de esfuerzos θ	Módulo Resiliente $\sigma d / \varepsilon r$
413.8 KPa	250.6 MPa	416.4 KPa	137.5 MPa	421.5 KPa	151.8 MPa
78.6 KPa	103.9 MPa	78.5 KPa	102.7 MPa	84.8 KPa	90.2 MPa
109.8 KPa	156.2 MPa	107.6 KPa	113.6 MPa	109.2 KPa	119.2 MPa
126.4 KPa	171.8 MPa	125.1 KPa	117.9 MPa	126.4 KPa	126.4 MPa
139.7 KPa	149.2 MPa	141.2 KPa	107.8 MPa	143.2 KPa	113.7 MPa
175.1 KPa	185.5 MPa	174.2 KPa	124.7 MPa	176.4 KPa	132.5 MPa
204.8 KPa	205.2 MPa	208.6 KPa	136.2 MPa	211.6 KPa	143.8 MPa
280.2 KPa	209.6 MPa	278.1 KPa	130.2 MPa	279.1 KPa	137.1 MPa
339.9 KPa	249.4 MPa	343.1 KPa	144.6 MPa	348.2 KPa	155.2 MPa
409.8 KPa	270.7 MPa	406.2 KPa	149.7 MPa	405.7 KPa	164.0 MPa
387.3 KPa	231.6 MPa	382.3 KPa	135.4 MPa	384.0 KPa	142.2 MPa
416.5 KPa	261.6 MPa	417.0 KPa	143.9 MPa	420.3 KPa	152.0 MPa
509.5 KPa	301.1 MPa	507.7 KPa	158.0 MPa	513.4 KPa	171.3 MPa
519.7 KPa	283.7 MPa	519.6 KPa	147.6 MPa	523.8 KPa	157.8 MPa
545.6 KPa	298.0 MPa	553.9 KPa	153.0 MPa	555.1 KPa	164.2 MPa
677.3 KPa	343.1 MPa	678.9 KPa	165.7 MPa	684.5 KPa	186.5 MPa

Fuente: propia, con información validada en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana.

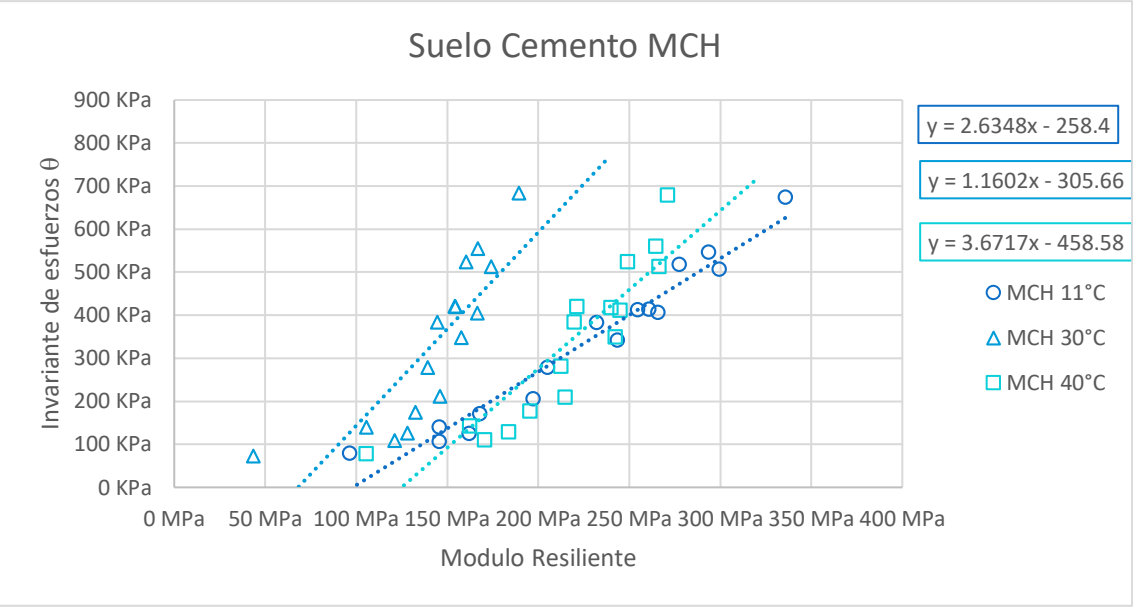
Tabla 37. Reporte para la prueba de módulo resiliente de las muestras elaboradas con cemento ART

ART 11°C		ART 30°C		ART 40°C	
Invariante de esfuerzos θ	Módulo Resiliente σ_d / ε_r	Invariante de esfuerzos θ	Módulo Resiliente σ_d / ε_r	Invariante de esfuerzos θ	Módulo Resiliente σ_d / ε_r
417.2 KPa	220.8 MPa	418.0 KPa	180.4 MPa	421.497929	151.8 MPa
75.4 KPa	71.9 MPa	72.4 KPa	58.3 MPa	80.6561533	73.7 MPa
108.4 KPa	143.0 MPa	108.7 KPa	122.5 MPa	109.20034	119.2 MPa
127.7 KPa	163.6 MPa	127.8 KPa	139.3 MPa	126.433832	126.4 MPa
141.9 KPa	135.1 MPa	140.8 KPa	123.0 MPa	143.179818	113.7 MPa
176.6 KPa	167.4 MPa	175.6 KPa	141.5 MPa	176.363038	132.5 MPa
208.9 KPa	196.2 MPa	210.9 KPa	158.9 MPa	211.6275	143.8 MPa
281.5 KPa	195.4 MPa	279.2 KPa	149.5 MPa	279.105921	137.1 MPa
346.1 KPa	229.5 MPa	350.3 KPa	182.2 MPa	348.224632	155.2 MPa
412.5 KPa	265.4 MPa	412.7 KPa	191.7 MPa	405.653345	164.0 MPa
386.8 KPa	230.9 MPa	384.5 KPa	160.4 MPa	384.016088	142.2 MPa
416.0 KPa	247.6 MPa	418.2 KPa	176.0 MPa	420.291976	152.0 MPa
510.9 KPa	297.8 MPa	516.8 KPa	207.7 MPa	513.422754	171.3 MPa
524.5 KPa	283.4 MPa	526.2 KPa	187.3 MPa	523.830843	157.8 MPa
549.1 KPa	298.8 MPa	561.9 KPa	201.2 MPa	555.127302	164.2 MPa
680.6 KPa	330.2 MPa	684.1 KPa	219.3 MPa	684.524157	186.5 MPa

Fuente: propia, con información validada en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana.

