



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL USO DEL SULFATO DE SODIO CRISTALINO PROVENIENTE DEL  
TRATAMIENTO DEL RESIDUO LÍQUIDO DEL ANÁLISIS DE LA DQO, MEDIANTE LA  
COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES, SEGÚN NORMA ASTM C 88-99a**

**Marian Angelica Mejía Giordano**

Asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra

Guatemala, noviembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL USO DEL SULFATO DE SODIO CRISTALINO PROVENIENTE DEL  
TRATAMIENTO DEL RESIDUO LÍQUIDO DEL ANÁLISIS DE LA DQO, MEDIANTE LA  
COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES, SEGÚN NORMA ASTM C 88-99a**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARIAN ANGELICA MEJÍA GIORDANO**

ASESORADO POR EL ING. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elva Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Dinna Lissette Estrada Moreira
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Godínez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DEL USO DEL SULFATO DE SODIO CRISTALINO PROVENIENTE DEL TRATAMIENTO DEL RESIDUO LÍQUIDO DEL ANÁLISIS DE LA DQO, MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES, SEGÚN NORMA ASTM C 88-99a**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha de julio de 2012.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a hand-drawn circle. The signature appears to read "Marian Angelica Mejía Giordano".

**Marian Angelica Mejía Giordano**



Guatemala, 29 de octubre de 2013

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
Dirección  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Respetable Ing. Monzón:

Deseando que sus labores se realicen con éxito, dirijo la presente para hacer de su conocimiento que he revisado y aprobado el informe final del Trabajo de Graduación titulado **"EVALUACIÓN DEL USO DEL SULFATO DE SODIO CRISTALINO PROVENIENTE DEL TRATAMIENTO DEL RESIDUO LIQUIDO DEL ANÁLISIS DE LA DQO, MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES, SEGÚN NORMA ASTM C 88-99a"**, el cual se llevó a cabo por la estudiante de Ingeniería Química: **Marian Angelica Mejía Giordano**, identificada con el Carné No. **2006-14750**.

Considerando que dicho documento cumple satisfactoriamente con los requisitos exigidos, solicito sirva darle continuidad al proceso para su aprobación.

Agradeciendo su atención, me suscribo atentamente,



Ing. César Alfonso García Guerra  
Colegiado No. 145  
Asesor de Trabajo de Graduación

*César Alfonso García Guerra*  
INGENIERO QUÍMICO  
COLEGIADO No. 145

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ACREDITADO POR

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería  
Período 2009 - 2015



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Guatemala, 04 de noviembre de 2013  
Ref. EIQ.TG-IF.071.2013

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-040-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Marian Angelica Mejía Giordano**.

Identificada con número de carné: **2006-14750**.

Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

### EVALUACIÓN DEL USO DEL SULFATO DE SODIO CRISTALINO PROVENIENTE DEL TRATAMIENTO DEL RESIDUO LÍQUIDO DEL ANÁLISIS DE LA DQO, MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES, SEGÚN NORMA ASTM C 88-99a

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **César Alfonso García Guerra**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Licda. Ingrid Lorena Benítez Pacheco  
COORDINADORA DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de Programas de Arquitectura y de Ingeniería



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **MARIAN ANGELICA MEJÍA GIORDANO** titulado: "**EVALUACIÓN DEL USO DEL SULFATO DE SODIO CRISTALINO PROVENIENTE DEL TRATAMIENTO DEL RESIDUO LÍQUIDO DEL ANÁLISIS DE LA DQO, MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES, SEGÚN NORMA ASTM C 88-99a**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, noviembre 2013

Cc: Archivo  
VMMV/ale



DTG. 835.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL USO DEL SULFATO DE SODIO CRISTALINO PROVENIENTE DEL TRATAMIENTO DEL RESIDUO LÍQUIDO DEL ANÁLISIS DE LA DQO, MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES, SEGÚN LA NORMA ASTM C 88-99a**, presentado por la estudiante universitaria: **Marian Angelica Mejía Giordano**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, 21 de noviembre de 2013

/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser el pilar fundamental de mi vida; por llevarme de la mano en este camino recorrido lleno de bendiciones y por permitirme llegar hasta acá con su infinita bondad y gran amor.
- Mi madre** Carmen Maricela Mejía Giordano, por todo el amor y el esfuerzo empleado para formarme de la mejor forma. Gracias por su ejemplo, por haber creído siempre en mí, por estar conmigo en los momentos más difíciles, por su inmenso apoyo y amor. Te amo.
- Mis hermanos** Victor Raúl Rivas Mejía, Maricela del Rosario Rivas Mejía, Marvin Giovani Mejía, este triunfo también es de ustedes.
- Mi abuela y tías** María Angélica Giordano Villegas, Shirley Mejía de Linares y Silvia Mejía de Mejía, por su ejemplo de mujeres inteligentes y luchadoras, por sus sabios consejos y su amor.
- La memoria** Victor Manuel Mejía (q.e.p.d.), Victor Manuel Rivas Rodas (q.e.p.d.), Marina Adela Rodríguez de Rivas (q.e.p.d.), Jorge Félix López González (q.e.p.d.).

## **Mis amistades**

Por el cariño sincero y desinteresado, el cual hemos sabido cultivar y fortalecer al paso del tiempo; por todas las emociones, alegrías, tristezas y experiencias compartidas en todos estos años.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **Mis amigos y amigas**

Ana Urbina, Liliana Cobaquil, Luis Funes, Carol Corzo, Héctor Méndez, Brenda Barrios, Jaime Catalán, Vladimir Pérez, Roberto Cancinos, Jorge Morataya, Gabriel Cifuentes, Edgar Morales, Arnold Arreaga, por compartir esta felicidad conmigo, por haberme brindado su invaluable amistad, por cada momento especial juntos; porque sin cada uno de ustedes este camino hubiera sido muy aburrido. Los quiero.

### **Luis Fernando Paredes Lavagnino**

Por el crecimiento que hemos tenido juntos y por el todo el camino que tenemos por delante, por sus enseñanzas, por su tiempo, apoyo y cariño. Te quiero.

### **Ing. César A. García**

Por compartir conmigo sus enormes e invaluable conocimientos sobre la ingeniería y la vida, por ser mi asesor y por enseñarme el modelo de rectitud en todo momento. Lo admiro y lo quiero mucho.

**Licda. Ingrid Benítez**

Por su apoyo, confianza, consejos y cariño en todo momento. La admiro y la quiero mucho.

**Inga. Dilma Mejicanos**

Por los conocimientos, confianza y apoyo brindados durante el desarrollo de este proyecto.

**Ingenieros Químicos**

Víctor Monzón, Adolfo Gramajo, Hilda Palma, Jorge Mario Estrada, por haberme brindado siempre su ejemplo de amor hacia nuestra profesión y sobre todo por haberme compartido sus conocimientos de una manera especial, por ser tan buenas personas, se los agradezco. Siempre los llevaré en mi corazón.

**Centro de Investigaciones,  
Facultad de Ingeniería  
-LAFIQ/CII/USAC-**

Por ser la institución que me permitió afianzar muchas de las enseñanzas en toda mi carrera. Por haber sido parte indispensable en el desarrollo de mi trabajo de graduación. Gracias Ing. César García y Licda. Ingrid Benítez por brindarme su apoyo y cariño como parte de LAFIQ/CII.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
Hipótesis.....	XXII
INTRODUCCIÓN .....	XXIII
1.    MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1.    Antecedentes.....	1
1.2.    Justificación .....	7
1.3.    Determinación del problema.....	8
1.3.1.    Definición .....	8
1.3.2.    Alcances y límites del problema .....	10
1.3.2.1.    Alcances .....	10
1.3.2.2.    Límites .....	11
2.    MARCO TEÓRICO.....	13
2.1.    Sulfato de sodio.....	13
2.1.1.    Identificadores .....	14
2.1.2.    Propiedades físicas .....	14
2.1.3.    Estructura cristalina del sulfato de sodio .....	15
2.1.4.    Datos fisicoquímicos.....	16
2.1.5.    Composición química .....	16
2.1.6.    Informe de riesgos y explosión .....	17

2.1.7.	Informe de riesgos en la salud .....	18
2.1.8.	Informe sobre estabilidad y reactividad .....	19
2.1.9.	Otros datos.....	19
2.1.10.	Aplicaciones .....	19
2.1.11.	Síntesis.....	20
2.1.12.	Analítica.....	20
2.1.13.	Almacenamiento y manejo .....	20
2.1.14.	Sistema de clasificación de riesgo .....	21
2.2.	Grado de pureza de los reactivos .....	21
2.3.	Sulfato de sodio decahidratado, grado textil .....	23
2.4.	Sulfato de sodio anhidro, grado USP .....	24
2.5.	Sulfato de sodio cristalino proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO .....	25
2.6.	Cristalización.....	26
2.6.1.	Redes de Bravais .....	28
2.6.2.	Cristalografía .....	30
2.6.2.1.	Elementos de la simetría .....	31
2.6.2.2.	Formas cristalográficas .....	32
2.6.2.3.	Métodos cristalográficos.....	33
2.6.3.	Saturación y sobresaturación .....	33
2.7.	Agregado.....	34
2.7.1.	Definición.....	35
2.7.2.	Clasificación del agregado .....	35
2.7.2.1.	Agregado grueso .....	36
2.7.2.2.	Agregado fino .....	36
2.7.2.3.	Grava.....	37
2.7.2.4.	Arena.....	37
2.7.2.5.	Piedra triturada.....	38

2.7.2.6.	Escoria de alto horno, enfriado por aire.....	38
2.7.2.7.	Grava triturada.....	38
2.7.3.	Características de los agregados .....	38
2.7.3.1.	Textura superficial .....	39
2.7.3.2.	Granulometría (gradación).....	39
2.7.3.3.	Masa volumétrica y vacíos.....	40
2.7.3.4.	Masa específica relativa .....	40
2.7.3.5.	Masa específica (densidad) .....	41
2.7.3.6.	Absorción y humedad superficial .....	41
2.7.3.7.	Propiedades de humedecimiento y secado .....	42
2.7.3.8.	Resistencia a congelación y deshielo ..	43
2.7.3.9.	Materiales potencialmente perjudiciales.....	44
2.7.3.10.	Procesamiento de agregados .....	44
2.7.3.11.	Manejo y almacenamiento de agregados.....	45
3.	MARCO METODOLÓGICO .....	47
3.1.	Variables.....	47
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	48
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	49
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	50
3.5.	Técnica cuantitativa .....	53
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	55
3.6.1.	Análisis del agregado bajo Norma ASTM C 88-99a.....	55
3.6.1.1.	Manejo experimental .....	55

3.6.1.2.	Soluciones requeridas.....	71
3.6.1.3.	Procedimiento para manejo del papel filtro, gravimetría de los fragmentos del agregado.....	77
3.6.2.	Método para determinar densidad de los cristales de sulfato de sodio por medio del matraz de Le Châtelier. Basado en la Norma ASTM 188-95.....	83
3.6.3.	Método de fluorescencia para evidencia visual de las fisuras en el agregado grueso, después de la aplicación de la Norma ASTM C 88-99a.....	90
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	95
3.8.	Análisis estadístico.....	100
3.9.	Plan de análisis de los resultados.....	107
3.9.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables.....	108
3.9.2.	Programas para el análisis de datos.....	108
4.	RESULTADOS.....	111
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	123
	CONCLUSIONES.....	135
	RECOMENDACIONES.....	137
	BIBLIOGRAFÍA.....	139
	APÉNDICES.....	145
	ANEXOS.....	177

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Sulfato de sodio anhidro .....	13
2.	Estructura cristalina del sulfato de sodio anhidro.....	15
3.	Estructura cristalina del sulfato de sodio decahidratado .....	15
4.	Cristales de sulfato de sodio provenientes del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO .....	26
5.	Redes de Bravais .....	29
6.	Agregado grueso .....	36
7.	Agregado fino .....	37
8.	Diseño general para la técnica cuantitativa .....	54
9.	Preparación del agregado grueso para prueba, granulometría, lavado y secado.....	58
10.	Pesado del agregado, según granulometría, como lo indica la tabla XI .....	59
11.	Agregado clasificado en contenedores, según tabla XI y XII .....	60
12.	Proceso de imbibición de la solución de sulfato de sodio en el agregado grueso.....	61
13.	Proceso de deshidratación del cristal de sulfato de sodio adsorbido en el agregado grueso, en horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .....	63
14.	Lavado del agregado grueso con agua desmineralizada a $43^{\circ}\text{C} \pm 6^{\circ}\text{C}$ .....	64
15.	Evaluación de presencia de sulfatos en el agua de lavado mediante cloruro de bario ( $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) .....	65

16.	Equipo para examen cuantitativo de granulometría final del agregado, inciso 9 ASTM C 88-99a.....	66
17.	Tamizaje y pesado de cada tamaño de agregado grueso, al final del último ciclo de imbibición salina.....	67
18.	Pesado de los residuos desprendidos por el efecto mecánico de la sal anhidra sobre el agregado, en el último ciclo.....	67
19.	Soluciones de sulfato de sodio, grado reactivo, grado textil y del sulfato de sodio proveniente del residuo líquido del análisis de la DQO .....	72
20.	Sistema de filtrado al vacío .....	74
21.	Solución de sulfato de sodio filtrada proveniente de los ciclos de imbibición del agregado.....	75
22.	Medición de pH de las soluciones con potenciómetro.....	77
23.	Papel filtro húmedo con cristales de sulfato de sodio decahidratado y partículas de agregado y arcilla .....	78
24.	Sistema de filtrado al vacío para eliminar del papel filtro los cristales de sulfato de sodio formados en cada uno de los ciclos de filtrado.....	80
25.	Bandeja con los papeles filtros con los residuos de arcilla y fragmentos de agregado secos, resultantes del ciclo último y provenientes del paso 7 .....	81
26.	Pesado del papel filtro con los fragmentos de agregado y arcillas utilizando balanza analítica .....	82
27.	Determinación de la densidad del cristal de los diferentes tipos de sulfato de sodio, utilizando el matraz de Le Châtelier, basado en la Norma ASTM C 188-95.....	84
28.	Llenado del matraz de Le Châtelier con un volumen definido de kerosene.....	86

29.	Instalación del sistema para la determinación de la densidad del cristal del sulfato de sodio, por medio del matraz de Le Châtelier .....	87
30.	Procedimiento para la incorporación de la sal al matraz de Le Châtelier .....	88
31.	Desplazamiento de volumen de kerosene por la adición del sulfato de sodio, matraz de Le Châtelier .....	89
32.	Método de fluorescencia, para evidencia visual de las fisuras en el agregado grueso.....	91
33.	Aplicación del nitrato de plata en la superficie de las fisuras del agregado grueso.....	92
34.	Aplicación de fluoresceína sobre el nitrato de plata, en la superficie de las fisuras del agregado grueso .....	93
35.	Evidencia visual, fisuras en agregado grueso después de la aplicación de la Norma ASTM C 88-99a.....	94
36.	Gradiente de consumo de densidad diaria promedio de la solución de sulfato de sodio anhidro, grado reactivo, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a .....	111
37.	Gradiente de consumo de densidad diaria promedio de la solución de sulfato de sodio decahidratado, grado textil, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a .....	112
38.	Gradiente de consumo de densidad diaria promedio de la solución de sulfato de sodio decahidratado, proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a .....	113

39.	Comparación de gradiente de consumo de densidad diaria en base a las tres soluciones de sulfato de sodio evaluadas, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a .....	114
40.	Comparación del grado de hidratación del cristal, en función de la densidad determinada del cristal de sulfato de sodio respectivo en base a las soluciones de sulfato de sodio evaluadas, según inciso 4 ASTM C 188-95.....	117
41.	Comparación de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, en base a las soluciones de sulfato de sodio evaluadas.....	120
42.	Detalle de las fracturas generadas en el proceso de secado del agregado grueso y resaltadas mediante el uso del indicador de contraste, fluoresceína sódica y observada mediante iluminación con luz ultravioleta.....	129

## TABLAS

I.	Sulfato de sodio, fórmula y forma mineral .....	13
II.	Sulfato de sodio, propiedades físicas .....	14
III.	Solubilidad del sulfato de sodio en función de la temperatura.....	16
IV.	Composición química, grado reactivo J. T. Baker .....	17
V.	Composición química, sulfato de sodio grado USP .....	24
VI.	Sistema cristalino, según ejes y ángulos entre ejes .....	27
VII.	Sistemas cristalinos que posee el sulfato sodio, en función del grado de hidratación, con formas cristalográficas debido a su simetría.....	33

VIII.	Definición operacional de las variables para la evaluación del uso alternativo del sulfato de sodio cristalino proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO.....	47
IX.	Definición operacional y descripción de las variables dependientes .....	56
X.	Cantidad de agregado (g) por tamaño de tamiz para la realización del ensayo, según especificaciones inciso 6.3 ASTM C 88-99a .....	57
XI.	Cantidad (g) de agregado en cada contenedor.....	58
XII.	Cantidad total (g) de agregado en cada contenedor .....	59
XIII.	Selección del tamaño de tamiz para cada diferente tamaño de agregado en el contenedor respectivo, para determinar la pérdida en peso .....	66
XIV.	Formulario de resultados de la realización del ensayo de granulometría, según Norma ASTM C 88-99a.....	68
XV.	Características y propiedades del sulfato de sodio, en función del grado de hidratación .....	83
XVI.	Formato de toma de datos para la evaluación de la Norma ASTM C 136, para agregado grueso .....	95
XVII.	Formato de toma de datos para la evaluación de la Norma ASTM C 88-99a, para agregado grueso .....	96
XVIII.	Formato de toma de datos de masa de partículas de agregado grueso, como resultado de la aplicación de la Norma ASTM C 88-99a .....	96
XIX.	Formato de toma de datos para evaluación granulométrica de la Norma ASTM C 88-99a, para agregado grueso .....	97
XX.	Formato de resultados de la evaluación de la Norma ASTM C 88-99a, para agregado grueso .....	97