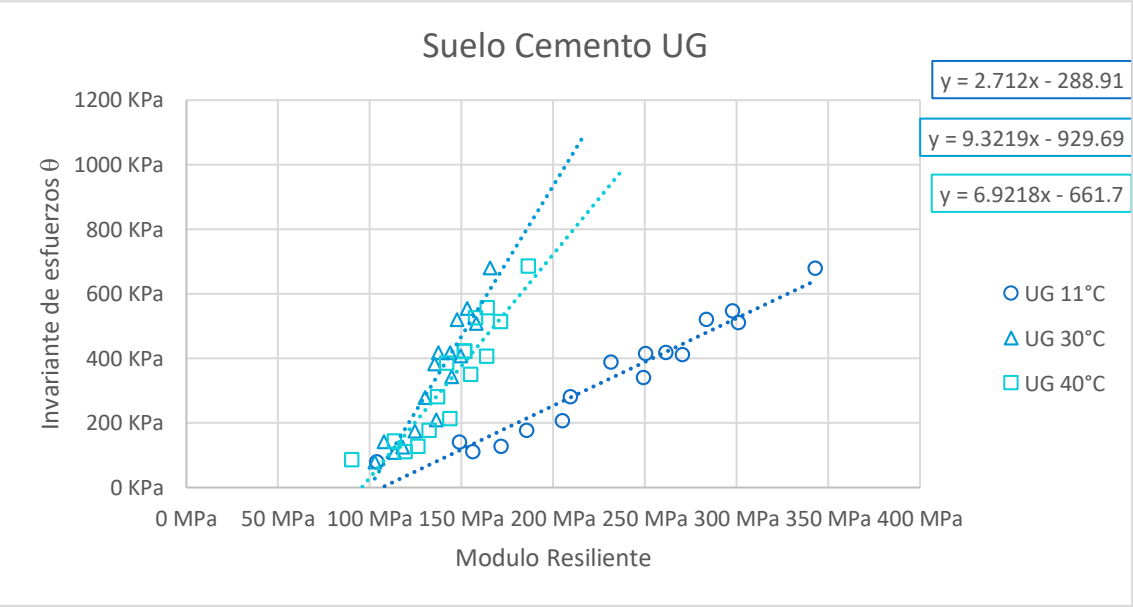
Aplicando el método gráfico, se correlaciona el Modulo resiliente registrado para cada una de las Invariantes de Esfuerzo θ , de manera que la curva que más se acerque a los puntos enmarque una ecuación de regresión lineal que permita calcular el módulo resiliente de las nueve muestras, para un esfuerzo θ igual a 450 KPa equivalente al diseño teórico de la mezcla. De manera que, de la Figura 94, se pueden obtener las ecuaciones lineales de la tendencia de los módulos resilientes para las muestras de suelo cemento elaboradas con cemento MCH, mientras que de la Figura 95, las ecuaciones para los las muestras elaboradas con cemento UG, y en la Figura 96, se obtienen las elaboradas con cemento ART.

Figura 94. Módulo resiliente del Suelo cemento elaborado con cemento MCH, curado en diferentes temperaturas.



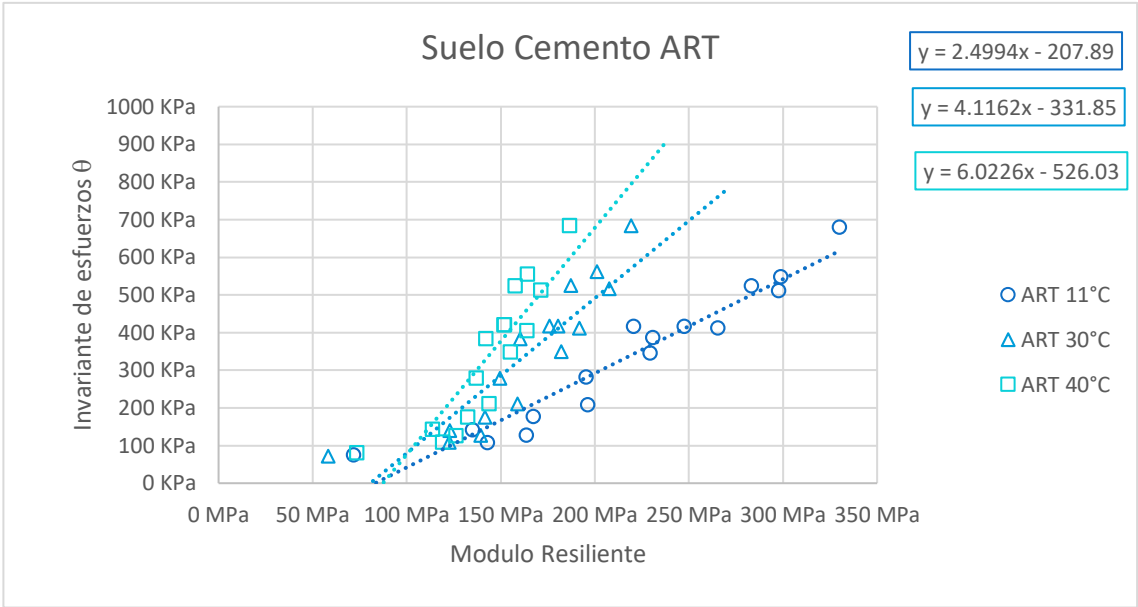
Fuente: propia.

Figura 95. Módulo resiliente del Suelo cemento elaborado con cemento UG, curado en diferentes temperaturas.



Fuente: propia.

Figura 96. Módulo resiliente del Suelo cemento elaborado con cemento ART, curado en diferentes temperaturas.



Fuente: propia.

De esta manera, aplicando cada una de las ecuaciones suministradas por los diagramas de correlación, se realiza el cálculo de los módulos resilientes a una invariante de esfuerzo θ igual a 450 KPa, como se muestra en la Tabla 38.

Tabla 38. Consolidado de resultados de Módulo Resiliente a 450 KPa.

Cemento	Temperatura de curado	Ecuación lineal	Mr (450 kPa)
MCH	11°C	$y=2.6348 x -258.4$	268.9 MPa
MCH	30°C	$y=1.12764 x -305.66$	258.2 MPa
MCH	40°C	$y=3.6717 x -458.58$	247.5 MPa
UG	11°C	$y=2.712 x -288.91$	272.5 MPa
UG	20°C	$y=9.3219 x -929.69$	148.0 MPa
UG	40°C	$y=6.9218 x -661.7$	160.6 MPa
ART	11°C	$y=2.4994 x -207.89$	263.2 MPa
ART	20°C	$y=4.1162 x -331.85$	189.9 MPa
ART	40°C	$y=6.0226 x -526.03$	162.1 MPa

Fuente: propia.

11.2 MODELO DE PREDICCIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE CON EL MONITOREO DE TEMPERATURAS Y LAS FUNCIONES DE MADUREZ

Con los resultados obtenidos durante el monitoreo de temperaturas y el cálculo del factor de madurez, se ha seleccionado como intervalo de tiempo donde las curvas de temperatura de las muestras de suelo cemento se alinean con la temperatura ambiente, las primeras 30 horas. Tiempo en el que se ha concluido la fase de fraguado del suelo cemento.

Para realizar la relación entre la temperatura, el factor de madurez y el módulo de resiliencia, se seleccionó la máxima temperatura registrada durante las primeras 30 horas, la mínima temperatura y los respectivos factores de temperatura máximos y mínimos calculados en ese mismo intervalo de tiempo, organizados de acuerdo al tipo de cemento en la Tabla 39.

Tabla 39. Consolidado de resultados obtenidos en un período inicial de 30 horas y el Módulo Resiliente a los 28 días.

Tipo SC	Mr (450KPa)	T máx.	T mín.	Factor de temperatura Máximo	Factor de Edad Máximo
MCH-40	247.45	50.2	42.1	41.10	1.6569
MCH-30	258.16	32.9	22.8	32.48	1.2294
MCH-11	268.86	22.9	10.2	36.13	1.4005
UG-40	160.61	48.4	46.8	31.91	1.8583
UG-30	148.01	32.2	26.9	23.81	1.2867
UG-11	272.46	25.2	10	27.81	1.5502
ART-40	162.06	50	47.1	30.19	2.4527
ART-30	189.94	33.2	26.9	21.79	1.4602
ART-11	263.22	27.4	11.8	25.29	1.8247

Fuente: propia.

En consecuencia, se calcula la diferencia de temperaturas registradas durante las primeras 30 horas, y la diferencia será denominadas como incremento de temperatura de fraguado ΔT , de manera que:

$$\Delta T = T_{\text{máx}}(30 \text{ hr}) - T_{\text{mín}}(30 \text{ hr})$$

Ecuación 9. Incremento de temperatura durante el fraguado del suelo cemento

Donde, $T_{\text{máx}}(30 \text{ hr})$, es la máxima temperatura registrada durante las primeras 30 horas luego de compactar la mezcla de suelo cemento, $T_{\text{mín}}(30 \text{ hr})$ es la mínima

temperatura registrada en el mismo intervalo.

Al cabo de relacionar los factores de madurez con el incremento de temperatura se establece una segunda ecuación definida como Factor de Madurez de Fraguado, calculada como:

$$FM_F = \Delta T \cdot FT_{m\acute{a}x}$$

Ecuación 10. Factor de madurez del fraguado del suelo cemento.

Donde ΔT es el incremento de temperatura durante el fraguado, calculado con la Ecuación 9 y $FT_{m\acute{a}x}$, es el factor de Temperatura máximo calculado con la Ecuación 1, para intervalos de 0.5 horas durante un período de 30 horas.

Así mismo, se establece una nueva función del incremento de temperatura con el factor de edad máximo, ajustada con la siguiente ecuación:

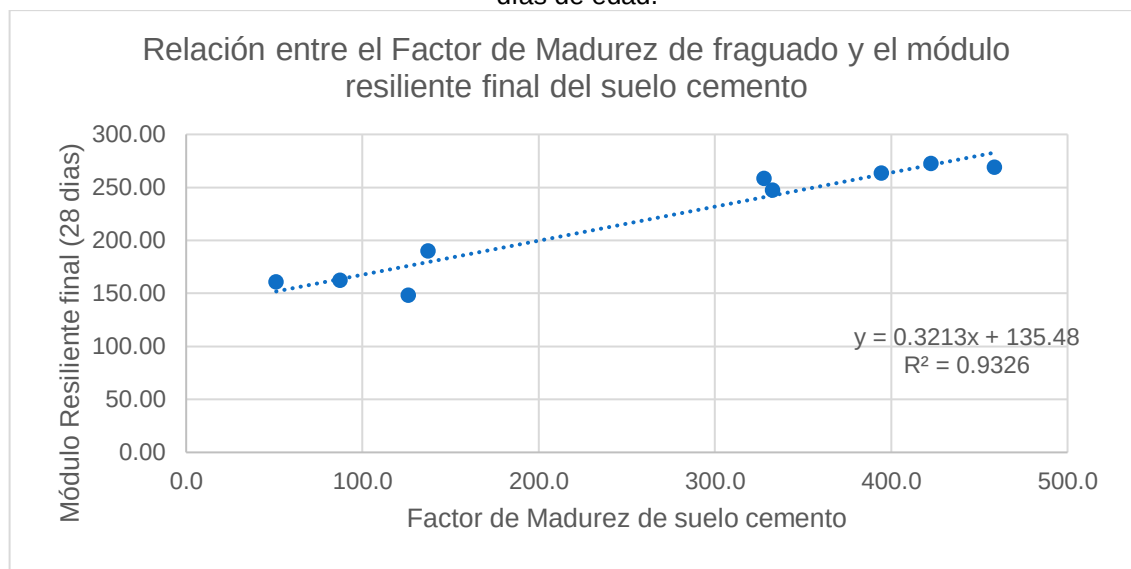
$$FE_F = \Delta T \cdot FE_{m\acute{a}x}$$

Ecuación 11. Factor de edad del fraguado del suelo cemento.

Donde $FE_{m\acute{a}x}$ corresponde al máximo factor calculado en intervalos de 0.5 horas, en un período de 30 horas, empleando la Ecuación 2 y ΔT al incremento de temperatura del fraguado.

Haciendo uso de las dos ecuaciones anteriores, se diagrama la relación entre el módulo resiliente en función del factor de madurez del fraguado, como se muestra en la Figura 97, luego se traza la línea de tendencia que más se acerca a los puntos, para luego encontrar la función lineal matemática que permita correlacionar el Módulo Resiliente con un factor calculado a edades tempranas.

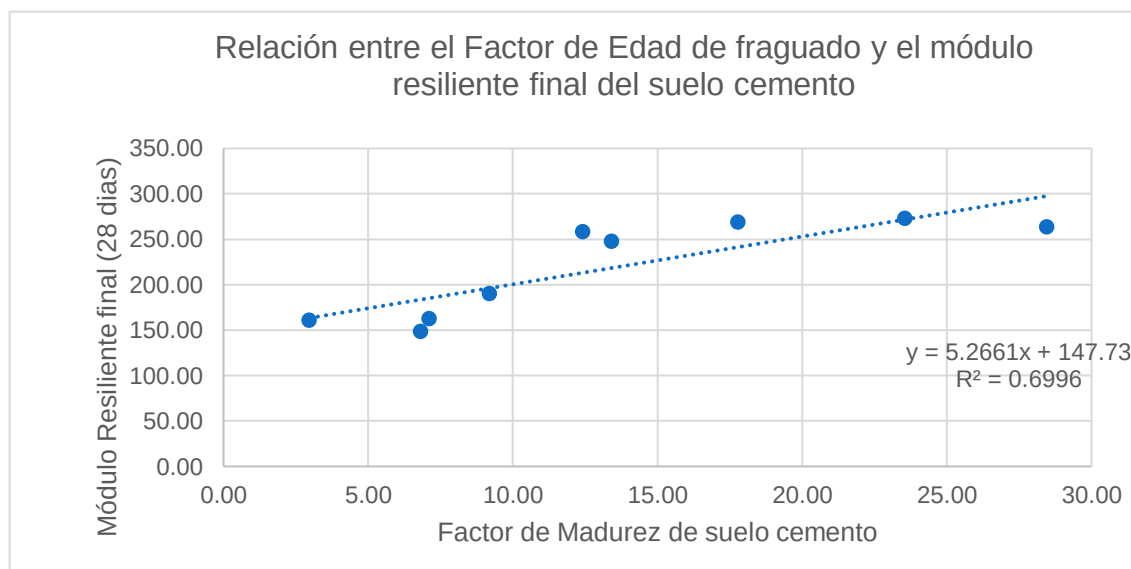
Figura 97. Relación entre el Factor de Madurez de fraguado y el módulo resiliente medido a los 28 días de edad.



Fuente: propia.