XXI.	Formato de toma de datos para control de límites de densidad de las diferentes soluciones de sulfato de sodio utilizadas.....	98
XXII.	Formato de toma de datos para control de masa de partículas de agregado grueso en papel filtro, después de la aplicación de la Norma ASTM C 88-99a .....	99
XXIII.	Arreglo general de un análisis de varianza de un factor, para $k$ muestras aleatorias .....	101
XXIV.	Fórmulas para el análisis de varianza del ANOVA para un solo factor.....	106
XXV.	Ecuación de regresión del gradiente de consumo de densidad diaria promedio de la solución de sulfato de sodio anhidro, grado reactivo, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a.....	115
XXVI.	Ecuación de regresión del gradiente de consumo de densidad diaria promedio de la solución de sulfato de sodio decahidratado, grado textil, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a .....	115
XXVII.	Ecuación de regresión del gradiente de consumo de densidad diaria promedio de la solución de sulfato de sodio decahidratado, proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a.....	116

XXVIII.	Comparación de las ecuaciones de regresión del gradiente de consumo de densidad diaria en base a las tres soluciones de sulfato de sodio evaluadas, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a .....	116
XXIX.	Propiedades físico-mecánicas del cristal de sulfato de sodio.....	118
XXX.	Análisis de varianza para la granulometría final del agregado grueso, en base a las soluciones de sulfato de sodio estudiadas, según inciso 9 ASTM C 88-99a.....	119
XXXI.	Comparación de las ecuaciones de regresión de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, en base a las soluciones de sulfato de sodio evaluadas.....	121
XXXII.	Análisis de varianza para la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, en base a las soluciones de sulfato de sodio estudiadas.....	121
XXXIII.	Densidades medidas para cada sal, según Norma ASTM C 188-95, y la magnitud de variación en la densidad, por efecto del proceso de deshidratación realizado a 110°C, durante 4 horas. ....	130
XXXIV.	Resultados promedio del ensayo de estabilidad volumétrica de agregados por ataque de sulfato de sodio, Norma ASTM C 88-99a, en base al Informe presentado por el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros .....	131



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>pH</b>	Acidez activa (potencial de Hidrógeno)
<b><math>\rho</math></b>	Densidad
<b>M</b>	Dureza, escala Mohs
<b>grd</b>	Gradiente de reducción de densidad
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>g</b>	Gramos
<b>H<sub>1</sub></b>	Hipótesis alternativa
<b>H<sub>0</sub></b>	Hipótesis nula
<b>h</b>	Horas
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	Micrómetro
<b>mg</b>	Miligramo
<b>mL</b>	Mililitro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>min</b>	Minuto
<b>%</b>	Porcentaje
<b>P</b>	Probabilidad
<b>F</b>	Prueba F de Fisher
<b>pulg</b>	Pulgada
<b>SSE</b>	Suma de los cuadrados de los errores
<b>SSA</b>	Suma de los cuadrados del tratamiento
<b>SST</b>	Suma total de cuadrados
<b>V</b>	Volumen



## GLOSARIO

<b>Agregado</b>	Mezcla de material inerte, grueso y fino, de granulometría variable, que constituye la fase discontinua del concreto, que en proporción ocupa aproximadamente el 75% del volumen de la unidad cúbica de concreto.
<b>Agregado grueso</b>	Es aquel material inerte y árido cuyos granos son retenidos el 100% por el tamiz de 4,75 mm (No.4) que proviene de la desintegración de las rocas. Conocido también como piedra.
<b>Agua de hidratación</b>	O llamada también agua de cristalización. Es el agua que se encuentra dentro de las redes de los cristales, pero que no se encuentra unida de manera covalente a ninguna molécula o ion.
<b>Anhidro</b>	No contiene agua en sus redes cristalinas.
<b>Cristalización</b>	Proceso por el cual a partir de un gas, un líquido o una disolución de iones, átomos o moléculas, se establecen enlaces hasta formar una red cristalina, la unidad básica de un cristal.
<b>Decahidratado</b>	Contiene diez veces agua de hidratación en sus redes cristalinas.

<b>Densidad</b>	Magnitud escalar referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia.
<b>Disgregación</b>	Desunión de las partes de un todo que era compacto o sólido.
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno, parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Se utiliza principalmente para medir la contaminación en aguas.
<b>Grado USP</b>	<i>United States Pharmacopeia</i> , son sustancias que cumplen con las especificaciones que exigen las normas de los Estados Unidos en cuanto a contenidos máximos de contaminantes que pueden ser dañinos para la salud. Son reactivos de alta pureza.
<b>Granulometría</b>	Medición y graduación de los agregados, finos y gruesos, con fines de análisis, tanto de su origen, como de sus propiedades mecánicas y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

<b>Hidratación</b>	Reacción química en la que se produce la incorporación de agua a un compuesto. Cuando se le incorpora agua a la estructura cristalina de un mineral, creando generalmente un nuevo cristal, se produce un hidrato, es decir un cristal con un nuevo grado de hidratación.
<b>Intersticio</b>	Pequeña cavidad entre las partículas o moléculas que constituyen un cuerpo sólido. Sinónimo de grieta o fisura.
<b>Norma ASTM</b>	Conjunto de normas elaboradas a partir de una necesidad identificada, por consenso de diferentes organizaciones especializadas respecto a cada uno de los temas aplicables a los materiales, productos, sistemas y servicios.
<b>Norma ASTM C</b>	Conjunto de normas enfocadas a los materiales cementantes, cerámica, concreto y mampostería.
<b>Norma ASTM C 88-99a</b>	Método de ensayo normalizado para solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.
<b>Porosidad</b>	Capacidad de un material de absorber líquidos o gases dentro de su estructura.
<b>Pureza, reactivo</b>	Porcentaje de sustancia que es homogénea en su composición molecular.

<b>Redes de Bravais</b>	Repetición de estructuras de paralelepípedos que constituyen la menor subdivisión de una red cristalina que conserva las características generales de toda la retícula, de modo que por simple traslación del mismo, puede reconstruirse el sólido cristalino completo. Combinando los 7 sistemas cristalinos con las disposiciones de los puntos de reticulares (P, F, I, R), se obtendrían 28 redes cristalinas posibles. Solo existen 14 configuraciones básicas, las otras 14 se obtienen a partir de ellas. Estas estructuras se denominan Redes de Bravais.
<b>Sistemas cristalinos</b>	En función de los parámetros de la celda unitaria, longitudes de sus lados y ángulos que forman, se distinguen siete sistemas cristalinos: cúbico, tetragonal, ortorrómbico, hexagonal, trigonal, monoclinico y triclínico.
<b>Solidez</b>	Material menos propenso a su disgregación.
<b>Sulfato de sodio</b>	Por su fórmula molecular: $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Sustancia incolora, cristalina con buena solubilidad en el agua. No tóxica.
<b>Tamiz</b>	Elemento metálico formado por marcos, tejido, deposito receptor y tapa, que se utilizan para la realización del ensayo granulométrico, cuyos tamaños de abertura de los tejidos deben pertenecer a una serie normalizada.

## RESUMEN

El presente estudio consistió en la evaluación a nivel laboratorio de la eficacia del sulfato de sodio cristalino, proveniente de dos fuentes consistentes en: sal grado textil y sal proveniente del tratamiento del residuo líquido del reactivo de análisis de la Demanda Química Oxígeno (DQO), proyecto FODECYT No. 47-2009, como reactivo alternativo para el análisis de solidez, mediante la comparación de especificaciones y cumplimiento, según Norma ASTM C 88-99a; Método de ensayo normalizado para solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, debido a que la norma refiere el uso de un sulfato de sodio grado USP, que por sus altos estándares de pureza, se maneja a un costo excesivamente alto.

Para llevar a cabo la evaluación y comparación cuantitativa del sulfato de sodio cristalino proveniente del residuo líquido de la DQO y el sulfato de sodio grado textil, se utilizó sulfato de sodio anhidro grado reactivo, como sal de referencia, debido a su similar composición química respecto a la pureza de la sal de grado USP.

Para poder realizar dicha comparación, se utilizó un agregado grueso del mismo lote y procedencia, con granulometría según especificaciones inciso 6.3 ASTM C 88-99a, para determinar el comportamiento de las sales evaluadas.

El procedimiento analítico se realizó según inciso 8 ASTM C 8-99a, que indica la imbibición del agregado en la solución de las diferentes sales evaluadas, seguido de un secado en horno, repitiendo cada ciclo (imbibición-secado), cinco veces.

Se tomaron como parámetros de control; la densidad y el potencial de Hidrógeno (pH) de la solución del sulfato de sodio cristalino, el grado de hidratación del cristal (anhidro y decahidratado) y estructura cristalina, ambos en función de la densidad; de cada una de las sales evaluadas.

El examen cuantitativo del agregado grueso, en base a la granulometría inicial, se efectuó según inciso 9 ASTM C 8-99. Se realizó la granulometría del agregado grueso después del ciclo final, para cuantificar la pérdida en peso, por el efecto mecánico que genera la sal anhidra absorbida-adsorbida en el mismo. Como complemento a este análisis, se midió la gravimetría de las partículas desprendidas de agregado grueso, debido a la fracturación que sufría este en cada ciclo de contacto sal-agregado.

Con los resultados obtenidos, se concluyó que no existe diferencia significativa en utilizar cualquiera de las tres sales evaluadas, debido a que se cumplen con los requerimientos necesarios para utilizarse como la sal de ensayo, en base al cumplimiento de los requisitos de la Norma ASTM C 88-99a referente.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar la eficacia, como reactivo alternativo para el análisis de solidez, en base a la Norma ASTM C 88-99a, del sulfato de sodio cristalino proveniente del tratamiento del residuo líquido del reactivo de análisis de la DQO.

### **Específicos**

1. Evaluar el comportamiento de la densidad de la solución de sulfato de sodio de las diferentes sales utilizadas, según inciso 5.1 ASTM C 88-99a.
2. Evaluar la densidad del cristal iónico de sulfato de sodio de las diferentes sales utilizadas, según procedimiento referido en inciso 4 ASTM C 188-95, en función de su grado de hidratación.
3. Evaluar los resultados de la granulometría final del agregado grueso, según incisos 8.3, 8.4 y 9 ASTM C 88-99a, en función de los diferentes tipos de sales de sulfato de sodio estudiadas, y con base al análisis gravimétrico en función de los ciclos respectivos, mediante un análisis de varianza.

## **Hipótesis**

### **Científica**

Es posible utilizar el sulfato de sodio refinado, proveniente del residuo líquido del análisis de la DQO, como reactivo alternativo para realizar el ensayo normalizado para solidez de los agregados, mediante la intercomparación con sales de referencia.

### **Estadística**

- **Hipótesis nula ( $H_0$ )**

El uso alternativo del sulfato de sodio grado textil y sulfato de sodio proveniente del residuo líquido del tratamiento de la DQO, con respecto al sulfato de sodio grado reactivo, no produce un efecto significativo en los resultados de los análisis granulométricos realizados al agregado después del último ciclo.

- **Hipótesis alternativa ( $H_1$ )**

El uso alternativo del sulfato de sodio grado textil y sulfato de sodio proveniente del residuo líquido del tratamiento de la DQO, con respecto al sulfato de sodio grado reactivo, produce un efecto significativo en los resultados de los análisis granulométricos realizados al agregado después del último ciclo.

## INTRODUCCIÓN

Debido al gran impacto ambiental que produce el desecho de reactivos químicos, se ha visto como un deber, como ingenieros químicos, de buscar métodos y procedimientos para atenuar este foco de contaminación, como son los desechos de los reactivos de los laboratorios analíticos e industriales.

Por lo tanto, por medio de este estudio, se propuso aprovechar el sulfato de sodio, producto del Proyecto FODECYT No.47-2009; Evaluación de la técnica de tratamiento del desecho líquido del análisis instrumental de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) generado por laboratorios analíticos guatemaltecos, para atenuar el impacto ambiental.

Actualmente el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros, del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), realiza el ensayo de solidez, mediante la aplicación de la Norma ASTM C 88-99a; Método de ensayo normalizado para solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, utilizando un sulfato de sodio grado textil. Por lo que se propuso realizar una evaluación del cumplimiento de uso de las sales, anteriormente referidas por esta norma, para verificar cumplimiento en la especificación de alta pureza (grado USP), utilizando como sal de referencia sulfato de sodio anhidro grado reactivo.

Para la ejecución del proyecto de evaluación alternativa de la sal especificada en norma, se realizó una intercomparación de propiedades claves resultantes de las soluciones salinas, de los cristales de las sales y del agregado grueso a estudiar, mediante las especificaciones que dicta la Norma ASTM C 88-99a, para evaluar la solidez de agregados.

El procedimiento normalizado, consiste en la imbibición del agregado grueso en una solución saturada de sulfato de sodio, la cual será absorbida-adsorbida por el agregado. Mediante deshidratado a 110 grados Celsius, la sal cristaliza variando desde su contenido de agua de composición  $\text{-Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O-}$ , hasta alcanzar su composición de cristal anhidro. Así al incrementarse la densidad del cristal iónico de la sal, esta desarrolla en los intersticios del agregado grueso, esfuerzos mecánicos que fragmentan la estructura de la piedra (agregado grueso). Debido a que el ensayo de solidez se realiza mediante repeticiones del mismo tratamiento, este permite establecer por gravimetría de las fracciones clasificadas por granulometría del agregado grueso, el grado de solidez que este posee.

# 1. MARCO CONCEPTUAL

## 1.1. Antecedentes

Dentro de la ingeniería química y la ingeniería civil, se han realizado estudios y proyectos que se apoyan mutuamente en el desarrollo de pruebas y ensayos orientados a los materiales de construcción y en este caso, en el estudio y caracterización de los agregados.

Las principales investigaciones realizadas sobre el tema son:

- En 1970, César Palencia realizó el proyecto titulado: Los materiales en la construcción tecnología y ensayos. El proyecto desarrolló un manual para uso general en la rama de la construcción, donde las personas interesadas pudieran obtener información sobre los principales materiales de construcción en Guatemala, en lo que se refiere a su fabricación, ensayos e interpretación de los mismos.

En su estudio explica que los agregados se pueden clasificar según su origen, tamaño, forma y reactividad. Dentro de este manual, como parte de la clasificación de los minerales, se encontró la determinación de la granulometría de los agregados. Este análisis granulométrico consiste en separar y conocer los porcentajes de tamaño del agregado a utilizar. El agregado debe tener una graduación dada de acuerdo con su tamaño máximo y dentro de los límites fijados por las especificaciones ASTM C 33.

También como parte de los ensayos a realizarle a los materiales minerales, se utilizó el método estándar de ensayo para desgaste de agregados por uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, ASTM C 88-99a. Este método ensaya los agregados para determinar su resistencia a la disgregación, por soluciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. Este ensayo proporciona información valiosa para juzgar la dureza de los agregados sujetos a la acción de la intemperie.

- En 2003, Francisco Ecuté y Emilio Beltranena realizaron el proyecto denominado: Evaluación y variabilidad de las propiedades de los agregados de dos plantas, una en Escuintla y la otra en Tecún Umán. El proyecto desarrolló un análisis de las propiedades de los agregados de río de dos plantas trituradoras ubicadas en Tecún Umán, San Marcos y en la cabecera departamental de Escuintla.

Parte fundamental para el análisis de los resultados, es la realización de los ensayos, según procedimientos de las normas ASTM, e índices de aceptación de calidad. Para la determinación de la variación de las características físico-mecánicas de los agregados naturales, se realizaron varios ensayos, entre ellos: la estabilidad de agregados en solución de sulfato de sodio.

Esta norma comprueba la capacidad del agregado en su resistencia a la disgregación por medio de la inmersión en solución de sulfato de sodio y secado en horno durante cinco ciclos, calculándose luego el porcentaje de pérdida de peso. También es llamado como estabilidad volumétrica de agregados finos y gruesos y el procedimiento se indica en la Norma ASTM C 88-99a.

El límite de aceptación para dicho ensayo, es hasta el 12 por ciento de desgaste. El agregado que sobrepase este límite, no debe ser usado en exposiciones ambientales severas como el congelamiento, o acciones agresivas severas, como las aguas o suelos que contienen sulfatos.

- En 2004, Evelyn Ortíz y Vinicio Castañeda realizaron el proyecto denominado: Calidad de agregados producidos en Guatemala. El proyecto hace una descripción teórica de la definición, clasificación, formación, composición y las propiedades de los agregados. Se mencionan también las especificaciones utilizadas para el control de calidad en la producción de agregados, establecidas en la Norma ASTM C 33. Se utilizó para verificar la calidad de los agregados gruesos y finos, lo que constituyó la parte práctica del estudio.

Entre las normas utilizadas en el laboratorio para el control de calidad de los agregados pétreos, se encontró la norma de estabilidad de los agregados mediante el uso del sulfato de sodio o sulfato de magnesio ASTM C 88-99a. Este método ensaya la determinación de la desintegración que sufren los agregados minerales, mediante soluciones de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. Simula la acción destructiva de la congelación y deshielo a la que algunos agregados son vulnerables cuando están empapados de agua.

Este comportamiento suministra la información necesaria para juzgar la dureza o solidez de los agregados sujetos a la acción del clima. Este método se aplica a todos los agregados minerales que se utilizan en la elaboración de morteros, concreto y mezclas asfálticas.

- En 2006, Carlos Fuentes y Virgilio Ayala realizaron el proyecto denominado: Materiales de construcción en Guatemala y su aplicación actual. El proyecto hace una descripción teórica integral de las propiedades y características de los materiales utilizados en la construcción, con énfasis en los utilizados en Guatemala.

Da criterios para establecer requerimientos de los materiales, definir la calidad de los mismos y formular especificaciones, incluyendo conocimientos del proceso de normalización.

- En 2009, Sergio López y Dilma Mejicanos realizaron un proyecto denominado: Determinación de las características: físicas, mecánicas, químicas y petrográficas de agregados, extraídos del río Samalá, del municipio de San Sebastián, Retalhuleu y del río San Miguel Panán, del municipio de San Miguel Panán, Suchitepéquez, para su uso en la industria del concreto. Para el análisis de las propiedades físicas del agregado, se utilizó la Norma ASTM C 33 que especifica los requisitos generales que debe llenar un agregado.