Así mismo, se muestra en la Figura 98 la función que relaciona el Módulo Resiliente en función del factor de edad de fraguado, obteniendo una línea de tendencia con una menor confiabilidad que la figura anterior.

Figura 98. Función que relaciona la incidencia de la temperatura de curado con el módulo resiliente de los suelos.



Fuente: propia

Aplicando las ecuaciones de las líneas de tendencia, es posible estimar el módulo resiliente del suelo cemento desde edades tempranas a partir del monitoreo de las temperaturas de fraguado y el cálculo de los índices de madurez y la edad equivalente, a través de las siguientes funciones lineales:

$$Mr = 5.2661FE_F + 147.73$$

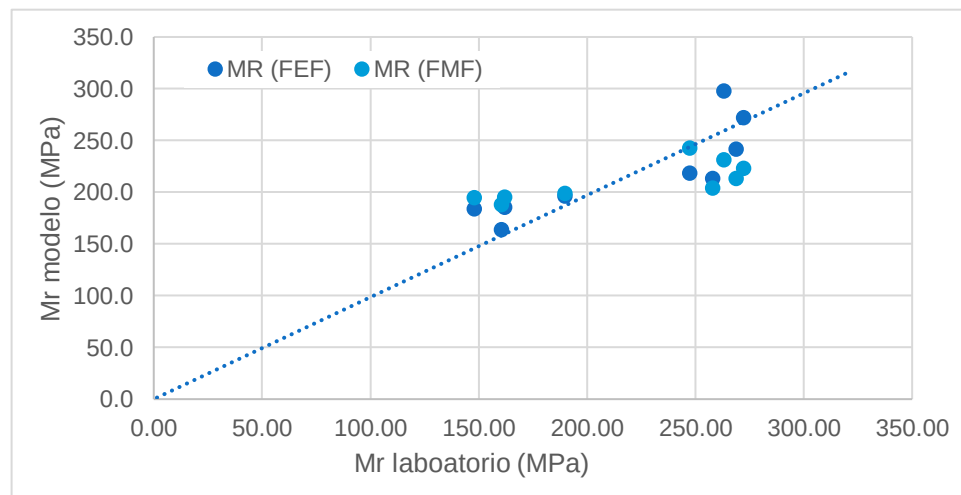
Ecuación 12. Estimación del Módulo Resiliente del suelo cemento por el método de la madurez
Donde $FE_{\text{máx}}$ es el factor de edad máximo calculado con la Ecuación 11 y Mr es el módulo resiliente obtenido a los 28 días de edad.

$$Mr = 0.3213FM_F + 135.48$$

Ecuación 13. Estimación del Módulo Resiliente del Suelo cemento por el método de la madurez
Donde $FME_{\text{máx}}$ es el factor de madurez de fraguado calculado con la Ecuación 10 y Mr es el módulo resiliente obtenido a los 28 días de edad.

Para verificar el modelo matemático se relaciona los valores teóricos obtenidos por las ecuaciones y los valores obtenidos durante la prueba experimental. De la Figura 99, se observa que los puntos que están sobre la línea punteada son obtenidos en el laboratorio y son estimados con las ecuaciones, mientras que los que no, son subestimados y otros son sobre estimados. Es necesario verificar el método en campo para establecer mayores puntos que alimenten el modelo.

Figura 99. Comparativo de valores obtenidos con el modelo de predicción versus los obtenidos en laboratorio



Fuente: propia

12. DIAGNÓSTICO DE RESULTADOS

Durante todo el proceso de esta investigación se ha logrado dar claridad a diferentes interrogantes que surgen a la hora de diseñar, construir o evaluar un suelo cemento. La ambigüedad de la normativa colombiana referente al tema abre un abanico de interrogantes que hacen de una técnica sencilla de un diseño de mezcla, todo un espacio para la investigación de materiales y métodos de mejoramiento de suelos, con una gran variedad de productos cementantes, que tienen diferentes comportamientos dadas a las condiciones de ambiente, humedad y temperatura. De manera que, determinar si la temperatura de curado incide en la madurez del suelo cemento es un problema de discusión que involucran variables como el tipo de cemento, la temperatura de curado, la forma y el tamaño de las muestras, la densidad de compactación e incluso la manera de fallarlas hacen del suelo cemento, una ciencia inhóspita que hay que analizar a mayor profundidad.

Si bien, las pruebas experimentales de esta investigación confirman que, a mayor temperatura de curado, menor es el tiempo en el que se obtiene la resistencia de diseño a la compresión, es importante dar claridad a diferentes hallazgos que fueron enmarcando una ruta para el estudio y diseño de mezclas de suelo cemento para pavimentos.

Como primera medida, es necesario unificar el tamaño y la forma de las muestras que evalúan las características físicas y mecánicas del suelo cemento en todo su proceso de diseño de mezcla. No es viable iniciar un procedimiento con el famoso ensayo Proctor, que analiza la relación entre la densidad máxima y el contenido óptimo de humedad con muestras cuya relación ancho altura es de 0.89, compactada a golpes con un martillo normalizado, para luego evaluar su resistencia en muestras cuya relación se cambia a 2.0, compactadas de la misma manera con ayuda de un martillo. Indudablemente, esto trae un problema coherencia y homogeneidad en las muestras, que igual se vio en el desarrollo de esta investigación. El modo de evaluar la densidad máxima con la humedad optima debe ser medido con el mismo método de compactación de las muestras que se van a fallar a compresión simple, para que las densidades no signifiquen un margen de error en el ensayo, que luego se verá reflejado en la resistencia. Esta conclusión se soporta del procedimiento de la sección 8.3, página 84 del presente documento, donde la densidad máxima de la muestra sin cemento por el método de compactación con martillo registró 1.967 Ton/m³, mientras que con el método de compactación

validado en esta investigación como desarrollo tecnológico registró 2.058 Ton/m³, es decir que aplicando el método de impacto por martillo equivale al 96% de compactación real. Esto se debe analizar a más detalle en pruebas de campo ya que, si existe esa diferencia en laboratorio, y tenemos en cuenta que la Especificación de Construcción de Carreteras del INVIAS, permite una tolerancia de compactación del 95 al 98% según corresponda el material y la función en el pavimento. La estructura entraría en riesgo dado que el 98% del 96% del ensayo Proctor equivale al 94% y ya se estaría incumpliendo todo requerimiento de normativa y durabilidad de la estructura.

Por otro lado, el suelo cemento sin lugar a dudas es un híbrido, que surge de la combinación de dos materiales con comportamientos distintos, dada a sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. En consecuencia, si un suelo es remoldeado su resistencia a la compresión se ve alterada de acuerdo a múltiples factores; en los cohesivos depende de la actividad y sensibilidad, pero que al cabo de mucho tiempo recupera su resistencia y en muchos casos ésta aumenta.