Las propiedades mecánicas y químicas de los agregados se determinaron por medio de varias normas, entre ellas: la Norma ASTM C 136, que hace referencia a la granulometría de un agregado, ya sea grueso o fino; la Norma ASTM C 33 que hace referencia a los requerimientos específicos de los agregados gruesos para cada número de tamiz; la Norma ASTM C 88 que hace referencia a la dureza de los agregados por el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

Esto se logra sumergiendo la muestra en soluciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, seguido de un secado al horno para secar total o parcialmente la sal en los espacios permeables de los intersticios del agregado grueso. Proporciona una información valiosa para juzgar la dureza de los agregados sujetos a la acción de la intemperie. Este método provee un procedimiento para hacer una estimación preliminar de la calidad de los agregados. Los valores obtenidos pueden ser comparados en la especificación de la Norma ASTM C 33, que fue diseñada para indicar las características apropiadas que deben tener los agregados.

En el afán de reducir el impacto ambiental que generan los residuos químicos, a partir de la utilización de reactivos químicos altamente contaminantes, se han elaborado y desarrollado proyectos que proponen a través de procedimientos fisicoquímicos la reducción de estos agentes contaminantes.

La principal investigación y la base de este proyecto de investigación:

- En 2009, Ingrid Benítez y César García con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT), el Fondo para el Desarrollo Científico y Tecnológico (FODECYT), el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACYT), conjuntamente con el Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) y el Laboratorio de Análisis Fisicoquímicos (LAFIQ), presentaron el proyecto No. 47-2009, denominado: Evaluación de la técnica de tratamiento del desecho líquido del análisis instrumental de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) generado por laboratorios analíticos guatemaltecos, para atenuar el impacto ambiental.

Este proyecto consistió en el desarrollo de una técnica de tratamiento del desecho líquido y separar los metales pesados, cromo, mercurio y plata de los desechos líquidos provenientes de los análisis de la DQO generados por los laboratorios analíticos guatemaltecos. Debido a las altas concentraciones de metales pesados que posee el reactivo utilizado y, además de la alta acidez debida al medio acuoso de ácido sulfúrico en que se encuentra, los residuos de los análisis de la DQO presentan un especial problema para su descartado después de realizado el análisis.

Los metales cromo y mercurio, son los de mayor impacto contaminante y la plata en menor grado, por dicha razón el trabajo de investigación se orientó hacia la separación de los elementos metálicos presentes en los paquetes de reactivos analíticos comerciales utilizados en este proceso de análisis instrumental de la DQO por los laboratorios guatemaltecos y que después del análisis respectivo, constituyen el desecho líquido objeto de estudio.

Se desarrolló una metodología adecuada de trabajo, que consistió en el proceso de tratamiento del desecho líquido, desde la recolección de los paquetes de viales usados en los análisis de la DQO, la reducción, precipitación y neutralización de los metales, y la cristalización del producto, hasta el diseño del proceso de tratamiento del residuo del análisis de la DQO.

Como producto de este tratamiento, se obtuvo un sulfato de sodio cristalizado, con una hidratación indeterminada, con impurezas de metales pesados, como cromo y mercurio; que posteriormente se refinó con una solución saturada de zinc para la obtención de un cristal de sulfato de sodio reutilizable.

La presente investigación, se desarrolló en base a la Norma ASTM C 88-99a; método de ensayo normalizado para solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, con el fin de proponer como reactivo alternativo el sulfato de sodio cristalino recuperado, proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, mediante la comparación de las especificaciones de la norma respecto a sales de referencia.

Con base en los antecedentes mencionados anteriormente, este es el primer proyecto que propone el uso de un sulfato de sodio alternativo de diferente grado de pureza para la realización del ensayo, al grado de la sal que la norma refiere.

## **1.2. Justificación**

La metodología de reducción-precipitación propuesta en el proyecto FODECYT No. 47-2009; evaluación de la técnica de tratamiento del desecho líquido del análisis instrumental de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) generado por laboratorios analíticos guatemaltecos, para atenuar el impacto ambiental, permitió minimizar las características peligrosas de este residuo líquido, en específico metales pesados como plata, cromo y mercurio.

Posteriormente se logró recuperar como uno de los subproductos, un líquido sobresaturado de sulfatos, se cristalizó, y se obtuvo cristales con una hidratación indeterminada. Estos cristales se refinaron por medio de un tratamiento con una solución saturada de zinc, blanqueándolos y recristalizándolos, con lo que se obtuvo cristales de sulfato de sodio reutilizables.

Estos cristales de sulfato de sodio, son propuestos como reactivo alternativo de uso para la comparación y evaluación por medio de las especificaciones de la Norma ASTM C 88-99a; método de ensayo normalizado para solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, que refiere el uso de un sulfato de sodio grado USP que tiene un costo excesivamente alto por ser un reactivo de grado analítico.

Actualmente el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros, del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), realiza este ensayo utilizando un sulfato de sodio grado textil, por lo que este proyecto se enfocó en la evaluación del sulfato de sodio anhidro grado reactivo, grado textil y el sulfato de sodio cristalino proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, como reactivos alternativos al sulfato de sodio grado USP que propone la norma mediante la comparación de su cumplimiento.

### **1.3. Determinación del problema**

Como punto de partida para el desarrollo del presente trabajo de investigación, fue necesario identificar en forma precisa el objeto de estudio, es decir, la problemática a solucionar.

#### **1.3.1. Definición**

El Laboratorio de Análisis Físicoquímicos de la Sección de Química Industrial, como el Laboratorio de Aglomerantes, Concretos y Morteros, desempeñan un rol importante en la búsqueda del desarrollo sostenible a través de la investigación por parte del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII).

Debido a que la gestión de la calidad, el cumplimiento de los parámetros de las normas de trabajo y la reducción del impacto ambiental, guían de manera fundamental el trabajo realizado en cada uno de estos laboratorios y este proyecto de investigación, se le ha dado gran importancia a atenuar el impacto ambiental que producen los agentes contaminantes, como los residuos químicos, por lo que se ha visto en la necesidad de plantear metodologías que reduzcan estas características peligrosas e incluso tóxicas de los desechos.

Como se mencionó anteriormente, por medio del proyecto: evaluación de la técnica de tratamiento del desecho líquido del análisis instrumental de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) generado por laboratorios analíticos guatemaltecos, para atenuar el impacto ambiental, se logró desarrollar una técnica de tratamiento para separar los metales pesados, cromo, mercurio y plata, de los desechos líquidos provenientes de los análisis de la DQO.

Por cada caja que contenía 100 tubos de ensayo, llenos de este desecho líquido, se logró recuperar aproximadamente 1 kilogramo de sulfato de sodio cristalino, posteriormente refinado. Por lo que se buscó la forma de aprovechar este sulfato como reactivo alternativo.

Este proyecto se enfocó en la evaluación del sulfato de sodio anhidro grado reactivo, como sal de referencia; el sulfato de sodio cristalino, proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, como reactivo alternativo; y el sulfato de sodio grado textil, que actualmente en el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros, se utiliza como sal de análisis, como segunda alternativa al sulfato de sodio grado USP que propone la norma.

De esta manera, se pretende mejorar la competencia técnica del laboratorio y garantizar la conformidad de los resultados experimentales para cada uno de los interesados que soliciten este método de ensayo, con el respaldo de que por medio de este estudio se concluyó que el sulfato de sodio grado textil, se puede utilizar como reactivo alternativo a lo establecido en la norma.

La demanda de los ensayos que se realizan en este laboratorio, es uno de los principales motivos para proporcionar un ensayo eficaz que permita darse a conocer en el mercado por su credibilidad.

### **1.3.2. Alcances y límites del problema**

Los alcances y límites del problema, determinan hasta qué punto será desarrollado el objeto de estudio, qué tanto se pretende abarcar y qué se dejará sin examinar en la investigación, es decir; establecen las fronteras del trabajo.

#### **1.3.2.1. Alcances**

La evaluación de la capacidad del sulfato de sodio cristalino, proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO y el sulfato de sodio grado textil, para ser utilizados como reactivos alternativos, se determinó por medio de parámetros de control, físicos y químicos. Estos fueron la densidad de la solución de cada una de las sales evaluadas, debido a exigencia de la norma en el inciso 5.1 ASTM C 88-99a, el grado de hidratación del cristal de cada una de las sales evaluadas, la granulometría final del agregado grueso según inciso 9 ASTM C 88-99a y el análisis gravimétrico de las partículas del agregado generadas por la disgregación del mismo.

A partir de esta evaluación, se concluyó el correcto uso del sulfato de sodio grado textil en el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros, para la elaboración de los ensayos bajo la Norma ASTM C 88-99a.

El Laboratorio de Análisis Físicoquímicos será el encargado de preparar la solución saturada de sulfato de sodio según el inciso 5.1.1. ASTM C 88-99a.

### **1.3.2.2. Límites**

Las principales limitaciones con las que se contó, fueron los recursos materiales y económicos.

Los recursos materiales, el espacio físico, los equipos y la mayor parte de la cristalería son utilizados para docencia por la Escuela de Ingeniería Química y para diversos análisis por el Laboratorio de Análisis Físicoquímicos de la sección de Química Industrial y también del Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros, del Centro de Investigaciones de Ingeniería, por lo que fue necesario coordinar su uso, para no interferir con los horarios de docencia o ensayos de laboratorio.

Debido a la ausencia de material y reactivos para los análisis, fue necesario comprarlos, lo que representó un costo adicional.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Sulfato de sodio

El sulfato de sodio o sulfato sódico, es una sustancia incolora, cristalina con buena solubilidad en el agua y mala solubilidad en la mayoría de los disolventes orgánicos con excepción de la glicerina.

Figura 1. Sulfato de sodio anhidro



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

La estructura química y mineral varían en función del grado de hidratación.

Tabla I. Sulfato de sodio, fórmula y forma mineral

Grado de hidratación	Fórmula	Forma mineral
Anhidro	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	Thenardita
Decahidratado	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Mirabilita

Fuente: JONES, A. G. Crystallization Process Systems. p. 217.

### 2.1.1. Identificadores

Este identificador o número de registro *Chemical Abstracts Service* (CAS) se le asigna a cada compuesto químico que ha sido descrito en la literatura para mantener una base de datos de cada uno de los compuestos, facilitando su identificación.

Número CAS: 7757-82-6 (anhidro)  
7727-73-3 (decahidratado)

### 2.1.2. Propiedades físicas

Las propiedades físicas pueden ser generales (masa, volumen, color y textura) o específicas (densidad, peso específico, punto de ebullición, punto de fusión y dureza).

Tabla II. Sulfato de sodio, propiedades físicas

SULFATO DE SODIO					
Estado de agregación: sólido					
Apariencia: sólido cristalino blanco					
Grado de hidratación	Fórmula	Masa molecular (g/mol)	Densidad (g/mL)	Punto de fusión (°C)	Dureza (escala Mohs)
Anhidro	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	142,040	2,720	884	2,500
Decahidratado	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> • 10H <sub>2</sub> O	322,200	1,464	32	1 ½ - 2

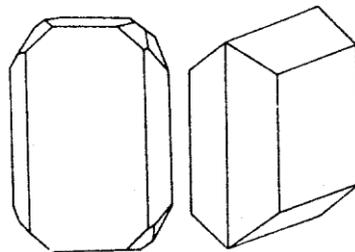
Fuente: JONES, A. G. Crystallization Process Systems. p. 217.

### 2.1.3. Estructura cristalina del sulfato de sodio

Se identificó que la estructura cristalina del sulfato de sodio, independientemente del tipo de sal utilizada, varía en función del grado de hidratación del cristal.

Figura 2. **Estructura cristalina del sulfato de sodio anhidro**

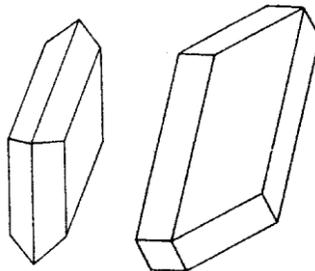
Ortorrómbico piramidal, centrado en el cuerpo



Fuente: [www.pt.goldenmap.com](http://www.pt.goldenmap.com). Consulta: 26 de agosto de 2013.

Figura 3. **Estructura cristalina del sulfato de sodio decahidratado**

Monoclínico prismático, centrado en el cuerpo



Fuente: [www.pt.goldenmap.com](http://www.pt.goldenmap.com). Consulta: 26 de agosto de 2013.

#### 2.1.4. Datos fisicoquímicos

La solubilidad de cualquier reactivo, es sensible a los cambios de temperatura. Esto ocurre debido a que las constantes de solubilidad, como otros tipos de constantes de equilibrio, son función de la temperatura. De acuerdo con el principio de Le Châtelier, cuando el proceso de disolución, es endotérmico (se absorbe calor) la solubilidad aumenta con la temperatura, pero cuando el proceso es exotérmico (se libera calor) la solubilidad disminuye con la temperatura.

Tabla III. **Solubilidad del sulfato de sodio en función de la temperatura**

Temperatura (°C)	Solubilidad (g/100mL)
0	4,760
100	42,700

Fuente: JONES, A. G. Crystallization Process Systems. p. 217.

#### 2.1.5. Composición química

La composición química se refiere a las sustancias que están presentes en una determinada muestra y en qué cantidades. Generalmente estas cantidades están dadas en ppm, que se refiere a la cantidad de unidades de la sustancia que hay por cada millón de unidades del conjunto.

Tabla IV. **Composición química, grado reactivo J. T. Baker**

<b>Composición</b>	<b>Anhidro</b>	<b>Hidratado</b>
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , %	>99	>99
Insolubles, ppm	100	--
Cloruro, ppm	450	200
Fosfato, ppm	200	100
Nitr. Total, ppm	50	50
Arsénico, ppm	5	2
Magnesio, ppm	200	100
Calcio, ppm	450	200
Potasio, ppm	100	20
Hierro, ppm	90	40

Fuente: etiqueta recipiente, reactivo sulfato de sodio grado analítico J. T. Baker.

### **2.1.6. Informe de riesgos y explosión**

A continuación se presenta el informe de riesgos y explosión del sulfato de sodio, debido a la importancia de conocer los peligros a los que se expone al manipular dicha sal.

- Peligro general: no se considera peligroso bajo condiciones de fuego. No es inflamable ni explosivo, pero puede explotar si se funde con aluminio.
- Control de incendios: para controlar incendios usar polvo químico seco, CO<sub>2</sub>, rocío de agua o espuma química.
- Productos de descomposición bajo condiciones de fuego: óxidos de azufre y sodio.

### **2.1.7. Informe de riesgos en la salud**

A continuación se presenta el informe de riesgos en la salud, al manipular directamente el sulfato de sodio, debido a la importancia de conocer los peligros a los que se expone, al utilizar dicha sal como reactivo de ensayo.

- Contacto con los ojos: no presentan efectos adversos, pero el polvo puede causar irritación mecánica. Lavar inmediatamente con agua en abundancia durante mínimo 15 minutos, manteniendo los párpados separados para asegurar un lavado de la superficie completa del ojo. Obtenga atención médica si se desarrolla una irritación.
- Contacto con la piel: no tiene efectos adversos sobre la piel. Lavar con gran cantidad de agua y jabón el área afectada. Obtenga atención médica si se desarrolla alguna irritación.
- Inhalación: se espera no sea peligroso para la salud y no requerir medidas de primeros auxilios.
- Ingestión: ligeramente tóxico por ingestión. Entre los síntomas se incluyen acción purgante, pérdida de fluidos y sangre en las heces, descenso de la presión sanguínea y elevados niveles de sodio en la sangre. Tomar grandes cantidades de agua o algunos vasos de leche para diluir. Si ha ingerido en grandes cantidades, obtenga atención médica.

### **2.1.8. Informe sobre estabilidad y reactividad**

A continuación se presenta el informe de la estabilidad y reactividad del sulfato de sodio, debido a la importancia de conocer los peligros a los que se expone al manipular dicha sal.

- Estabilidad: estable en condiciones normales.
- Condiciones a evitar: humedad, aire, productos incompatibles.
- Polimerización peligrosa: no ocurre.
- Incompatibilidades: el sulfato de sodio en combinación con aluminio y magnesio, explotará a 800 grados Celsius. Ácidos minerales, bases fuertes.

### **2.1.9. Otros datos**

El sulfato de sodio decahidratado, se disuelve en el agua bajo enfriamiento de la solución por efecto entrópico. La sal deshidratada, sin embargo, libera energía (exotérmica) al hidratarse y disolverse. Al enfriarse una solución saturada a menudo, se observa sobresaturación.

### **2.1.10. Aplicaciones**

El sulfato de sodio anhidro tiene propiedades higroscópicas y por lo tanto es utilizado como desecante en el laboratorio o la industria química. Se utiliza en la fabricación de la celulosa y como aditivo en la fabricación del vidrio.

También se le añade a los detergentes para mejorar su comportamiento mecánico. Se utiliza como desinfectante. Tiene utilidad en toxicología como acelerador del tránsito intestinal (catártico), junto con la administración de carbón activado, para disminuir la absorción de intestinal de tóxicos ingeridos.

#### **2.1.11. Síntesis**

Actualmente la mayor parte del sulfato de sodio, se obtiene de minas de glauberita y de la explotación de lagos salados, siendo los principales productores las provincias de Jiangsu y Sichuan en China. También se obtiene como subproducto en muchos procesos industriales donde se neutraliza el ácido sulfúrico con bases de sodio.

#### **2.1.12. Analítica**

El sodio se determina comúnmente por su emisión de luz amarilla en la llama. El sulfato se suele determinar precipitándolo como sulfato de bario, por medio del test de cloruro de bario.

#### **2.1.13. Almacenamiento y manejo**

A continuación se presentan recomendaciones de almacenamiento y manejo del sulfato de sodio, debido a la importancia de conservar dicha sal en las mejores condiciones, para la realización de los ensayos.

- Guarde en recipientes herméticamente cerrados, evitando daños físicos.
- Evite absorción de humedad y contaminación.
- Almacene en un lugar fresco, seco, bien ventilado, evitando la luz del sol.
- Observe todos los avisos de precaución sugeridos para el producto.