En cuanto al remoldeo de los granulares, un menor contenido de vacíos aumenta su densidad y por consiguiente su resistencia mecánica. Sin embargo, esta propiedad no es igual para los concretos hidráulicos, una vez entra en contacto el cemento con el agua, se inicia el proceso de fraguado con la creación de cristales que, si son fracturados a edades tempranas, las consecuencias se ven reflejadas en su baja resistencia luego de cumplir su edad de maduración. Es así como, se debe replantear la ruta del diseño de suelo cemento de manera que el porcentaje de compactación no sea la variable que debe medirse en obra, dado que los métodos tradicionales de medición de densidades en campo, como el caso del cono de arena, el balón de caucho, el densímetro eléctrico o el densímetro nuclear, que requieren hacer un hueco en la zona compactada para establecer una relación que permita medir la densidad y el porcentaje de compactación.

Este ejercicio, tradicionalmente usado a edades tempranas, rompe cualquier tipo de enlace químico que pueda generar el material cementante en el suelo, provocando un punto de falla en el pavimento, y este a su vez, afecta de manera directa la durabilidad de la estructura.

Por esta razón, se propone el monitoreo de temperaturas a edades tempranas para estimar la relación entre la temperatura máxima de fraguado y el módulo resiliente

del suelo cemento, en el sitio de instalación, de manera que se lograría llevar un historial de temperaturas usando sensores instalados en los pavimentos que transmitan la información de la edad óptima para realizar los cortes por retracción de fraguado y la apertura el paso del flujo vehicular.

Con los resultados obtenidos y enmarcados en la sección 10 la temperatura máxima de fraguado se ve alterada en la medida en que cambia la temperatura de exposición de la muestra. Para el caso del curado en climas fríos, asumiendo una temperatura ambiente promedio de 11°C, la máxima temperatura de las tres muestras de suelo cemento se presenta entre las primeras 15 y 18 horas después de realizar la compactación de la mezcla. Tiempo máximo donde se debe realizar el corte de juntas, para evitar la fisuración por retracción de fraguado.

De otro lado, para el caso de los climas cálidos, con temperaturas altas durante el día de 30°C y una reducción de hasta 10° durante la noche, el período de retracción se reduce a la mitad, ya que la temperatura máxima del fraguado ocurre sobre las ocho primeras horas luego de la compactación de la mezcla. Por lo que se debe programar los cortes de juntas de manera más rápida.

Para sorpresa de todos, las temperaturas altas y permanentes, es decir que no ha reducción de temperatura ni durante el día, ni durante la noche. La temperatura del suelo cemento logra mantener un equilibrio a lo largo de toda su etapa de maduración, ya que la temperatura externa de 40°C se confunde con su temperatura interna de fraguado haciendo no solo más resistente la muestra sino evitando los riesgos de cambios de temperatura. (ver Figura 73, pág. 125). Sin embargo, es importante realizar los cortes, sobre todo para los suelos estabilizados con cemento de Tipo ART y MCH, luego de las 30 horas, que es cuando inicia el descenso de temperatura de la muestra, mientras que con los de Uso General, se puede programar luego de la hora 45 y antes de la hora 50.

El índice de madurez del suelo cemento elaborado con cementos de tipo ART, se logra obtener una edad equivalente (Figura 87, página 135) del 54% menor que el Cemento MCH, Y 56% menor que el UG. Es decir que el ART en la mitad del tiempo puede lograr la resistencia a la compresión los otros dos tipos de cemento. En cuanto al factor de temperatura (Figura 88, página 135) el suelo cemento elaborado con MCH tiene un 5% menos que los suelos tratados con UG y ART. No obstante, tanto para las dos funciones del índice de madurez, el desempeño que tiene el

cemento ART con los suelos Tipo 2 como bases y subbases es mayor, es decir que con una menor dosificación logra obtener las resistencias requeridas por la especificación en las tres condiciones de curado y a un menor tiempo.

Los resultados obtenidos en la estimación de la Energía de Activación en las pruebas de ‘cubos’ de suelo cemento, que para efectos de esta investigación y calidad de las muestras la geometría fue modificada a cilindros con relación ancho/altura de 1.0; se marca una tendencia clara entre los tres tipos de cemento, el MCH registró una Energía de activación de 14223.4 J/mol, el UG 18511.36 J/mol y para ART registro 25397.02 J/mol, coherente con la información de la ASTM C1074-19, para el cemento Portland tipo 1, este valor oscila entre 38000 y 45000 J/mol, es decir que el suelo cemento con respecto al concreto hidráulico puede perder una eficiencia energética del 32 al 66%, por lo que su tiempo de fraguado se extiende hasta las 30 horas, mientras que en los concretos hidráulicos no supera las 9 horas.

Por otra parte, la temperatura de referencia calculada por el mismo método registra valores negativos, presumiendo que la madurez de la resistencia calculada como la diferencia entre la lectura monitoreada con la temperatura de referencia, en el caso del suelo cemento no será menor sino por lo contrario sumaría al registro en campo aumentando su madurez. En otras palabras, la madurez de la resistencia no solo se adquiere por el aumento de temperatura que produce el calor de hidratación, sino por otra variable propia del suelo, como la densidad seca. Para corroborar esta hipótesis, se compara las densidades secas registradas durante la prueba del módulo resiliente con la temperatura de fraguado consolidadas en la Tabla 40.

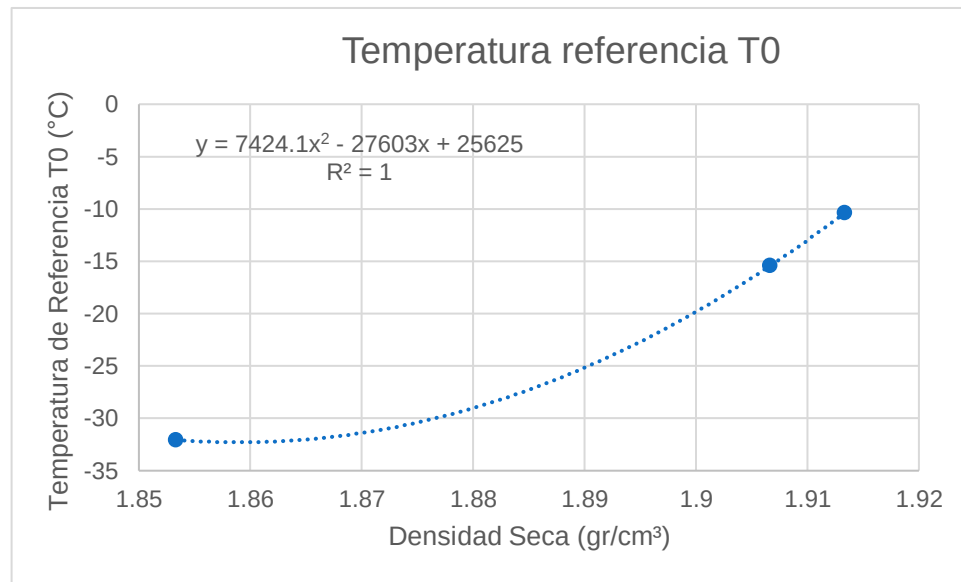
Tabla 40. Resultados de la Densidad seca y la Temperatura de referencia de las muestras falladas en el Triaxial Cíclico, para determinar su módulo resiliente

Muestra	Densidad seca (gr/cm ³)	Desviación estándar	Densidad promedio	Temperatura de referencia T0
MCH-40	1.860	1%	1.853 gr/cm ³	-10.38°C
MCH-30	1.850			
MCH-11	1.850			
UG-40	1.910	1%	1.907 gr/cm ³	-15.43°C
UG-30	1.910			
UG-11	1.900			
ART-40	1.930	2%	1.913 gr/cm ³	-32.05°C
ART-30	1.910			
ART-11	1.900			

Fuente: propia

Con el promedio de las densidades y la temperatura de referencia, se realiza el diagrama de la Figura 100, cuya interpretación obedece al concepto del ACI, que afirma que a mayor densidad seca, mayor será la resistencia de la capa. Para este caso, se afirma que, a mayor densidad seca, mayor será la madurez de la resistencia.