- Instale avisos de precaución donde se informe los riesgos y la obligación de usar equipos de protección personal (guantes y mascarillas).

#### **2.1.14. Sistema de clasificación de riesgo**

A continuación se presenta el sistema de clasificación de riesgo del sulfato de sodio, debido a la importancia de conocer el nivel de peligro al que se expone al manipular dicha sal.

- Riesgos en salud: ligero
- Inflamabilidad: mínimo
- Reactividad: mínimo
- Riesgo al contacto: ligero

#### **2.2. Grado de pureza de los reactivos**

Las sustancias y reactivos químicos producidos por la industria química y farmacéutica, pueden contener una cierta cantidad de impurezas, tales como metales pesados, inertes y otros. La calidad de impurezas halladas en estas sustancias y reactivos químicos, determina una clasificación particular de las mismas.

Se puede concluir entonces que la calidad esta íntimamente relacionada con el grado de pureza, el que deberá ser informado en sus etiquetas.

Según este, las sustancias y reactivos químicos se pueden clasificar del siguiente modo:

Ordenados de menor a mayor pureza:

- Grado industrial: se utiliza en procesos de manufactura y tiene un grado muy bajo de pureza (grado textil).
- Grado técnico: se utiliza generalmente para hacer pruebas a nivel de laboratorio industrial.
- Grado químicamente puro o purificado (QP): son grados que se utilizan para denominar a los productos de una pureza inferior a los de grado reactivo.
- Grado farmacéutico y alimenticio (USP o BP): grado *United States Pharmacopeia* (USP) o *British Pharmacopeia* (BP). Las instituciones encargadas de la vigilancia de la salud en todos los países, han establecido normas estrictas para la utilización de materias primas para la producción y envasado de alimentos y medicamentos. Estas normatividades son universalmente aceptadas. La farmacopea más difundida es la americana (USP) y las sustancias que se ajustan a esta son aceptadas y reconocidas oficialmente. Son reactivos de alta pureza.
- Grado reactivo analítico (ACS/RA/PA): son aquellos productos que cumplen con las normas de la *American Chemical Society* (ACS), son las más frecuentemente utilizadas, y cuando una empresa confiable hace referencia a ellas, es garantía de su funcionalidad en el laboratorio.

- Grado *High Purity Liquid Chromatography* (HPLC): los productos que se encuentran clasificados como HPLC, son aptos para su uso en cromatografía líquida de alto desempeño. Tienen un grado de confiabilidad tal que se les puede dar un uso desde didáctico para estudiantes, hasta en laboratorios que contengan sistemas de análisis de altísima productividad. Son los reactivos con el máximo grado de pureza.

### **2.3. Sulfato de sodio decahidratado, grado textil**

Una de las aplicaciones más importantes del sulfato de sodio, es en el teñido de los textiles. Para este fin, se utiliza un sulfato de sodio grado industrial, que en la industria es llamado sulfato de sodio grado textil.

Cuando el algodón o la lana son teñidos con colores ácidos a temperaturas cercanas al punto de ebullición, en el baño de tinturas el sulfato de sodio puede equivaler hasta un 5 a 10 por ciento del peso de la fibra introducida. Al teñir con colores más oscuros, se utiliza más sulfato de sodio en comparación con colores más claros.

El sulfato de sodio ayuda a una mejor distribución del tinte en la fibra, permitiendo un tinte más diluido pero igual de resistente, formando una solución con enlaces iónicos más uniforme. Usualmente incrementa la solubilidad del tinte en la mezcla, pero en presencia de las telas, ayuda a eliminar sales del colorante y obtener mejores enlaces con la fibra. Puede ser mezclado con tintes concentrados antes de añadirlo a la cuba para ser más fácilmente cuantificado.

El sulfato de sodio es menos corrosivo para los equipos y maquinarias que la sal u otros solutos usados en el pasado para propósitos similares.

En aplicaciones de la industria textil, el sulfato de sodio con alta pureza es preferido para evitar introducir otros agentes colorantes e interferir con el teñido. Generalmente se trata de un sulfato de sodio de una pureza del 98 por ciento.

#### 2.4. Sulfato de sodio anhidro, grado USP

Como se mencionó con anterioridad, los reactivos grado USP, son reactivos de alta pureza. Según el catalogo USP (enero - febrero 2012), que se encuentra en su página oficial: [www.usp.org](http://www.usp.org), donde nombra en su listado de referencias estándar USP y sustancias auténticas, un sulfato de sodio anhidro, Cat No. 1614807, con una pureza del 99,800 por ciento (seco) y un costo de 204 dólares por 1 gramo.

Según la Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos:

Tabla V. **Composición química, sulfato de sodio grado USP**

<b>Composición</b>	<b>Anhidro</b>	<b>Hidratado</b>
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , %	>99	>99
Insolubles, ppm	100	--
No más de		
Cloruro, ppm	450	200
Arsénico, ppm	5	2
Magnesio, ppm	200	100
Calcio, ppm	450	200
Potasio, ppm	100	20
Hierro, ppm	90	40
Metales pesados, ppm	45	10

Fuente: SECRETARÍA DE LA SALUD. Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos. Volumen 1, p 711.

## **2.5. Sulfato de sodio cristalino proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO**

La metodología de reducción-precipitación propuesta en el proyecto FODECYT No. 47-2009; evaluación de la técnica de tratamiento del desecho líquido del análisis instrumental de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) generado por laboratorios analíticos guatemaltecos, para atenuar el impacto ambiental, permitió minimizar las características peligrosas de este residuo líquido, en específico metales pesados como plata, cromo y mercurio.

Se recuperó como uno de los subproductos, un líquido sobresaturado de sulfatos, que posteriormente fue cristalizado a temperatura ambiente. Este sulfato de sodio se refinó con una solución saturada de zinc, se blanqueó y se recristalizó. A partir de eso, se obtuvo un sulfato de sodio cristalino reutilizable.

Dicho sulfato de sodio, se utilizó en este proyecto de investigación como objeto de estudio para determinar su uso como reactivo alternativo al que propone la Norma ASTM C 88-99a.

Figura 4. **Cristales de sulfato de sodio provenientes del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

## 2.6. **Cristalización**

Es la operación de separación de uno o varios de los componentes de una disolución líquida o fundido por contacto con la fase sólida generada a partir de aquella. Se ha de recordar que los cristales se agrupan según su naturaleza en tipos, como se indica a continuación:

- Cristales metálicos
- Cristales iónicos. Redes iónicas
- Cristales covalentes o de valencia
- Cristales moleculares
- Cristales semiconductores

Con respecto a los sistemas cristalinos, estos pueden ser 7:

- Cúbico, regular, octaédrico o isométrico: cubo.
- Tetragonal, cuadrático o piramidal: prisma oblicuo de base rómbica.
- Rómbico, ortorrómbico, prismático, isoclínico o trimétrico: prisma recto de base rómbica
- Monoclínico, clinorrómbico o monosimétrico: prisma oblicuo de base rómbica.
- Triclínico, amórtico o asimétrico: poliedros con tres aristas que forman ángulos desiguales entre sí de 30, 60 y 90 grados.
- Romboédrico o trigonal: poliedro de caras rómbicas. Tres ejes iguales formando ángulos iguales entre sí de 120 grados.
- Hexagonal: prisma recto de base hexagonal.

Donde:

Tabla VI. **Sistema cristalino, según ejes y ángulos entre ejes**

No.	Sistema cristalino	Ejes	Ángulos entre ejes
1.	Cúbico	$a=b=c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
2.	Tetragonal	$a=b\neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
3.	<b>Ortorrómbico</b>	<b><math>a\neq b\neq c\neq a</math></b>	<b><math>\alpha=\beta=\gamma=90^\circ</math></b>
4.	Hexagonal	$a=b\neq c$	$\alpha=\beta=90^\circ; \gamma=120^\circ$
5.	Trigonal (o Romboédrica)	$a=b=c$	$\alpha=\beta=\gamma\neq 90^\circ$
6.	<b>Monoclínico</b>	<b><math>a\neq b\neq c\neq a</math></b>	<b><math>\alpha=\gamma=90^\circ, \beta\neq 90^\circ</math></b>
7.	Triclínico	$a\neq b\neq c\neq a$	$\alpha\neq\beta\neq\gamma$ $\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$

Fuente: [www.wikitecno.wikispaces.com/TI\\_Sistemas+cristalinos](http://www.wikitecno.wikispaces.com/TI_Sistemas+cristalinos). Consulta: 26 de agosto de 2013.

### 2.6.1. Redes de Bravais

Las Redes de Bravais o celdas unitarias, son paralelepípedos que constituyen la menor subdivisión de una red cristalina que conserva las características generales de toda la retícula, de modo que por simple traslación del mismo, puede reconstruirse el sólido cristalino completo.

En función de los parámetros de la celda unitaria, longitudes de sus lados y ángulos que forman, se distinguen los 7 sistemas cristalinos.

Para determinar completamente la estructura cristalina elemental de un sólido, además de definir la forma geométrica de la red, es necesario establecer las posiciones en la celda de los átomos o moléculas que forman el sólido cristalino; lo que se denominan puntos reticulares.

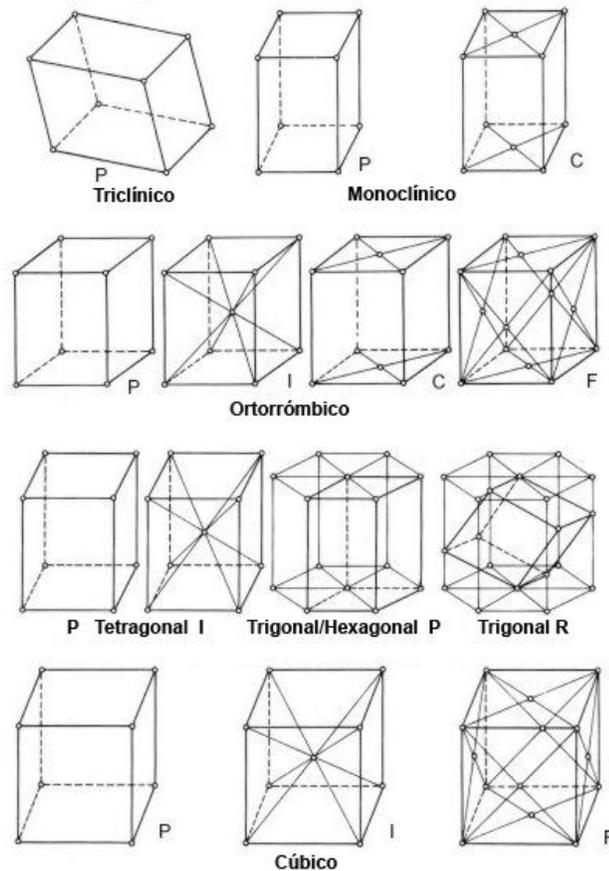
Las alternativas son las siguientes:

- P: celda primitiva o simple (CS), en la que los puntos reticulares son sólo los vértices del paralelepípedo.
- F: celda centrada en las cara (CCC), que tiene puntos reticulares en las caras, además de en los vértices. Si sólo tienen puntos reticulares en las bases, se designan con las letras A, B o C según sean las caras que tienen los dos puntos reticulares.
- I: celda centrada en el cuerpo (CC) que tiene un punto reticular en el centro de la celda, además de los vértices.
- R: primitiva con ejes iguales y ángulos iguales o hexagonal doblemente centrada en el cuerpo o hexagonal compacta (HC), además de los vértices.

Combinando los 7 sistemas cristalinos con las disposiciones de los puntos de red mencionados, se obtendrían 28 redes cristalinas posibles. En realidad, como puede demostrarse, sólo existen 14 configuraciones básicas, pudiéndose el resto obtener a partir de ellas.

Estas estructuras se denominan Redes de Bravais:

Figura 5. **Redes de Bravais**



Fuente: [http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte\\_03\\_4.html](http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte_03_4.html). Consulta: 26 de agosto de 2013.

Donde según su base atómica, se puede clasificar al sulfato de sodio anhidro, como un cristal ortorrómbico I, es decir, con su celda centrada en su cuerpo (CC), y al sulfato de sodio decahidratado, como un cristal monoclinico también con su celda centrada en su cuerpo (CC).

### **2.6.2. Cristalografía**

Es la ciencia que se dedica al estudio y resolución de estructuras cristalinas. La mayoría de los minerales adoptan formas cristalinas cuando se forman en condiciones favorables. La cristalografía es el estudio del crecimiento, la forma y la geometría de estos cristales.

La disposición de los átomos en un cristal, puede conocerse por difracción de los rayos X. La química cristalográfica estudia la relación entre la composición química, la disposición de los átomos y las fuerzas de enlace entre estos. Esta relación determina las propiedades físicas y químicas de los minerales o estructura cristalina.

Cuando las condiciones son favorables, cada elemento o compuesto químico tiende a cristalizarse en una forma definida y característica.

### 2.6.2.1. Elementos de la simetría

Los cristales se clasifican según las propiedades de simetría de la célula cristalina. Las celdas fundamentales de un cristal, presentan elementos de simetría, que son:

- Eje de simetría: es una línea imaginaria que pasa a través del cristal, alrededor de la cual, al realizar este un giro completo, repite dos o más veces el mismo aspecto. Los ejes pueden ser: monarios, si giran el motivo una vez ( $360^\circ$ ); binarios, si lo giran dos veces ( $180^\circ$ ); ternarios, si lo giran tres veces ( $120^\circ$ ); cuaternarios, si lo giran cuatro veces ( $90^\circ$ ); o senarios, si giran el motivo seis veces ( $60^\circ$ ).
- Plano de simetría: es un plano imaginario que divide el cristal en dos mitades simétricas especulares, dentro de la celda. Puede haber múltiples planos de simetría. Se representa con la letra *m*.
- Centro de simetría: es un punto dentro de la celda que, al unirlo con cualquiera de la superficie, repite al otro lado del centro y a la misma distancia un punto similar.
- Sistemas cristalinos: todas las redes cristalinas, al igual que los cristales, que son una consecuencia de las redes, presentan elementos de simetría. Si se clasifican los 230 grupos espaciales según los elementos de simetría que poseen, se obtienen 32 clases de simetría, es decir, regular o cúbico, tetragonal, hexagonal, romboédrico, rómbico, monoclinico y triclinico.

- Hábito cristalino: es el aspecto que presenta un cristal como consecuencia del diferente desarrollo de sus caras.
- Hábito acicular: cristales con gran desarrollo de caras verticales. Tienen aspecto de agujas.
- Hábito honojoso: cristales con aspecto de hojas por el gran desarrollo de las caras horizontales.

### **2.6.2.2. Formas cristalográficas**

A continuación se presentan las formas cristalográficas de los cristales, que son el conjunto de caras iguales en un cristal, que están relacionadas por sus diferentes tipos de simetría, según plano o eje.

- Una sola cara: pedión
- Dos caras
  - Pinacoide: iguales y paralelas relacionadas por un plano o eje binario.
  - Domo: no paralelas que se relacionan por un plano.
  - Esfenoide: no paralelas relacionadas por un eje binario.
- Prismas, pirámides, bpirámides, trapezoedros, escalenoedros
- Clases cristalinas

Con esto se obtienen 32 clases de cristales, por su simetría, que a su vez se reagrupan en los siete sistemas cristalinos.

Tabla VII. **Sistemas cristalinos que posee el sulfato sodio, en función del grado de hidratación, con formas cristalográficas debido a su simetría**

<b>Sistema</b>	<b>Clase se simetría</b>
<b>Monoclínico</b>	Esfenoidal
	Domática
	<b>Prismática</b>
<b>Ortorrómbico</b>	Biesfenoidal
	Piramidal
	<b>Bipiramidal</b>

Fuente:[http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte\\_03\\_4.html](http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte_03_4.html). Consulta: 26 de agosto de 2013.

### **2.6.2.3. Métodos cristalográficos**

Los métodos cristalográficos se apoyan fuertemente en el análisis de los patrones de difracción que surgen de una muestra cristalina al irradiarla con un haz de rayos X, neutrones o electrones. La estructura cristalina también puede ser estudiada por medio de microscopía electrónica.

### **2.6.3. Saturación y sobresaturación**

En el equilibrio, la concentración de las disoluciones se dice que es de saturación; no obstante a esta concentración, no podrían producirse cristales, haciéndose necesaria una concentración superior, de sobresaturación, para que empiecen a generarse los cristales, ya que se necesita una fuerza impulsora para la transferencia de materia que permita construir el cristal en un tiempo finito.

## 2.7. Agregado

La importancia del uso del tipo y de la calidad correcta del agregado, no se puede subestimar. Los agregados fino y grueso ocupan cerca del 60 al 75 por ciento del volumen del concreto (70 a 85% de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades; tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del concreto.

Los agregados deben cumplir con algunas normas para que su uso como material de ingeniería se optimice: deben ser partículas limpias, duras, resistentes, durables y libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcilla u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la hidratación y la adherencia en la pasta de cemento.

Las partículas de agregado friables (disgregables, deleznales o desmenuzables) o capaces de rajarse son indeseables.

Se deben evitar agregados que contienen cantidades apreciables de esquisto u otras rocas esquistosas, de materiales blandos y porosos. Se debe evitar, en especial, algunos tipos de *cherts*, pues tienen poca resistencia al intemperismo y causan defectos superficiales tales como las erupciones.

Los agregados más frecuentemente utilizados, arena, grava y escoria de alto horno enfriada al aire, produce concretos frescos de peso normal. Agregados de esquisto, arcilla, pizarra y escoria expandidos se usan para producir estructuras de concreto ligero (liviano).

Otros materiales ligeros, tales como la piedra pómez (pumita), cagafierro, perlita, vermiculita y diatomita se emplean para producir concreto ligero aislante.

Materiales pesados, tales como barita, limonita, magnetita, ilmenita, hematina y esferas de hierro, se usan para producir concreto de densidad elevada (concreto de gran peso) y blindaje para la radiación.

Las características del agregado que son significativas para la tecnología del concreto incluyen la porosidad, la graduación o distribución de tamaños, la absorción de humedad, la forma y la textura de la superficie, la resistencia a la ruptura, el módulo de elasticidad y los tipos de sustancias nocivas presentes.

Estas características se derivan de la composición mineralógica de la roca original (que es afectada por los procesos de formación geológica), las condiciones de exposición a que la roca ha estado sujeta antes de formar el agregado y el tipo de operación y de equipo que se ha utilizado para producir el agregado.

### **2.7.1. Definición**

El Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute) define el agregado como: material granular, como arena, grava, piedra triturada, concreto triturado de cemento hidráulico o escoria de hierro de alto horno, usado con un medio de cemento hidráulico para producir concreto o mortero.

### **2.7.2. Clasificación del agregado**

Las clasificaciones de los agregados, se han dado de acuerdo a sus propiedades físicas y físico-mecánicas, como la dimensión de las partículas, densidad y dureza.

### **2.7.2.1. Agregado grueso**

Agregado retenido de modo predominante por el tamiz de 4,75 milímetros (No. 4). Con una densidad aparente de 2,30 - 2,90 gramos por mililitro. Cuanto mayor es su densidad, mejor es su calidad y mejor su absorción.

Figura 6. **Agregado grueso**



Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC.

### **2.7.2.2. Agregado fino**

Agregado que pasa por el tamiz de 9,50 milímetros (3/8 pulg), retenido de modo predominante por el tamiz de 150 micrómetros (No. 100). El más usual es la arena, producto de la desintegración de las rocas.

Figura 7. **Agregado fino**



Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC.

### **2.7.2.3. Grava**

Material granular que es retenido de modo preponderante por el tamiz de 4,75 milímetros (No. 4) y que resulta de la desintegración y abrasión naturales de roca o al procesar un conglomerado débilmente ligado.

### **2.7.2.4. Arena**

Material granular que pasa por el tamiz de 9,50 milímetros (3/8 pulg) y es retenido de modo predominante por el tamiz de 75 micrómetros (No. 200), y que resulta de la desintegración y abrasión naturales de la roca o al procesar arenisca por completo desmenuzable.

#### **2.7.2.5. Piedra triturada**

Producto que resulta de la trituración artificial de rocas, piedras-bolas o pedruscos grandes, todas las caras del cual poseen de modo considerable aristas bien definidas y que han sido resultado de la operación de trituración.

#### **2.7.2.6. Escoria de alto horno, enfriado por aire**

Producto no metálico, que consta en esencia de silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases, y que se desarrolla en condición fundida simultáneamente con el hierro en un alto horno.

#### **2.7.2.7. Grava triturada**

Producto que resulta de la trituración artificial de grava, con un porcentaje mínimo especificado de fragmentos que tengan una o más caras que resulten de la fractura.

### **2.7.3. Características de los agregados**

Ciertas pruebas que se llevan a cabo en los agregados del concreto, tienen la finalidad de establecer que se satisfagan requisitos mínimos intrínsecos de calidad; otras están más relacionadas con la determinación de características útiles para seleccionar las proporciones para el concreto, y todavía otras pueden ser un grupo muy abreviado de pruebas para asegurar que en forma rutinaria se cumplan con los requisitos para el trabajo.

En la mayor parte de los casos, las pruebas aplicadas a los agregados dan un índice para predecir el comportamiento en el concreto, en lugar de evaluar un atributo en verdad básico.

#### **2.7.3.1. Textura superficial**

El concreto satisfactorio se hace de modo que contenga una gran diversidad de características superficiales, desde una muy lisa hasta muy áspera y de panal. De este tipo de agregado, dependiendo de su textura superficial va a depender la buena o mala adherencia entre la pasta de cemento y esas partículas.

#### **2.7.3.2. Granulometría (gradación)**

La granulometría es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis de los tamices (ASTM C 136).

El tamaño de las partículas del agregado, se determina por medio de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas.

Los siete tamices normados para el agregado fino tienen aberturas que varían de 150 micrómetros (No. 100) a 9,50 milímetros (3/8 pulg). Mientras que el agregado grueso se ensaya con 13 tamices estándar, con aberturas que varían de 1,18 milímetros (No.16) a 100 milímetros (4,0 pulg). Ambas granulometrías basadas en la Norma ASTM C 136 y 33-02a.

La granulometría y los límites granulométricos se expresan generalmente en porcentajes de material que pasa a través de cada tamiz.

- Granulometría de un agregado grueso

Las características y especificaciones de una granulometría para un agregado grueso, se encuentra en la Norma ASTM C 33-02a, inciso 9; en la C 88-99a, inciso 6.3 y C 136.

### **2.7.3.3. Masa volumétrica y vacíos**

La masa volumétrica (masa unitaria) de un agregado, es la masa o el peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El volumen a que se refiere aquí, es aquel ocupado por los agregados y por los vacíos entre las partículas de agregado.

La cantidad de vacíos varía cerca del 30 a 45 por ciento para el agregado grueso y cerca del 40 a 50 por ciento para el agregado fino. La angularidad aumenta la cantidad de vacíos, mientras que los tamaños mayores de un agregado bien graduado y la mejoría de la granulometría, disminuyen el contenido de vacíos.

### **2.7.3.4. Masa específica relativa**

La masa específica relativa de un agregado, también llamada densidad relativa o gravedad específica, es la relación entre su masa y la masa de agua en el mismo volumen absoluto. Se le usa en algunos cálculos de proporcionamiento y del control de la mezcla, tales como el volumen ocupado por el agregado en el método del volumen absoluto del diseño de mezcla.

### **2.7.3.5. Masa específica (densidad)**

La masa específica de las partículas que se usa en los cálculos de proporcionamiento, se determina por la multiplicación de la masa específica relativa de los agregados por la densidad del agua.

### **2.7.3.6. Absorción y humedad superficial**

La absorción y la humedad superficial de los agregados, se deben determinar de acuerdo con las Normas ASTM C 70, 127, 128 y 566, así el agua total del concreto se puede controlar y las masas correctas de los materiales de mezcla se pueden determinar.

La estructura interna de una partícula de agregado, se constituye de materia sólida y vacíos que pueden o no contener agua.

Las condiciones de humedad de los agregados se pueden definir como:

- Secado al horno: totalmente absorbente.
  - Humedad total: ninguna.
- Secado al aire: la superficie de las partículas esta seca, pero su interior contiene humedad y, por lo tanto, aún es ligeramente absorbente.
  - Humedad total: menor que la absorción potencial.
- Saturado con superficie seca (SSS): no absorben, ni ceden agua al concreto.
  - Humedad total: igual a la absorción potencial.

- Húmedos: contiene un exceso de humedad sobre la superficie (agua libre).
  - Humedad total: mayor que la absorción potencial.

Los agregados grueso y fino, generalmente tienen niveles de absorción (contenido de humedad a SSS) que varían del 0,200 al 4 por ciento y del 0,200 al 2 por ciento, respectivamente. Los contenidos de agua libre generalmente varían del 0,500 al 2 por ciento para el agregado grueso y del 2 al 6 por ciento para el agregado fino.

El contenido máximo de humedad del agregado grueso drenado, es normalmente menor que aquél del agregado fino.

#### **2.7.3.7. Propiedades de humedecimiento y secado**

El intemperismo debido al humedecimiento y secado, puede afectar la durabilidad del agregado. Los coeficientes de expansión y contracción de las rocas, varían con la temperatura y el contenido de humedad. En algunos agregados, pueden ocurrir deformaciones elevadas si ocurren humedecimientos y secados alternos y, en el caso de algunos tipos de rocas, esto puede causar un aumento permanente de volumen y su eventual ruptura.

Los terrones de arcilla y otras partículas friables (deleznables, disgregables o desmenuzables) se pueden degradar rápidamente con el humedecimiento y secado repetidos. También se pueden desarrollar erupciones, resultantes de las características de hinchazón por la humedad, de algunos agregados, principalmente en arcillas y esquistos.

### **2.7.3.8. Resistencia a congelación y deshielo**

La resistencia a la congelación de un agregado, que es una característica importante para el concreto que se aplique exteriormente, se relaciona con su porosidad, absorción, permeabilidad y estructura de los poros.

Una partícula de agregado puede absorber tanta agua (hasta la saturación crítica) que no puede soportar la expansión y la presión hidráulica que ocurren durante al congelamiento del agua.

Si hay una cantidad suficiente de partículas afectadas, puede haber una expansión del agregado y una posible desintegración del concreto. Si una única partícula problemática esta cerca de la superficie del concreto, puede ocurrir erupción.

Normalmente son las partículas del agregado grueso, más que del fino, que presentan valores más elevados de porosidad y poros con tamaños medianos (0,100  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ ), las que más fácilmente se saturan y causan el deterioro del concreto y el aparecimiento de erupciones.

En cualquier velocidad de congelamiento, puede haber un tamaño de partícula crítico que al superar la partícula fallará cuando estuviera críticamente saturada. El tamaño crítico depende de la velocidad de congelación y de la porosidad, permeabilidad y resistencia a la tensión (tracción) de la partícula.

Este problema se puede reducir o con la elección de los agregados con mejor desempeño en los ciclos de congelación-deshielo o, cuando se deben utilizar agregados susceptibles a daños por congelamiento, con la reducción del tamaño máximo de las partículas.

### **2.7.3.9. Materiales potencialmente perjudiciales**

Las sustancias perjudiciales que pueden estar presentes en los agregados incluyen impurezas orgánicas, limo, arcilla, esquisto, óxido de hierro, carbón mineral, lignito y ciertas partículas ligeras y suaves. Además rocas y minerales, como el *chert* y el cuarzo deformado y ciertas calizas dolomíticas que son reactivas con álcalis.

El yeso y la anhidrita pueden causar ataque de sulfatos. Ciertos agregados, como los esquistos, causan erupciones por la absorción de agua o por el congelamiento del agua absorbida.

Las impurezas orgánicas pueden retrasar el fraguado y el endurecimiento del concreto, reducir el desarrollo de la resistencia y, en algunos casos poco usuales, causar el deterioro. Las impurezas orgánicas, como las turbas, los humus y las margas orgánicas pueden no ser tan perjudiciales, pero se deben evitar.

### **2.7.3.10. Procesamiento de agregados**

A continuación se presenta el procesamiento total del agregado, que consiste en el procesamiento básico y el mejoramiento de la calidad del mismo, por medio del beneficio.

- Procesamiento básico: trituración, tamizado y lavado, y
- Beneficio: mejoramiento de la calidad a través de métodos de procesamiento, tales como separación en un medio pesado, tamizado con agua, clasificación por corriente ascendente y trituración.

En la separación en medio pesado, los agregados pasan a través de un líquido pesado compuesto de minerales pesados finalmente granulados y agua, proporcionando para tener una masa específica relativa (densidad relativa) menor que las partículas de agregado deseadas pero mayor que las partículas dañinas. Las partículas más pesadas se hunden en el fondo, mientras que las partículas más livianas flotan en la superficie. Este proceso se puede usar cuando las partículas aceptables y las dañinas tienen masas específicas relativas muy diferentes.

El tamizado separa las partículas con pequeñas diferencias de masa específica, pulsando una corriente de agua. Las pulsaciones de agua hacia arriba a través de un tamiz, mueven el material más ligero para formar una capa sobre el material más pesado. Entonces, se remueve la capa de arriba.

La clasificación por corriente ascendente, separa las partículas con grandes diferencias de masa específica. Los materiales ligeros, como la madera y el lignito, flotan en una rápida corriente ascendente de agua.

La trituración también se usa para remover las partículas blandas y desmenuzables de los agregados gruesos.

#### **2.7.3.11. Manejo y almacenamiento de agregados**

Los agregados se deben manejar y almacenar de manera que se minimice la segregación y la disgregación y que se prevenga la contaminación con sustancias deletéreas.

Las pilas de agregados se deben construir en capas delgadas de espesor uniforme para minimizar la segregación.



### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Como resultado de la investigación, recopilación y estudio de la información presente en libros, tesis y artículos científicos sobre el uso del sulfato de sodio en análisis de materiales de construcción, agregado grueso; se determinaron las variables independientes que permanecieron constantes y las que fueron modificadas para medir su efecto sobre las variables dependientes, controlables, no controlables y de respuesta.

Tabla VIII. **Definición operacional de las variables para la evaluación del uso alternativo del sulfato de sodio cristalino proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO**

	VARIABLE	Independiente	Dependiente	Controlable	No controlable	Respuesta
<b>Agregado grueso triturado</b>	Peso de la muestra antes de la evaluación			+		
	Peso de la muestra después de la evaluación			+		
<b>Reactivo</b> -Sulfato de sodio-	Grado del sulfato (textil, DQO, reactivo)	+		+		
	Pureza del sulfato	+		+		
	Porcentaje de agua de hidratación	+		+		

Continuación de la tabla VII.

	VARIABLE	Independiente	Dependiente	Controlable	No controlable	Respuesta
<b>Reactivo</b> -Sulfato de sodio-	Densidad de la solución	+				
	Densidad del reactivo (sólido)	+				+
<b>Metodología</b>	Temperatura	+				
	Presión atmosférica	+				
	Densidad	+				
	Tiempo	+				
	Porcentaje de Perdida en Peso	+	+		+	+

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitación del campo de estudio

Es la circunscripción específica del campo, área, línea y sector industrial de los cuales forma parte la investigación, así como el lugar, espacio físico o ambiente geográfico en donde se ejecutó dicho proyecto.

- Campo: Ingeniería Química.
- Área: ensayo de materiales de ingeniería, físico-mecánicos y físico-químicos.

- Línea: evaluación de procesos analíticos.
- Industria: materiales de construcción.
- Proceso: evaluación del uso alternativo del sulfato de sodio cristalino proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, mediante la comparación de las especificaciones, según Norma ASTM C 88-99a, inciso 5.1.1.
- Ubicación: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos (LAFIQ), de la Sección de Química Industrial y Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros, del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), primer nivel del edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala, ciudad Universitaria, zona 12, ciudad de Guatemala.
- Clima: templado, con una temperatura promedio anual media de 19,900 grados Celsius, así como una humedad relativa media de 76 por ciento y presión atmosférica media de 85,606 kilo-Pascales durante el 2012, según el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

Es el conjunto de personas que contribuyó al desarrollo de la investigación, aportando su desempeño y conocimientos, desde la preparación hasta la presentación del informe final.

- Investigadora: Br. Marian Angelica Mejía Giordano

- Asesor: Ing. Qco. César Alfonso García Guerra

### 3.4. Recursos materiales disponibles

Es el conjunto de todos aquellos recursos tangibles y de consumo que fueron utilizados en el desarrollo de la investigación, tales como materia prima, reactivos y muestras, equipo, instrumentos de medición, cristalería, y consumibles.

- Materia prima
  - Agregado grueso triturado, proporcionado por AGREGUA, por medio del Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros.
  - Sulfato de sodio anhidro grado reactivo; fórmula:  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , número CAS: 7757-82-6, marca: J. T. Baker, proporcionado por el Laboratorio de Análisis Fisicoquímicos (LAFIQ).
  - Sulfato de sodio decahidratado grado textil; fórmula:  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , número CAS: 7727-73-3, marca: Quirey (Química del Rey S. A. de C. V.), proporcionado por el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros.
  - Sulfato de sodio cristalino proveniente del residuo líquido de la DQO, del Proyecto FODECYT No. 47-2009; fórmula:  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ , proporcionado por el Laboratorio de Análisis Fisicoquímicos (LAFIQ).

- Reactivos
  - Cloruro de bario; fórmula:  $\text{Ba}_2\text{Cl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , número CAS: 10361-37-2, marca: J. T. Baker.
  - Fluoresceína; fórmula:  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{O}_5$ , número CAS: 2321-07-5, marca: Merck Millipore.
  - Nitrato de plata; fórmula:  $\text{AgNO}_3$ , número CAS: 7761-88-8, marca: Merck Millipore.
  - Kerosene
  - Agua desmineralizada para uso industrial; marca: Agua Pura Salvavidas, tipo II.
  
- Equipo
  - Tamizadora; marca: Sound Enclosure, R-30050, W. S. Tyler.
  - Tamices para agregado grueso, según Norma ASTM C 33-02a y 136; 63,0 mm (2½ pulg), 50,0 mm (2 pulg), 37,5 mm (1½ pulg), 25,0 mm (1 pulg), 19,0 mm (¾ pulg), 16,0 mm (5/8 pulg), 12,5 mm (½ pulg), 9,5 mm (3/8 pulg), 8,0 mm (5/16 pulg), 4,75 mm (No.4), 4,0 mm (No.5) y fondo; marca: Humboldt MFG. CO.
  - Horno eléctrico de convección forzada; marca: PREMLAB, modelo: OVENS.
  - Plancha eléctrica; marca: Fischer Scientific, modelo: Isotemp
  - Bomba de vacío; marca: GAST MANUFACTURING INC., modelo: 0523-V4F-G588DX.
  - Lámpara luz ultravioleta; marca: Spectroline.