Figura 100. Relación entre la Temperatura de Referencia T0 y la Densidad Seca



En cuanto a los módulos resilientes en el suelo cemento, es importante resaltar que aunque no existe normatividad nacional referente al tema, se hace necesario incluirla en las especificaciones de diseño, ya que el suelo cemento es uno de los materiales que forman parte de la estructura de un pavimento, por lo que su carga de servicio es cíclica y su estado de falla es por fatiga o por retracción, y ninguna de estas dos variables son analizadas desde los requerimientos del Artículo 350 del INVIAS, ni por resistencia a la compresión, ni por durabilidad en ciclos de humedecimiento y secado. Siendo esta última, la variable determinante del diseño, pero que en nada se asemeja a la fisuración que sufre el pavimento de suelo cemento por fatiga o retracción del fraguado.

Es por esto, que la generación de nuevo conocimiento que aporta esta investigación radica en la propuesta de implementación de un método no destructivo, que desde edades muy tempranas (las primeras 30 horas), es posible predecir su módulo

resiliente durante su máxima etapa de madurez.

Este modelo de predicción está soportado en la incidencia de la temperatura de curado en una temperatura interna de fraguado que conduce a un desarrollo de madurez, soportado de la hipótesis de que, a mayor temperatura, mayor será la resistencia final. Por lo que se presume que, curando la capa extendida con agua caliente o vapor, la resistencia final será mayor que aquellos que en climas fríos su proceso de hidratación sea únicamente por la humedad relativa cuya temperatura es muy baja.

Como resultado de ese comportamiento, se puede expresar una ecuación que correlaciona el producto entre el incremento de la temperatura durante su etapa del fraguado con su factor de madurez máximo con el módulo resiliente a los 28 días de edad.

13. CONCLUSIONES

- Mediante este trabajo de investigación se logró obtener un modelo de predicción del módulo resiliente del suelo cemento mediante el procedimiento no destructivo de monitoreo de temperaturas en sitio, aplicando el método de madurez, que consiste en una expresión matemática lineal que converge el producto entre la diferencia de la temperatura máxima y la mínima registrada durante las treinta primeras horas de la mezcla, con su máximo factor de madurez que puede ser calculado por la función de la edad equivalente de Arrhenius o por la función lineal de Nurse-Saul de la madurez. (Ecuación 12 y Ecuación 13)
- La aplicabilidad de las expresiones matemáticas del modelo de predicción del módulo resiliente de la Ecuación 12 y la Ecuación 13, se puede desarrollar en sitio ante cualquier clima, ya que su parámetro de medida es la temperatura interna, y que puede ser monitoreada por sensores instalados al interior de la capa instalada.
- Para obtener el modelo de predicción, fue necesario optimizar los procedimientos de ensayo a través de un desarrollo tecnológico presentado en la sección 8.4, que consiste en el diseño, manufacturación y puesta en marcha de un molde maquinado y el proceso de compactación monotónica empleando una prensa hidráulica cuya carga máxima no debe superar los 25 MPa.
- Con el modelo de compactación puesto en marcha, se diseñó tres mezclas de suelo cemento con diferentes tipos de cementos adicionados: Moderado calor de Hidratación (MCH), Uso general (UG) y Altas Resistencias Tempranas (ART), cuyas dosificaciones de cementos fueron 30, 35 y 40%, del peso seco de la muestra.
- Aplicando el método de la madurez establecido por la NTC 3756, se calculó la energía de activación para el suelo cemento MCH de 14223.4 J/mol, para el suelo cemento UG de 18511.36 J/mol y para el suelo con cemento ART de 25397.02 J/mol, siendo la primera equivalente al 61% del cemento portland Tipo 1, según información del ACI, la segunda equivalente al 45% y la tercera al 34%. Teniendo en cuenta que para el caso del suelo cemento la pasta no envuelve la totalidad partícula y que la energía de activación se produce a través de una reacción exotérmica mediante la hidratación, definida como la diferencia entre la energía necesaria para activar la reacción y el nivel de energía de los reactivos, la energía

que libera en este caso el suelo cemento es inferior a la de un concreto hidráulico, por lo que se entiende que su bajo contenido de humedad hace que su proceso de hidratación sea más prolongado y el proceso de reacción es más lento.

- Al mismo tiempo, se concluye que la temperatura de referencia para los tres tipos de cemento son valores negativos, que al usarlos en la Ecuación 1, en vez de restar a la temperatura monitoreada en campo, esta se suma aumentando el factor de madurez, indicando mayor resistencia. Es decir que a diferencia de los concretos hidráulicos su firmeza no solo está dada por el fraguado del cemento, sino por la dureza del suelo medido con su grado de compactación y cohesión. Si para el MCH se obtuvo una temperatura de referencia T_0 de -10.38°C , con un contenido de cemento del 40%, mientras para el UG -15.43°C con un 35% de cemento y para un ART registró una T_0 de -32.05 con un 30%. Se deduce que, con menos contenido de cemento, mayor será la densidad y a su vez mayor su índice de madurez.
- A partir del monitoreo de temperaturas internas de las muestras de suelo cemento se concluye que durante las primeras treinta horas las tres mezclas acondicionadas en las tres temperaturas, se termina su etapa de fraguado, de manera que la evolución de estas se ven directamente afectadas cambiando la curva típica que suelen tener los concretos hidráulicos y pese a los altos contenidos de cemento, no se logra enmarcar la curva como la de los concretos hidráulicos siendo el suelo el responsable de la extensión de su período de fraguado, ya que absorbe una gran cantidad de humedad que impide la evolución normal de los enlaces.
- Luego de realizar las pruebas de módulo resiliente, se observa que las muestras que registraron menores incrementos de temperatura durante las primeras treinta horas lograron valores más bajos de resiliencia, mientras que las que presentaron mayores picos, entendiéndose este como la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima, registraron mayores módulos resilientes.
- Después de correlacionar los factores de madurez, con las temperaturas monitoreadas en los tres cuartos húmedos se logra obtener una función lineal (Ecuación 13) que estima el módulo resiliente de los suelos cemento que, confrontada entre los módulos calculados con los obtenidos en laboratorio, indican una confiabilidad del 93%. No obstante, este método debe validarse a través de

pruebas en campo y con diferentes diseños de mezclas, para obtener un mayor número de puntos en la Figura 99.

- Para este modelo de predicción, tanto el tipo de suelo como su densidad máxima fueron constantes que se revisaron durante todas las pruebas. Por lo que se recomienda ampliar el modelo y analizar el porcentaje de compactación, o la relación de vacíos en función con el desarrollo de temperaturas durante el fraguado.