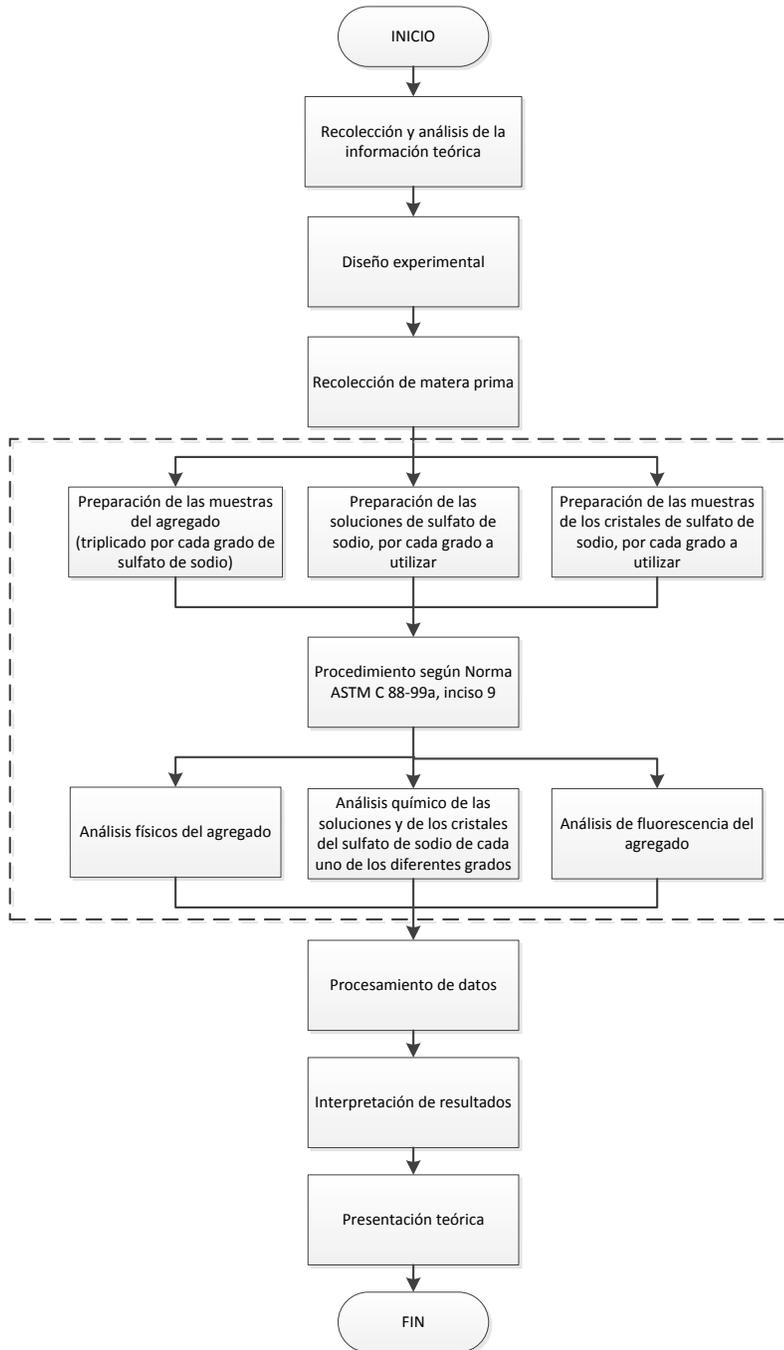
- Instrumentos de medición
  - Balanza analítica; marca: OHAUS, modelo: Adventurer, No. Serie: G1231202040133,  $u = \pm 0,001$  g.
  - Potenciómetro; marca: HANNA.
  - 2 Termómetros; marca Brannan, THERMOLAB,  $u = \pm 1^{\circ}\text{C}$ .
  - Picnómetro - 25 mL; marca: Marienfeld, Superior.
  - Matraz de Le Châtelier - 25 mL; marca: LMS,  $u = \pm 0,04$  mL.
  
- Cristalería
  - 3 *Beakers Pirex* - 2 000 mL; marca SUPERIOR, Maríenfeld.
  - Probeta - 2 000 mL; marca: KIMAX KIMBLE.
  - Kitasato - 1 000 mL; marca KIMAX KIMBLE.
  - Embudo *Buchner* de porcelana, diámetro interno: 13 cm.
  - 3 vidrios de reloj, diámetro: 9 cm.
  - Embudo de vidrio, diámetro interno: 13 cm.
  
- Material
  - 12 Contenedores de acero inoxidable.
  - Espátula de laboratorio de acero inoxidable.
  - 3 Agitadores magnéticos.
  - Colador
  - Piseta - 500 mL.
  - 1 pincel

- Consumibles
  - Papel filtro cualitativo, 110 mm, marca Whatman.
  - Algodón
  - Guantes descartables de látex
  - Mascarilla
  - Papel absorbente en rollo para secado y limpieza

### **3.5. Técnica cuantitativa**

Debido a la naturaleza del objeto de estudio, la investigación se desarrolló a través de técnicas cuantitativas con base en las variables descritas, utilizando parámetros cualitativos como apoyo en la interpretación del estudio.

Figura 8. **Diseño general para la técnica cuantitativa**



Fuente: elaboración propia.

A continuación se presentan las normas ASTM que se utilizaron como parámetros de análisis.

- Norma C 88-99a: método de ensayo normalizado para solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.
- Norma C 136: método de ensayo para análisis granulométricos.
- Determinación de la densidad del sulfato cristalino por medio del uso del matraz de Le Châtelier, por medio de la Norma ASTM C 188-95: método de ensayo estándar para densidad del cemento hidráulico.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

Define los métodos y documentación a través de los cuales se realizó la recopilación y el ordenamiento de los datos, es decir los métodos de experimentación necesarios para llevar a cabo la investigación.

#### **3.6.1. Análisis del agregado bajo Norma ASTM C 88-99a**

Parte fundamental de la investigación, se basó en el cumplimiento de la Norma ASTM C 88-99a, por lo que se describe a continuación el procedimiento de la realización del análisis.

##### **3.6.1.1. Manejo experimental**

Se utilizó un agregado grueso triturado, proporcionado por AGREGUA, por medio del Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros y tres diferentes tipos de sulfato de sodio, cada uno con diferente grado de pureza.

El sulfato de sodio anhidro grado reactivo, marca J. T. Baker y el sulfato de sodio cristalino proveniente del residuo líquido de la DQO, del Proyecto FODECYT No. 47-2009, fueron proporcionados por el Laboratorio de Análisis Fisicoquímicos (LAFIQ), y el sulfato de sodio decahidratado grado textil, marca Quirey (Química del Rey S. A. de C. V.), fue proporcionado por el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros.

El agregado grueso se sometió al procedimiento que propone la norma en su inciso 9 ASTM C 88-99a, realizando un triplicado con cada uno de los tres diferentes tipos de sulfato de sodio, cada uno con diferente grado de pureza. Por lo que se obtendrá como resultado un total de nueve repeticiones.

Tabla IX. **Definición operacional y descripción de las variables dependientes**

	<b>Tipos de Reactivos</b>	<b>Número de repeticiones</b>	
Agregado grueso triturado, proporcionado por AGREGUA	Sulfato de sodio anhidro grado reactivo, marca J. T. Baker, proporcionado por el Laboratorio de Análisis Fisicoquímicos (LAFIQ).	1	1era.
		2	2da.
		3	3era.
	Sulfato de sodio grado textil, marca Quirey (Química del Rey S. A. de C. V.), proporcionado por el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros.	4	1era.
		5	2da.
		6	3era.
	Sulfato de sodio cristalino proveniente del residuo líquido de la DQO, del Proyecto FODECYT No. 47-2009, proporcionado por el Laboratorio de Análisis Fisicoquímicos (LAFIQ).	7	1era.
		8	2da.
		9	3era.

Fuente: elaboración propia.

Ya teniendo el cálculo de repeticiones a realizar, el tiempo a utilizar y las semanas disponibles según calendario, se procedió a diseñar el procedimiento.

- Muestreo

El agregado grueso para el ensayo debe consistir de material retenido sobre el tamiz de 4,75 milímetros (No.4). La muestra debe ser de tamaño tal que rinda las siguientes cantidades de los tamaños:

Tabla X. **Cantidad de agregado (g) por tamaño de tamiz para la realización del ensayo, según especificaciones inciso 6.3 ASTM C 88-99a**

<b>Tamaño de tamiz</b>	<b>Masa (g)</b>
4,75 mm (No.4)	300 ± 5
9,5 mm (3/8 pulg)	330 ± 5
12,5 mm (1/2 pulg)	670 ± 10
19,0 mm (3/4 pulg)	500 ± 30
25,0 mm (1 pulg)	1 000 ± 10

Fuente: elaboración propia. Según Norma ASTM C 88-99a.

- Preparación de la muestra del ensayo

La preparación de la muestra, se llevó a cabo según como lo exige la Norma ASTM C 88-99a; método de ensayo normalizado para solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, inciso 7, 7.2.

- Agregado grueso

Se lavó vigorosamente la muestra de agregado grueso y se secó hasta obtener un peso constante, a una temperatura de  $110 \pm 5$  grados Celsius.

Figura 9. **Preparación del agregado grueso para prueba, granulometría, lavado y secado**



Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC.

Se separó el agregado por medio de una granulometría, en tres diferentes contenedores de acero inoxidable de la siguiente forma:

Tabla XI. **Cantidad (g) de agregado en cada contenedor**

Contenedor 1		Contenedor 2		Contenedor 3	
Tamaño de tamiz	Masa (g)	Tamaño de tamiz	Masa (g)	Tamaño de tamiz	Masa (g)
<b>4,75 mm (No.4)</b>	300 ± 5	<b>9,5 mm (3/8 pulg)</b>	330 ± 5	<b>19,0 mm (3/4 pulg)</b>	500 ± 30
		<b>12,5 mm (1/2 pulg)</b>	670 ± 10	<b>25,0 mm (1 pulg)</b>	1 000 ± 10

Fuente: elaboración propia. Según Norma ASTM C 88-99a.

Figura 10. **Pesado del agregado, según granulometría, como lo indica la tabla XI**



Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC.

Por lo que se obtuvo un peso total por cada contenedor:

Tabla XII. **Cantidad total (g) de agregado en cada contenedor**

<b>Contenedor 1</b>	<b>Contenedor 2</b>	<b>Contenedor 3</b>
Masa (g)	Masa (g)	Masa (g)
<b>300 ± 5</b>	<b>1 000 ± 15</b>	<b>1 500 ± 40</b>

Fuente: elaboración propia. Según Norma ASTM C 88-99a.

Figura 11. Agregado clasificado en contenedores, según tabla XI y XII



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

Se registraron los pesos reales de cada uno de los contenedores y sus componentes fraccionarias.

- Procedimiento

El procedimiento se llevó a cabo según como lo exige la Norma ASTM C 88-99a; método de ensayo normalizado para solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, según inciso 8.

- Almacenamiento de muestras en la solución

Ya con los contenedores de acero inoxidable, cada uno con el agregado con su peso correspondiente, indicado en la tabla XII, se le agregó a cada recipiente la solución de sulfato de sodio, previamente preparada (con al menos 48 horas de anticipación).

Se sumergieron las muestras en la solución preparada de sulfato de sodio, de tal manera que la solución cubriera las muestras como mínimo ½ pulgada arriba, y se dejaron en imbibición por lo menos de 16 horas y no más de 18 horas. Se cubrieron los depósitos para reducir la evaporación y prevenir la adición accidental de sustancias extrañas. Se mantuvo las muestras sumergidas en la solución a una temperatura de  $21 \pm 1$  grados Celsius por el período de imbibición o inmersión.

Figura 12. **Proceso de imbibición de la solución de sulfato de sodio en el agregado grueso**



Fuente: Laboratorio de Análisis Fisicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

- Secado de las muestras después de la inmersión

Después del período de inmersión, se removió la muestra de agregado de la solución, con la ayuda de un colador plástico y se drenó por  $15 \pm 5$  minutos, posteriormente se colocó en el horno de secado, cada muestra dentro de su contenedor.

El horno se debe precalentar a  $110 \pm 5$  grados Celsius. Se secaron las muestras a esa temperatura hasta obtener peso constante.

Se estableció el tiempo requerido para alcanzar peso constante de la siguiente manera: con el horno conteniendo todas las muestras, se cuantificó las pérdidas de peso de las muestras de ensayo, sacándolas y pesándolas, sin enfriar a intervalos de 2 a 4 horas; se hicieron suficientes repeticiones para establecer el tiempo de secado requerido para el lugar menos favorable del horno y la condición de la muestra.

Se consideró que la muestra alcanzó un peso constante cuando la reducción de peso de la misma fue menor que el 0,100 por ciento en 4 horas de secado. De manera que se estableció el período de secado eficiente en 4 horas.

Después del secado eficiente, se sacaron los contenedores con el agregado seco del horno y se enfriaron a temperatura ambiente, y posteriormente se volvió a sumergir estos en la solución de sulfato de sodio, repitiéndose la operación hasta completar 5 ciclos.

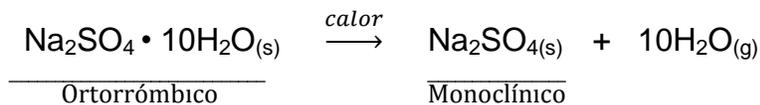


Figura 13. **Proceso de deshidratación del cristal de sulfato de sodio adsorbido en el agregado grueso, en horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$**



Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC.

- **Número de ciclos**

Se evaluó una muestra, para determinar la cantidad de ciclos efectivos, repitiendo los procesos alternos de inmersión en solución salina y secado para evaluar la reducción en la fragilización del agregado. A partir del quinto ciclo se determinó que no existe diferencia significativa con ciclos adicionales, por lo que se estableció la evaluación en cinco ciclos.

- **Después del ciclo final**

Después de completar el ciclo final, se dejó enfriar la muestra de los agregados en los contenedores. Se lavó la muestra de cada uno de los contenedores con agua desmineralizada a  $43 \pm 6$  grados Celsius, para eliminar el sulfato de sodio que quedó adsorbido y absorbido al agregado.

Figura 14. **Lavado del agregado grueso con agua desmineralizada a  $43^{\circ}\text{C} \pm 6^{\circ}\text{C}$**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

Para evaluar la efectividad del lavado para la eliminación de la sal de sulfato de sodio en el agregado, se utilizó solución de cloruro de bario dihidratado ( $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) al 5 por ciento. La prueba de eliminación efectiva esta basada en la reacción del ion  $\text{Ba}^{+2}$  cuando reacciona con el ion sulfato precipitando estos como sulfato de bario (blanquecino).



Figura 15. **Evaluación de presencia de sulfatos en el agua de lavado mediante cloruro de bario ( $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

El procedimiento de lavado, se realizó colocando el agregado en un colador de malla y sumergiéndolo repetidas veces en agua caliente. En el procedimiento de lavado, se procuró que las muestras permanecieran inmóviles en el colador, para evitar que sufrieran fracturas adicionales.

Cabe recordar que este procedimiento se realizó al agregado estudiado y aplicado a cada una de las sales evaluadas.

- Examen cuantitativo

Después del lavado efectivo del agregado, se secaron las muestras en el horno precalentado a  $110 \pm 5$  grados Celsius, por 4 horas. Las muestras se dejaron enfriar a temperatura ambiente. El tamizado final del agregado grueso, se realizó manualmente, con el tamiz indicado en el inciso 9.1.1 de la norma, indicados en la siguiente tabla:

Tabla XIII. **Selección del tamaño de tamiz para cada diferente tamaño de agregado en el contenedor respectivo, para determinar la pérdida en peso**

Contenedor	Tamaño inicial	Tamaño final
Contenedor 1	4,75 mm (No.4)	4,0 mm (No.5 pulg)
Contenedor 2	9,5 mm (3/8 pulg)	8,0 mm (5/16 pulg)
	12,5 mm (1/2 pulg)	
Contenedor 3	19,0 mm (3/4 pulg)	16,0 mm (5/8 pulg)
	25,0 mm (1 pulg)	

Fuente: elaboración propia. Según inciso 9.1.1. Norma ASTM C 88-99a.

Figura 16. **Equipo para examen cuantitativo de granulometría final del agregado, inciso 9 ASTM C 88-99a**



Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC.

Se tamizó manualmente cada uno de los agregados según clasificación de tamaño de agregado grueso, con agitación suficiente para asegurar que pase todo el material de tamaño menor al tamiz designado. Se pesó el contenido retenido en cada tamiz para cada tamaño de agregado grueso evaluado y se registró la cantidad como peso final.

Figura 17. **Tamizaje y pesado de cada tamaño de agregado grueso, al final del último ciclo de imbibición salina**



Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC.

Adicionalmente se registró el peso de los fragmentos de agregado que se desprendieron y pasaron cada uno de los respectivos tamices, como fragmentos de agregado desprendido por el efecto de los esfuerzos mecánicos que ejerce el cristal de sulfato de sodio anhidro, para poder cuantificar posteriormente el peso total de agregado perdido.

Figura 18. **Pesado de los residuos desprendidos por el efecto mecánico de la sal anhidra sobre el agregado, en el último ciclo**



Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC.

La diferencia entre el peso final y el peso inicial del agregado de cada contenedor de la fracción ensayada, que quedó definido en la tabla XII, fue la pérdida en el ensayo y se expresó como un porcentaje del peso inicial.

El resultado final se presentó en la siguiente tabla:

Tabla XIV. **Formulario de resultados de la realización del ensayo de granulometría, según Norma ASTM C 88-99a**

Tamaños		Graduación por fracción	Antes de ensayo (g)	Después de ensayo (g)	% de Desgaste	Desgaste ref. a graduación
Pasa	Retenido					
63,0 mm (2 ½ pulg)	37,5 mm (1 ½ pulg)	0,00	---	---	0,00	0,00
37,5 mm (1 ½ pulg)	19,0 mm (¾ pulg)		1 500,00			
19,0 mm (¾ pulg)	9,5 mm (3/8 pulg)		1 000,00			
9,5 mm (3/8 pulg)	4,75 mm (No. 4)		300,00			
	Fondo		---			
<b>TOTALES</b>		<b>100,00</b>	<b>2 800,00</b>			

Fuente: Inciso 11. Norma ASTM C 88-99a.

Cabe resaltar que esta tabla se utilizó para reportar todos los resultados de las granulometrías de cada una de las tres repeticiones realizadas, a cada uno de los tres diferentes tipos de sulfato de sodio.

- Manejo de productos y residuos

Basado información reglamentaria en el manejo y desecho del sulfato de sodio, se encontró que según:

- The Toxic Substances Control Act (TSCA), el sulfato de sodio anhidro se clasifica con el número TSCA: 7757-82-6.
- The Resource Conservation and Recovery Act (RCRA), (40 CFR 261), el sulfato de sodio no se encuentra listado bajo ninguna sección.
- The Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA), el sulfato de sodio no se encuentra listado bajo ninguna sección.
- The Clean Water Act (CWA), el sulfato de sodio no se encuentra listado bajo ninguna sección.

En referencia a los límites de exposición ocupacional, se encontró que según:

- The Solid Waste Disposal Act (SWDA), el sulfato de sodio no se encuentra listado bajo The Occupational Safety and Health Administration (OSHA), particulados no regulados de otra manera - 15 mg/m<sup>3</sup> (fracción respirable).
- The American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), particulados no clasificados de otra manera - 10 mg/m<sup>3</sup>.
- The International Agency for Research on Cancer (IARC), el sulfato de sodio no se encuentra listado bajo ninguna sección.
- El reporte anual de The National Toxicology Program (NTP) sobre carcinógenos, el sulfato de sodio no se encuentra listado bajo ninguna sección.
- The Occupational Safety and Health Administration (OSHA) el sulfato de sodio no se encuentra listado bajo ninguna sección.
- La Proposición 65 de California, el sulfato de sodio no se encuentra listado como carcinógeno o toxina reproductiva.

- Food and Drug Administration (FDA), el sulfato de sodio está permitido para los siguientes usos: preparación de colorantes azul ultramarino (21cfr 73.50 y 73.2725); ingredientes misceláneos en base para goma de mascar (21 cfr 172.615); aditivo de agua de calentador (21 cfr 173.310); aditivo para celofán (21 cfr 177.1200); constituyente de papel y cartón, algodón y tela de algodón (21 cfr 186.1797).
- Workplace Hazardous Materials Information System (WHMIS), el sulfato de sodio está regulado como producto controlado y está clasificado como d2a (material muy tóxico cuando es igual o mayor al 0,100%) por toxicidad reproductiva.
- Clasificación Americana: el sulfato de sodio no es una sustancia peligrosa.

A pesar de que el sulfato de sodio no es una sustancia peligrosa, los sulfatos pueden deteriorar el concreto, debido a que reaccionan con los compuestos hidratados en la pasta de cemento hidratada.

El ataque del sulfato, se manifiesta con una exudación de apariencia blanquecina y agrietamiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo y blando.

La acción del sulfato de sodio en el concreto, es doble. Reacciona primero con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de calcio ataca al aluminato tricálcico formando etringita, provocando erosión y expansión en el concreto.

Estas reacciones pueden generar esfuerzos mecánicos suficientes para fracturar la pasta de cemento, resultando en disgregación del concreto (pérdida de resistencia y cohesión de la pasta). El daño comienza usualmente en las aristas y esquinas, y es seguido por fisuramiento y desconchamiento progresivos, los cuales reducen el concreto a un estado quebradizo e inclusive blando. La humedad y la cristalización producida por los sulfatos son los factores más dañinos en el concreto.

### **3.6.1.2. Soluciones requeridas**

Cada una de las soluciones a utilizar, se prepararon según lo indica la Norma ASTM C 88-99a, en el inciso 5, en base a especificaciones y requerimientos.

- Sulfato de sodio

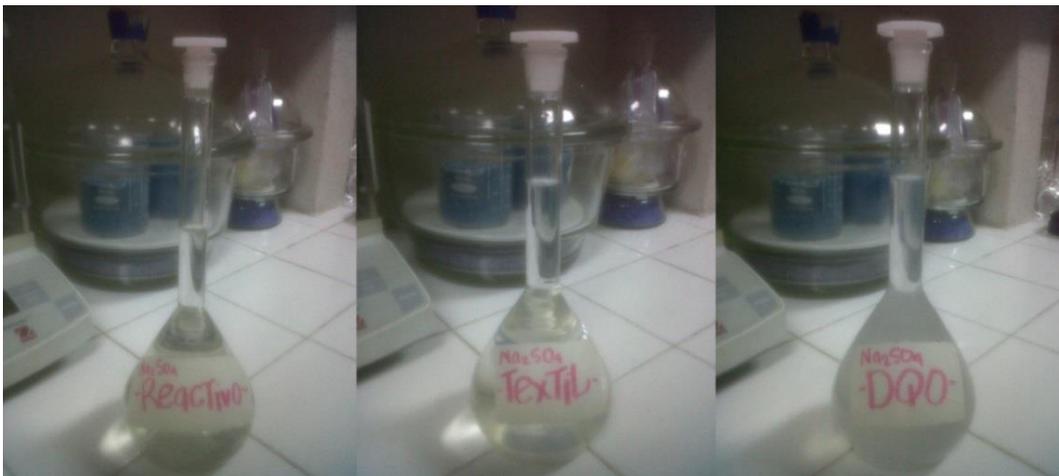
Se preparó cada una de las tres soluciones, disolviendo la cantidad indicada de sulfato de sodio, dependiendo de su grado de hidratación, en 6 litros de agua desmineralizada a una temperatura de 25 a 30 grados Celsius, tomando en cuenta que la solución debe estar completamente saturada. Para poder disolver la sal, se utilizó una plancha de calentamiento con agitador magnético.

Para reducir la evaporación y prevenir la contaminación de la solución, se conservó en un recipiente completamente hermético a una temperatura de aproximadamente  $21 \pm 1$  grados Celsius. Como se indicó con anterioridad, la solución de sulfato de sodio se preparó 48 horas antes de ser utilizada.

Previo a utilizar la solución, se observó si el recipiente hermético que contenía la solución, presentaba cristalización de la sal depositados en el fondo del recipiente, si los hubiera, se disolvieron hasta lograr de nuevo una solución homogénea.

La solución antes de ser utilizada deberá tener una densidad específica no menor que 1,151 y no mayor que 1,174. De lo contrario se corrige la densidad hasta alcanzar el rango indicado.

Figura 19. **Soluciones de sulfato de sodio, grado reactivo, grado textil y del sulfato de sodio proveniente del residuo líquido del análisis de la DQO**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

- Filtrado de la solución de sulfato de sodio

La Norma ASTM C 88-99a no recomienda la filtración de la solución salina después de cada ciclo de imbibición, cuando en la práctica se realiza de esta manera se observa la acumulación de arcilla y fragmentos menores del agregado. Esto resulta en nuevos núcleos de cristalización que dan lugar a la formación de cristales de sulfato de sodio arcillados o de restos de agregado. Esta cristalización modifica la solución salina original para utilizarla en el siguiente ciclo, con la consecuencia que en el quinto ciclo de imbibición, cuando se separa la solución del agregado, se obtiene una solución turbia saturada de cristales contaminados y prácticamente imposible de reutilizarla.

Debido a que la solución final, es imposible utilizarla en la práctica, se almacena en depósitos plásticos o inclusive son desechadas directamente al sistema de tuberías y drenajes, que por ser de concreto se están dañando por contaminación de sulfatos.

Por lo que se propone como parte de la mejora a la metodología del procedimiento de la Norma ASTM C 88-99a, filtrar la solución de sulfato de sodio después de cada ciclo de imbibición. Esta acción reducirá la cantidad de contaminantes y núcleos de cristalización en la solución a utilizar para el siguiente ciclo y verificando el cumplimiento de la densidad según lo establece la norma.

Durante el presente proyecto, las soluciones de sulfato de sodio, se filtraron utilizando un sistema de filtrado al vacío, consistente en un embudo *Buchner* al que se le ha colocado papel filtro e insertando este a un *erlenmayer* de filtración (Kitasato), el cual se conecta a una bomba de vacío operada a una presión negativa de 18 pulgadas de mercurio.

Figura 20. **Sistema de filtrado al vacío**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

Al final de este proceso de filtrado, se logró obtener una solución de sulfato de sodio completamente limpia, sin arcilla y partículas de agregado, como se puede observar en la figura 20 y 21, dentro del Kitasato. Este procedimiento se ejecutó a cada una de las tres soluciones salinas evaluadas, en cada uno de los cinco ciclos.

El papel filtro que se utilizó se almacenó para poder cuantificar las pérdidas de partículas que tuvo el agregado a través de cada uno de los ciclos a los que fue sometido según norma, inciso 8.

Figura 21. **Solución de sulfato de sodio filtrada proveniente de los ciclos de imbibición del agregado**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

Por lo tanto, se recomendó al personal del Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros del CII, donde se realiza actualmente el ensayo de agregados bajo la Norma ASTM C 88-99a, una alternativa de aprovechamiento de las sales de sulfato de sodio provenientes de los análisis de solidez realizados.

Para la implementación de la recomendación mencionada, se identificaron los siguientes desechos líquidos y sólidos:

- Solución acuosa residual de sulfato de sodio utilizada en los cinco ciclos, contaminada con cristales de sal, partículas de arcilla y de los fragmentos del agregado grueso ensayados.

- Solución acuosa de lavado de agregados del ciclo final y solución acuosa de redisolución de sal presente en el papel filtro, conteniendo precipitados de sulfato de sodio y sulfato de bario.
- Agregado grueso saturado de sulfato de sodio en su ciclo final.

Este procedimiento de tratamiento consiste en los siguientes pasos:

- Paso 1: filtrar la solución de cada uno de los cinco ciclos de imbibición con papel filtro. La cual servirá de solución (A) base para la elaboración de la solución salina que se utiliza en próximos ensayos de solidez.
  - Importante: medir la densidad de la solución por medio de un picnómetro para verificar que este conforme al rango que establece el inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a. Tomar nota de densidades en formato de control.

El parámetro complementario monitoreado fue el potencial de Hidrógeno (pH) a cada una de las soluciones por medio de un potenciómetro, para poder tener un mejor control y determinar su influencia en el gradiente de consumo de sulfato de sodio.

Figura 22. **Medición de pH de las soluciones con potenciómetro**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

- Este proceso de filtrado, no es un procedimiento propuesto en la Norma ASTM C 88-99a, sino es un monitoreo para tener un mejor manejo de las soluciones de sulfato de sodio de un ciclo a otro, y que en el ciclo final se obtenga una solución identificada para ser tratada y poder reutilizarse.

### **3.6.1.3. Procedimiento para manejo del papel filtro, gravimetría de los fragmentos del agregado**

Como se indicó anteriormente en el proceso del filtrado de las soluciones de sulfato de sodio utilizadas, el papel filtro que se utilizó en este proceso se almacenó para poder cuantificar las pérdidas de partículas que tuvo el agregado a través de cada uno de los ciclos a los que fue sometido.

Por lo tanto se planteó una metodología para poder determinar las pérdidas que tuvo el agregado.

Este procedimiento consiste en los siguientes pasos:

- Paso 2: antes de proceder al filtrado, tarar cada uno de los papeles filtros e identificarlos con un número para poder llevar un control. Proceder a filtrar la solución con el papel filtro previamente tarado e identificado.
- Paso 3: colocar en una bandeja resistente al calor, cada uno de los papeles filtro con los residuos de filtración de la solución que se utilizó en cada ciclo de imbibición.

Figura 23. **Papel filtro húmedo con cristales de sulfato de sodio decahidratado y partículas de agregado y arcilla**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

- Paso 4: colocar la bandeja con los papeles filtros dentro del horno a una temperatura aproximada de  $40 \pm 5$  grados Celsius durante  $30 \pm 5$  minutos.
  - Este procedimiento es necesario para eliminar la humedad que contienen los residuos depositados en el papel filtro.
- Paso 5: retirar del horno los papeles filtros con residuos y enfriar a temperatura ambiente. Proceder a pesar cada uno de los papeles filtros y anotarlos en la hoja de toma de datos junto a la tara del papel filtro.
- Paso 6: colocar los papeles filtro nuevamente en el embudo de filtración y realizar la redisolución de las sales de sulfato de sodio por medio del sistema de filtrado al vacío.
  - Verificar la redisolución completa mediante el ensayo de cloruro de bario, hasta que de negativa la precipitación del sulfato de bario.

Figura 24. **Sistema de filtrado al vacío para eliminar del papel filtro los cristales de sulfato de sodio formados en cada uno de los ciclos de filtrado**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

- Paso 7: repetir los pasos 4 y 5 con los papeles filtro húmedos provenientes del paso 6.

Figura 25. **Bandeja con los papeles filtros con los residuos de arcilla y fragmentos de agregado secos, resultantes del ciclo último y provenientes del paso 7**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

- Paso 8: pesar cada uno de los papeles filtro secos, solo con las partículas de agregado y arcilla y anotarlos en la hoja de toma de datos.

Figura 26. **Pesado del papel filtro con los fragmentos de agregado y arcillas utilizando balanza analítica**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

- Paso 9: la solución resultante del paso 6, genera la solución (B) consistente en una solución diluida del sulfato de sodio proveniente del lavado del papel filtro.
- Paso 10: mezclar la solución (A) procedente del paso 1 y la solución (B) proveniente del paso 9 para reutilizarla agregando el sulfato de sodio necesario que permita alcanzar la densidad establecida por la norma para el ensayo de solidez.

- Este procedimiento de manejo del papel filtro, no es un procedimiento que indique la Norma ASTM C 88-99a, es una metodología recomendada para tener un mejor control del desgaste del agregado en cada uno de los cinco ciclos de filtrado, y así cuantificar la pérdida total de peso que se tuvo del agregado.

**3.6.2. Método para determinar densidad de los cristales de sulfato de sodio por medio del matraz de Le Châtelier. Basado en la Norma ASTM 188-95**

Para poder determinar el grado de hidratación de los tres diferentes cristales de sulfato de sodio utilizados, se utilizó el principio de Le Châtelier, que es un método sencillo para efectuar predicciones cualitativas acerca del sentido en que se desplazará el equilibrio de hidratación, en este caso, como resultado de los cambios de temperatura.

A través de esta investigación, se identificó que la densidad, dureza y estructura cristalina del sulfato de sodio, varía en función de su grado de hidratación.

Tabla XV. **Características y propiedades del sulfato de sodio, en función del grado de hidratación**

Características y propiedades	SULFATO DE SODIO	
	Anhidro $\text{Na}_2\text{SO}_4$	Decahidratado $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Densidad (g/mL)	2,680	1,464
Dureza (escala Mohs)	2,500	1 ½ - 2
Estructura cristalina	Ortorrómbico Piramidal, centrado en el cuerpo	Monoclínico Prismático, centrado en el cuerpo

Fuente: JONES, A. G. Crystallization Process Systems. p. 217.

En base a la tabla XV, se puede observar que los cristales del sulfato de sodio en su forma anhidra son más densos y más duros que en su forma decahidratada.

Mediante este estudio, se determinó la densidad de los tres diferentes tipos de sulfatos utilizados, antes y después de haberlos sometido al secado en horno que indica la Norma ASTM C 88-99a en el inciso 4.5, con el fin de verificar el cambio de densidad y por lo tanto la transformación en su estructura cristalina, cuando sucede su transformación de la forma decahidratada a la forma anhidra, que es la responsable de producir el esfuerzo de ruptura dentro de los intersticios del agregado.

Figura 27. **Determinación de la densidad del cristal de los diferentes tipos de sulfato de sodio, utilizando el matraz de Le Châtelier, basado en la Norma ASTM C 188-95**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

Por lo tanto, se planteó una metodología para poder determinar la densidad de los tres diferentes tipos de cristales de sulfato de sodio utilizados, en la evolución del secado de los agregados imbibidos en la sal.

Este método consiste en los siguientes pasos:

- Paso 1: antes de proceder a realizar la medición de la densidad de los cristales, con la ayuda de un mortero y pistilo, pulverizar una muestra de cada uno de los tres diferentes tipos de sulfato a utilizar, para su mejor manipulación.
- Paso 2: pesar una masa definida de sulfato de sodio, de cada uno de los tres diferentes tipos a utilizar, tarando previamente el vidrio de reloj.
- Paso 3: verter dentro del matraz de Le Châtelier, con la ayuda de una pipeta volumétrica, un volumen definido de kerosene, y anotar dicho dato.

Figura 28. **Llenado del matraz de Le Châtelier con un volumen definido de kerosene**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

- Paso 4: armar el sistema para poder realizar el procedimiento, colocando dentro del anillo del soporte el embudo de vidrio, para luego colocar el tubo de vidrio del embudo dentro de la boquilla del matraz de Le Châtelier.

Figura 29. **Instalación del sistema para la determinación de la densidad del cristal del sulfato de sodio, por medio del matraz de Le Châtelier**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

- Paso 5: depositar con extremo cuidado la cantidad de sulfato de sodio, previamente pesado, dentro del matraz de Le Châtelier, con la ayuda del embudo y de un pincel, previendo que al momento de ir agregando la sal, no quede adherida a las paredes del matraz.
  - El objetivo principal, es cuantificar el desplazamiento de volumen específico de kerosene que realizó el peso de sal dentro del matraz de Le Châtelier.

Figura 30. **Procedimiento para la incorporación de la sal al matraz de Le Châtelier**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

- Paso 6: después de haber depositado toda la sal dentro del matraz y eliminada las burbujas de aire atrapadas mediante agitación se lee el volumen del menisco del volumen de kerosene y anotar dicho volumen.
- Paso 7: basado en los resultados del paso 2 (peso de sal), del paso 3 (volumen definido) y del paso 6 (volumen desplazado), realizar el cociente de peso de sal entre la diferencia de los volúmenes, con lo que se obtiene la densidad de la sal ( $\rho = m/\Delta v$ ).

Figura 31. **Desplazamiento de volumen de kerosene por la adición del sulfato de sodio, matraz de Le Châtelier**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

La determinación de densidad se realizó tanto en cada una de las sales de sulfato de sodio a evaluar, como en cada una de las sales secadas bajo el procedimiento del inciso 4.5 ASTM C 88-99a.

- Este método de ensayo, determinación de la densidad de los cristales de sulfato de sodio por medio del matraz de Le Châtelier, no es un procedimiento que indique la Norma ASTM C 88-99a, es un procedimiento recomendado por medio de este estudio para tener un mejor control de los tipos de sales que se están utilizando, por medio del grado de hidratación de sus cristales.

### **3.6.3. Método de fluorescencia para evidencia visual de las fisuras en el agregado grueso, después de la aplicación de la Norma ASTM C 88-99a**

Para poder observar con mayor claridad las fisuras en el agregado, definidas como todas aquellas aberturas incontroladas de un elemento que afecta todo su espesor, ocasionadas por el esfuerzo mecánico de la estructura cristalina de la sal cuando varía su grado de hidratación, de su forma decahidratada a su forma anhidra, donde el cristal posee mayor densidad y dureza; se planteó el método de fluorescencia.