14. BIBLIOGRAFÍA

- AccuWeather. (2019). *Cómo pronosticamos*. Obtenido de La ventaja de Accuweather: <https://corporate.accuweather.com>
- ACI. (2009). *Report on Soil Cement*. Committe 230. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute.
- ACI. (2013). *Cementitious Materials for Concrete*. Developed by ACI Committee E-701. Farmington Hills, U.S.A.: American Concrete Institute.
- American Association of State Highway. (2017). T 307, Método estándar de prueba para determinar el módulo de resiliencia de suelos y materiales agregados. En AASHTO, *Materiales, pruebas y pavimento*. Washington DC: AASHTO Publications.
- ARGOS. (Marzo de 2018). *Colombia Argos*. Recuperado el octubre de 2018, de Ficha Técnica. Cemento Uso estabilización de suelos. Versión 2: colombia.argos.co
- ARGOS. (Marzo de 2018). *Fichas técnicas*. Obtenido de Colombia Argos: <https://colombia.argos.co>
- Ashlee M., H., & Michael D.A. , T. (25 de March de 2015). The effect of temperature on the rate of sulfate attack of Portland cement blended mortars in Na₂SO₄ solution. *Cement and Concrete Research*(73), 136-142. doi:dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.024
- Asociación Mundial de la Carretera. (2016). *Plan estratégico 2016-2019*. Seúl, Korea: PIARC. Obtenido de www.piarc.org
- ASTM International. (2018). ASTM C150/C150M-18 Especificación estandar para Cemento Portland. En S. C01.10, *Libro Anual de Normas ASTM*. EE. UU. Obtenido de www.astm.org
- Bhattacharja, S., & Bhatta, J. (2003). *Comparative Performance of Portland Cement and Lime Stabilization of Moderate to High Plasticity Clay Soils* (Vol. 2435). (R. & Bulletin, Ed.) Skokie, Illinois 60077-1083, USA: Portland Cement Association. Obtenido de www.cement.org

- Boubekeur, T., Ezziane, K., & Kadri, E.-H. (18 de Septiembre de 2014). Estimation of mortars compressive strength at different curing temperature by the maturity method. *Construction and Building Materials*, 299-307.
- Brizuela, L., Alderete, N., & Rivera, J. (2013). *Repositorio Universidad Tecnológica Nacional, Argentina*. Recuperado el 30 de octubre de 2018, de Procedimiento de moldeo para suelos granulares complementario a la norma AASTHO T307 para el ensayo de módulo resiliente de suelos viales: ria.utn.edu.ar
- Brown, S. F. (Septiembre de 1996). Soil mechanics in pavement engineering. *Geotechnique*, 46(3), 383-426.
- Catton, M. D., & Felt, E. J. (1943). Effect of Soil and Calcium Chloride Admixtures on Soil-Cement Mixtures. (H. R. Board, Ed.) *Proceedings*, 23, 497-529.
- Comité ACI 230. (2009). *Informe sobre el suelo cemento*. American Concrete Institute. Michigan EE. UU.: ACI .
- Comité ACI 329. (2018). *329.1T-18: Nota técnica: Contenido mínimo de materiales cementosos en las especificaciones*. Michigan, EE UU: ACI, American Concrete Institute.
- Consoli, N., Aliati Rosa, D., Caberlon Cruz, R., & Dalla Rosa, A. (July de 2011). Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil. *Engineering Geology*, 122, 328-333. doi:10.1016/j.enggeo.2011.05.017
- Consoli, N., Marques Prieto, P. D., Harb Carraro, J. A., & Savagni Heineck, K. (September de 2001). Behavior of Compacted Soil-Fly Ash-Carbide Lime Mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(9), 774-782. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:9\(774\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:9(774))
- Costas A. , A. (2015). Strength properties of an epoxy resin and cement-stabilized silty clay soil. *Applied Clay Science*, 114, 517-529. Obtenido de www.elsevier.com/locate/clay
- George, K. P. (2002). *Minimizing Cracking in Cement-Treated Materials for Improved Performance*. Skokie, IL.: Portland Cement Association.

- Gómez G., C., & Gómez, L. (2017). Infraestructura Sostenible para Comunidades. *Noticreto*(145), 45.
- Gómez, C. M. (2018). Suelo cemento: Alternativas de pavimentación para vías de bajo tráfico. *Noticreto. la revista de la técnica y la construcción*(143).
- Horpibulsuk, S., Miura, N., & Nagaraj, T. (Mayo de 2003). Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis. *Geotechnique*, 53(4), 439-444. doi:<https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.4.439>
- ICONTEC. (2002). NTC 3756. Procedimiento para estimar la resistencia del concreto por el método de la madurez. En I. C. ICONTEC (Ed.), *Ingeniería Civil y Arquitectura*. Bogotá D.C.
- ICONTEC, Interancional. (2014). Especificación de desempeño para cemento hidráulico. En I. C. Certificación, *Norma Técnica Colombiana* (pág. 15). Bogotá, D.C. : Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación .
- IDEAM. (2014). *Tiempo y Clima*. Obtenido de IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: <http://www.ideam.gov.co>
- Instituto Nacional de Vías, INVIAS. (2013). Artículo 350-13 Suelo Cemento. En INVIAS, *Especificaciones para la Construcción de Carreteras*. Bogota D.C.
- INVIAS. (2013). INV E-156 Módulo Resiliente de Suelos y Agregados. En S. Sección 100, *Normas y Especificaciones 2012* (págs. 545-584). Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Vías.
- INVIAS. (2013). INV E-156. Módulo resiliente de suelos y agregados. En INVIAS, *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras* (págs. 545-584). Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Vías.
- INVIAS. (2013). INV E-611 Relaciones de humedad-densidad de mezclas de suelo cemento. En I. N. Vías, *Sección 600 Normas y Especificaciones 2012* (págs. 63-74). Bogotá: Instituto Nacional de Vías.
- INVIAS. (2013). INV E-612 Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo-cemento. En I. N. Vías, *Normas y Especificaciones 2012 INVIAS* (págs.

E 612-1-12). Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Vías.

INVIAS. (2013). INV E-613. Preparación y Curado de Probetas de Suelo Cemento para pruebas de compresión y flexión en el laboratorio. En S. 6. Suelos, *Normas y Especificaciones 2012 INVIAS* (págs. 87-100). Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Vías.

INVIAS. (2013). *Suelo-Cemento*. Artículo 350-13, Instituto Nacional de Vías.

Irassar, E. (March de 2009). Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler — A review. *Cement and Concrete Research*, 39(3), 241-254. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.007>

Jiménez Acuña, M. (2009). *Implementación del ensayo de Módulo resiliente en bases granulares para pavimentos*. Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica: LanammeUCR.

Juhlman, R. (1994). Agrietamiento en el suelo cemento: causa, efecto, control. En *Concrete International* (Vol. 16, págs. 56-59).

Kasama, K., Zen, K., & Iwataki, K. (April de 2006). Undrained shear strength of cement treated soils. *Soils and Foundations*, 46(2), 221-232. doi:<https://doi.org/10.3208/sandf.46.221>

Kasama, K., Zen, K., & Iwataki, K. (January de 2007). High-Strengthening of Cement-Treated Clay By Mechanical Dehydration. *Soils and foundations*, 47(ISSN 1881-1481), 171-184. doi:<https://doi.org/10.3208/sandf.47.171>

Kolias, S., Kasselouri, R. V., & Karahalios, A. (2005). Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement & Concrete Composites*, 301-313.

Limaymanta Mendoza, F., & Gutiérrez Lázares, W. (2003). Ensayo de Módulo Resiliente. En C. d. Perú, *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil*. Iquitos

Linhao, W., Xiangyu, L., Yin, C., & Xiaohong, B. (2018). Effects of coal-metakaolin on the properties of cemented sandy soil and its mechanisms. *Construction*

and Building Materials, 592-600.

MINAMBIENTE-IDEAM. (31 de ENERO de 2017). Régimen Térmico en Colombia. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, pág. 11.

Ministerio de Transporte. (2017). *Transporte en cifras*. Obtenido de www.mintransporte.gov.co.

MINISTERIO DEL TRANSPORTE. (2015). *Transporte en Cifras*. Departamento Nacional de Planeación.

Ministerio del Transporte. (2017). *Plan 5150 Vías Terciarias para la Paz*. Recuperado el 10 de mayo de 2018, de www.mintransporte.gov.co

MIT CSHub. (2016). *Minimizing Thermal Cracks in Concrete Pavements*. Massachusetts, EE. UU.: CSHub@MIT. Obtenido de cshut.mit.edu

MIT CSHub. (2018). *A Reaction-Diffusion Model to Determine Mesoscale Patterns in Cement Paste*. Massachusetts, EE. UU.: CSHub@MIT. Obtenido de cshub.mit.edu

Monzón Chaparro, J. S. (2012). *Influencia del comportamiento viscoso de arcillas sobre el módulo resiliente y la deformación permanente de subrasantes*. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana.

Moore, R., Kennedy, T., & Hudson, W. (Nov de 1970). Factors affecting the tensile strength of cement-treated materials. *Soil Stabilization: Multiple Aspects*, 315, 64-80.

Moreno Rubio, J. (2005). *Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas*. Tesina, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.

Naciones Unidas. (2018). *Naciones Unidas*. Recuperado el 31 de octubre de 2018, de Objetivos de Desarrollo Sostenible: www.un.org

NRMCA. National Ready Mixed Concrete Association. (2017). Curado del concreto en el lugar. *El concreto en la práctica ¿Qué, por qué y cómo?* Obtenido de

www.nrmca.org

- NRMCA. National Ready Mixed Concrete Association. (2017). Madurez del concreto. 39(CIP-39). Obtenido de www.nrmca.org
- Olek, J., Santhanam, M., & Menashi D. , C. (April de 2002). Modeling the effects of solution temperature and concentration during sulfate attack on cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 32(Issue 4), 585-592. doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00727-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00727-X)
- PCA. (2017). *Aplicaciones de cemento y Concreto*. Recuperado el 10 de junio de 2019, de <https://www.cement.org/cement-concrete-applications>
- PCA. (2018). *Portland Cement Association [US]*. Recuperado el 30 de Octubre de 2018, de Suelo-cemento: www.cement.org
- PCA America's Cement Manufacturers. (2018). *Aplicaciones de cemento y concreto*. (PCA) Recuperado el 30 de octubre de 2018, de Cómo se fabrica el cemento: www.cement.org
- PCA America's Cement Manufactures . (2018). *Suelo Modificado con Cemento (CMS)*. Recuperado el 5 de noviembre de 2018, de Pavimentación: www.cement.org
- PCA, American Cement Manufacturers. (s.f.). *Portland Cement Association [US]*. Recuperado el 30 de octubre de 2018, de Tipos de cemento: www.cement.org
- PCA. Portland Cement Association. (2017). *Cement-modified soil*. Skokie, Illinois.
- PCA. Portland Cement Association. (2017). *Cement-Treated Base*. Integrated Paving Solutions. Skokie, Illinois: Tink harder Concrete.
- Penagos, Á. M., Tobón, S., & Pérez, N. (2018). *NOTA DE LINEAMIENTOS ESTRATÉGICOS PARA LA AGRICULTURA EN COLOMBIA*. Bogota D.C.: Banco Mundial. Recuperado el 09 de Mayo de 2019, de https://rimisp.org/wp-content/files_mf/1539713619INFORME2BANCOMUNDIALV717092018totalTF.pdf

- Porbaha, A., Tanaka, H., & Kobayashi, M. (July de 1998). State of the art in deep mixing technology: part II. Applications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 2(ISSN 1755-0750), 125-139. doi:<https://doi.org/10.1680/gi.1998.020303>
- Rahhal, V., Pedrajas, C., Irassar, F., & Talero, R. (Enero-Junio de 2014). Efecto de puzolanas naturales sobre la reología de pastas de cemento portland. 5(2), 2-11.
- Reeder, G. D., Harrington, D. S., M. E., & Adaska, W. (2017). *Guide to Full-Depth Reclamation (FDR) with Cement*. Institute for Transportation, Iowa State University, National Concrete Pavement Technology Center. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- Santacruz, A., Castaño, M., Castro Arenas, F., Izquierdo, S., Torres, A., & Cemex Research, G. (Julio/Agosto de 2017). Aditivos Solidificantes para Suelo Cemento. *Noticreto*, 143, 46-49.
- Santhanam, M., Menashi, D. C., & Olek, J. (April de 2002). Modeling the effects of solution temperature and concentration during sulfate attack on cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 32(4), 585-592. doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00727-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00727-X)
- Santhanam, M., Menashi, D., & Olek, J. (June de 2002). Mechanism of sulfate attack: A fresh look: Part 1: Summary of experimental results. *Cement and Concrete Research*, 32(Issue 6), 915-921. doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00724-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00724-X)
- Sanz, B., Wartenberg, L., Acosta, O., Herrera Araujo, F., Corredor, C., Wilches, G., . . . Bernal, A. (2016). *Documento Objetivos de Desarrollo Sostenible en Colombia*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Secretaría de Infraestructura. (2015). *Estudio, selección y estructuración de sistemas tecnológicos alternativos para estabilización y tratamiento de la red vial secundaria departamental desarrollo de pruebas piloto en subregiones de Antioquia*. Medellín: Gobernación de Antioquia.
- Shen, C. K., & Mitchell, J. K. (1966). Behavior of Soil-Cement in Repeated

Compression and Flexure. *Highway Research Record*(128), 68-100.

- V. Rahhal, H., A. Delgado, J.P. Gutiérrez, & R. Talero. (2008). Estudio calorimétrico del cemento Portland con puzolanas naturales españolas y yeso. En C. S. (CSIC), *Actas de las II Jornadas de Investigación en Construcción*. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.
- Yang H., H. (2004). *Pavement Analysis and Desing*. United States of America: Pearson Education, Inc.
- Yikici, T. A., & Chen, H.-L. R. (2015). Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete. *Construction and Building Materials*, 802-812.
- Yilmaz, Y., & Vehbi, O. (2011). Compaction and shear strength characteristics of colemanite ore waste modified active belite cement stabilized high plasticity soils. *Engineering Geology*, 9.