Al referirse a fluorescencia, se habla de un tipo particular de luminiscencia, que caracteriza a las sustancias que son capaces de absorber energía en forma de radiaciones electromagnéticas y luego emitir parte de esa energía en forma de radiación electromagnética de longitud de onda diferente.

Para el desarrollo del método, se requirió del agregado grueso, que después de su ciclo final, presentará a simple vista fisuramientos más evidentes en su estructura. Para una mejor selección, realizar la elección de forma manual e individualmente.

Figura 32. **Método de fluorescencia, para evidencia visual de las fisuras en el agregado grueso**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

Este método consiste en 5 pasos:

- Paso 1: escoger el agregado.
- Paso 2: preparar las soluciones de nitrato de plata y fluoresceína.
- Paso 3: colocar el agregado en un vidrio de reloj y aplicar, con la ayuda de un pincel, el nitrato de plata en la superficie de las fisuras.

Figura 33. **Aplicación del nitrato de plata en la superficie de las fisuras del agregado grueso**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

- Paso 4: después de que las fisuras del agregado grueso estén perfectamente humectadas por el nitrato de plata, con la ayuda de un pincel y la lámpara de luz ultravioleta, aplicar la fluoresceína en el mismo lugar.

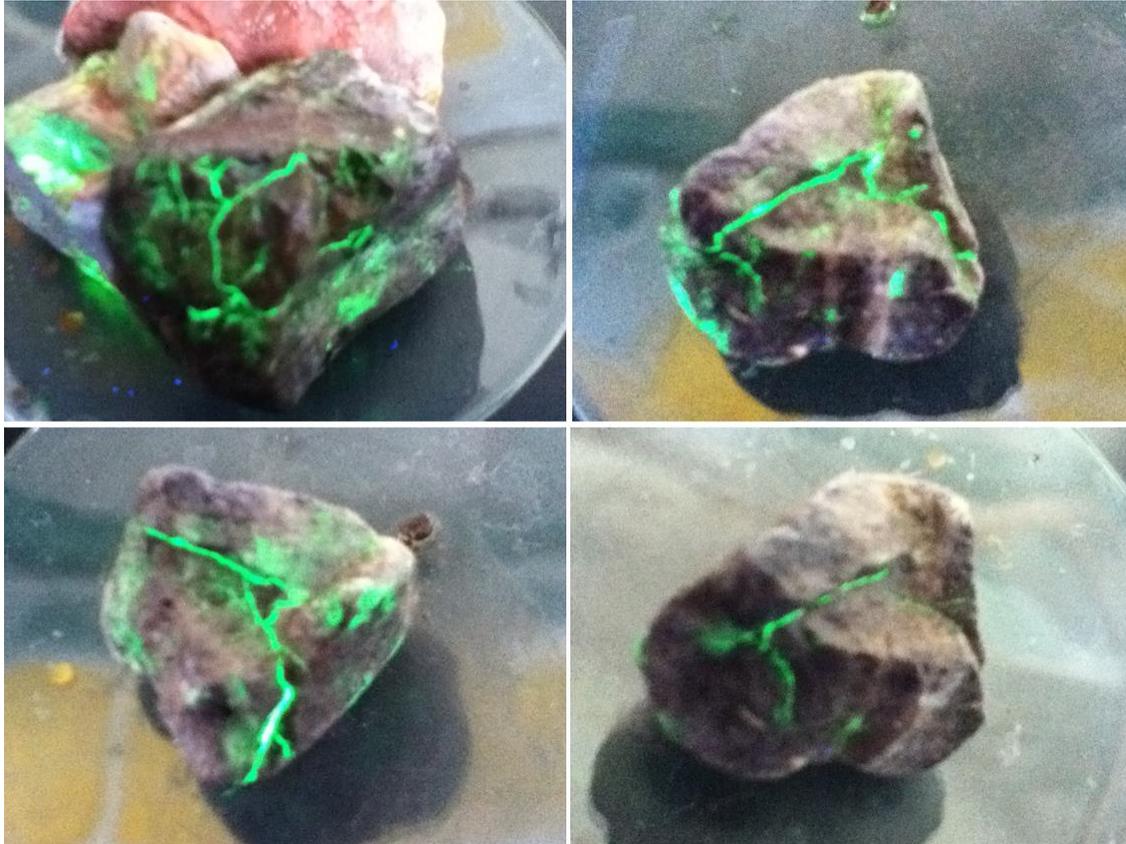
Figura 34. **Aplicación de fluoresceína sobre el nitrato de plata, en la superficie de las fisuras del agregado grueso**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

- Paso 5: por medio de la ayuda de la lámpara de luz ultravioleta, observar con mayor claridad las fisuras generadas por los cinco ciclos de imbibición y secado a los que fue sometido el agregado, según lo indicaba la Norma ASTM C 88-99a, en el inciso 8 de procedimientos.
  - Tomar fotografías para evidencia.

Figura 35. **Evidencia visual, fisuras en agregado grueso después de la aplicación de la Norma ASTM C 88-99a**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

- Este método de ensayo, método de fluorescencia, no es un procedimiento que indique la Norma ASTM C 88-99a, es un procedimiento recomendado por medio de este estudio para tener una evidencia visual, más tangible, de las fisuras en el agregado debido a los esfuerzos mecánicos producidos en los intersticios del mismo, debido a la acción del agente salino fisurante.

### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para concentrar la información previamente recolectada, e interpretar correctamente el fenómeno de estudio, fue necesario tabular, ordenar y procesar los datos.

Dicha información fue clasificada y tabulada por medio de los formularios descritos en las tablas XVI a XXII.

Asimismo, se utilizó equipo electrónico de computación, específicamente los programas Microsoft Excel 2010, para procesar los datos obtenidos en forma más confiable, con mayor profundidad y en un menor tiempo.

Tabla XVI. **Formato de toma de datos para la evaluación de la Norma ASTM C 136, para agregado grueso**

<b>Norma ASTM C 136 "Método de Ensayo para Análisis Granulométrico del Agregado Grueso y Fino"</b>	
<b>AGREGADO GRUESO</b>	
<b>Tamiz</b>	<b>Masa retenida (g)</b>
100,0 mm (4 pulg)	
87,5 mm (3½ pulg)	
75,0 mm (3 pulg)	
63,0 mm (2½ pulg)	
50,0 mm (2 pulg)	
12,5 mm (1½ pulg)	
25,0 mm (1 pulg)	
19,0 mm (¾ pulg)	
12,5 mm (½ pulg)	
9,5 mm (3/8 pulg)	
4,75 mm (No.4)	
2,36 mm (No.8)	
1,18 mm (No.16)	
Fondo	
Masa inicial	

Fuente: elaboración propia. Según Norma ASTM C 136.

Tabla XVII. **Formato de toma de datos para la evaluación de la Norma ASTM C 88-99a, para agregado grueso**

Norma ASTM C 88-99a "Método de Ensayo Normalizado para Solidez de los Agregados mediante el Uso de Sulfato de Sodio o Sulfato de Magnesio".					
<b>AGREGADO GRUESO</b>	<b>Cápsula</b>	<b>Masa inicial -antes- (g)</b>	<b>Masa antes de tamizado final (g)</b>	<b>Masa final -después- (g)</b>	<b>Masa inicial – Masa final (g)</b>
<b>Tamiz</b>					
25,0 mm (1 pulg)	1	1 500,00			
19,0 mm (¾ pulg)					
12,5 mm (½ pulg)	2	1 000,00			
9,5 mm (3/8 pulg)					
4,75 mm (No.4)	3	300,00			
	<b>Total</b>	<b>2 800,00</b>			

Fuente: elaboración propia. Según Norma ASTM C 88-99a.

Tabla XVIII. **Formato de toma de datos de masa de partículas de agregado grueso, como resultado de la aplicación de la Norma ASTM C 88-99a**

<b>Masa de partículas de agregado grueso, resultado de la aplicación de la Norma ASTM C 88-99a</b>	
<b>Cápsula</b>	<b>Masa residuo tamizado (g)</b>
1	
2	
3	
<b>Total</b>	

Fuente: elaboración propia. Según Norma ASTM C 88-99a.

Tabla XIX. **Formato de toma de datos para evaluación granulométrica de la Norma ASTM C 88-99a, para agregado grueso**

Norma ASTM C 88-99a "Método de Ensayo Normalizado para Solidez de los Agregados mediante el Uso de Sulfato de Sodio o Sulfato de Magnesio".		
AGREGADO GRUESO	Masa inicial -antes- (g)	Masa final -después- (g)
Tamiz		
63,0 mm (2½ pulg)		
50,0 mm (2 pulg)		
19,0 mm (1½ pulg)		
25,0 mm (1 pulg)		
19,0 mm (¾ pulg)		
12,5 mm (½ pulg)		
9,5 mm (3/8 pulg)		
4,75 mm (No.4)		
<b>Solución usada</b>		

Fuente: elaboración propia. Según Norma ASTM C 88-99a.

Tabla XX. **Formato de resultados de la evaluación de la Norma ASTM C 88-99a, para agregado grueso**

Norma ASTM C 88-99a "Método de Ensayo Normalizado para Solidez de los Agregados mediante el Uso de Sulfato de Sodio o Sulfato de Magnesio".								
AGREGADO GRUESO								
Tamaños				Graduación por fracción (%)	Masa de fracción antes del ensayo (g)	Masa de fracción después del ensayo (g)	Desgaste (%)	Desgaste ref. a graduación
Pasa		Retenido						
mm	pulg	mm	pulg					
63,0	2½	37,5	1½	0,00	---	---	0,00	0,00
37,5	1½	19,0	¾		1 500,00			
19,0	¾	9,5	3/8		1 000,00			
9,5	3/8	4,75	No.4		300,00			
Fondo					---			
<b>Totales</b>				<b>100,00</b>	<b>2 800,00</b>			
Rangos de pérdida								
<b>Menor a 6%</b>				<b>Entre 6-16%</b>			<b>Mayor a 16%</b>	

Fuente: elaboración propia. Según Norma ASTM C 88-99a.

Tabla XXI. **Formato de toma de datos para control de límites de densidad de las diferentes soluciones de sulfato de sodio utilizadas**

<b>CONTROL SEMANAL</b> <b>Densidad de la solución de Sulfato de Sodio (g/mL),</b>				
				<b>Grado Reactivo ( )</b> <b>Grado Textil ( )</b> <b>Grado DQO ( )</b>
<b>Semana:</b>				
Fecha: Del __ al __ de ____ de 2013			Repetición 1 ( )	
Fecha: Del __ al __ de ____ de 2013			Repetición 2 ( )	
Fecha: Del __ al __ de ____ de 2013			Repetición 3 ( )	
Datos: Wpicnómetro = 35,291g; Vpicnómetro = 25mL Ecuación: $\rho_s = (W_p - W_{ps})/V_p$ Límites de $\rho = 1,151 - 1,174$				
Día	Wps (g)	$\rho$ (g/mL)	Hora	pH
Lunes				
Martes				
Miércoles				
Jueves				
Viernes				
Sábado				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. Formato de toma de datos para control de masa de partículas de agregado grueso en papel filtro, después de la aplicación de la Norma ASTM C 88-99a

CONTROL DE PESOS SEMANAL						
Partículas de agregado grueso en papel filtro (g)						Grado Reactivo ( )
						Grado Textil ( )
						Grado DQO ( )
Semana:						
Fecha: Del ___ al ___ de _____ de 2013						Repetición 1 ( )
Fecha: Del ___ al ___ de _____ de 2013						Repetición 2 ( )
Fecha: Del ___ al ___ de _____ de 2013						Repetición 3 ( )
No.	A -tara de papel filtro numerado- (g)	B -papel filtro seco con sulfato- (g)	C -papel filtro libre de sulfatos con fragmentos de partículas de agregado- (g)	C-A -masa partículas de agregado producido por el Desgaste de la acción del sulfato de sodio- (g)	Día/Fecha	Masa total -sumatoria diaria- (g)
1.					Martes ___ de _____	
2.						
3.						
4.					Miércoles ___ de _____	
5.						
6.						
7.					Jueves ___ de _____	
8.						
9.						
10.					Viernes ___ de _____	
11.						
12.						
13.					Sábado ___ de _____	
14.						
15.						
					<b>Masa total</b>	<b>g</b>

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Análisis estadístico

Para la evaluación de la capacidad del sulfato de sodio grado textil y sulfato de sodio proveniente del residuo líquido del análisis de la DQO, como reactivo alternativo al sulfato de sodio grado USP que propone la Norma ASTM C 88-99a, en el inciso 5.1.1, se realizó un análisis de varianza de un factor.

El objetivo del análisis fue estudiar si había variación significativa en los resultados de cada una de las pruebas, en cada una de sus repeticiones. Este análisis se realizó por medio de un análisis de varianza, también llamado ANOVA.

- Suposiciones e hipótesis del ANOVA de un solo factor

Se supone que las  $k$  poblaciones, son independientes y están distribuidas en forma normal con medias  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$ , y varianza común  $\sigma^2$ . Se desea obtener métodos adecuados para probar las hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$H_1$ : al menos dos de las medias no son iguales

Sea que  $Y_{ij}$  denote la  $j$ -ésima observación del  $i$ -ésimo tratamiento, y el acomodo de los datos es el que se observa en la tabla XXIII. Donde  $Y_i.$  es el total de todas las observaciones de la muestra, del  $i$ -ésimo tratamiento,  $\bar{y}_i.$  es la media de todas las observaciones en la muestra del  $i$ -ésimo tratamiento,  $Y_{..}$  es el total de todas las  $nk$  observaciones, y  $\bar{y}_{..}$  es la media de todas las  $nk$  observaciones.

Tabla XXIII. **Arreglo general de un análisis de varianza de un factor, para  $k$  muestras aleatorias**

<b>Tratamiento:</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	...	<b><math>i</math></b>	...	<b><math>k</math></b>	
	$y_{11}$	$y_{21}$	...	$y_{i1}$	...	$y_{k1}$	
	$y_{12}$	$y_{22}$	...	$y_{i2}$	...	$y_{k2}$	
	...	...		...		...	
	$y_{1n}$	$y_{2n}$	...	$y_{in}$	...	$y_{kn}$	
<b>Total</b>	$Y_1.$	$Y_2.$	...	$Y_i.$	...	$Y_k.$	$Y_{..}$
<b>Media</b>	$\bar{y}_1.$	$\bar{y}_2.$	...	$\bar{y}_i.$	...	$\bar{y}_k.$	$\bar{y}_{..}$

Fuente: WALPOLE, Ronald E.; MYERS, Raymond H.; MYERS, Sharon L.; YE, Keying, Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. p 514.

- Modelo de ANOVA para un solo factor

Cada observación puede escribirse en la forma:

$$Y_{ij} = \mu_i + \epsilon_{ij}$$

Donde  $\epsilon_{ij}$  mide la desviación que tiene la observación  $j$ -ésima de la  $i$ -ésima muestra, con respecto a la media del tratamiento correspondiente. El término  $\epsilon_{ij}$  representa el error aleatorio y juega el mismo papel que los términos del error en los modelos de regresión. Una forma alternativa y preferible de esta ecuación, se obtiene al sustituir  $\mu_i = \mu + \alpha_i$ , sujeta a la restricción  $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 0$ .

Por lo tanto se escribe:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \epsilon_{ij}$$

Donde  $\mu$  tan sólo es la media global de todas las  $\mu_i$ , es decir,

$$\mu = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mu_i$$

y  $\alpha_i$  se denomina el efecto del  $i$ -ésimo tratamiento.

La prueba de la hipótesis nula de que  $k$  medias poblacionales son iguales, contra la alternativa de que al menos dos de las medias son distintas, ahora puede reemplazarse por las hipótesis equivalentes.

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_k = 0,$$

$H_0$ : al menos una de las  $\alpha_i$  no es igual a 0

- Resolución de la variabilidad total en componentes

La prueba se basará en una comparación de los estimadores independientes de la varianza poblaciones común  $\sigma^2$ . Dichos estimadores se obtendrán haciendo la partición de la variabilidad total de los datos, denotados mediante la sumatoria doble:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$$

en dos componentes.

- Identidad de la suma de cuadrados

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^k (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2$$

Será conveniente identificar los términos de la identidad de la suma de cuadrados con la notación de las tres medidas importantes de variabilidad.

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = \textit{suma total de cuadrados},$$

$$SSA = n \sum_{i=1}^k (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 = \textit{suma de los cuadrados del tratamiento}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 = \textit{suma de los cuadrados de los errores}$$

Ahora, la identidad de la suma de los cuadrados puede representarse simbólicamente con la ecuación:

$$SST = SSA + SSE$$

La identidad anterior, expresa cómo las variaciones entre tratamientos y dentro de estos se suman para formar la suma total de cuadrados. Sin embargo, puede ampliarse mucho más la perspectiva si se investiga el valor esperado de *SSA* como de *SSE*.

Finalmente, se desarrollarán estimadores de la varianza que formulen la razón que se va a usar para probar la igualdad de las medias poblacionales.

$$E(SSA) = (k - 1)\sigma^2 + n \sum_{i=1}^k \alpha_i^2.$$

Si  $H_0$  es verdadera, un estimador de  $\sigma^2$  con base en  $(k - 1)$  grados de libertad, está dado por la expresión media cuadrática del tratamiento:

$$s_1^2 = \frac{SSA}{k - 1}$$

Si  $H_0$  es verdadera y por ello cada  $\alpha_i$  en la ecuación de  $E(SSA)$ , es igual a cero, se observa que:

$$E\left(\frac{SSA}{k - 1}\right) = \sigma^2$$

Y  $s_1^2$  es un estimador insesgado de  $\sigma^2$ . Sin embargo, si  $H_1$  es verdadera, se tiene que:

$$E\left(\frac{SSA}{k - 1}\right) = \sigma^2 + \frac{n}{k - 1} \sum_{i=1}^k \alpha_i^2$$

Y  $s_1^2$  estima a  $\sigma^2$  más un término adicional, que mide la variación debida a los efectos sistemáticos.

Otro estimador independiente de  $\sigma^2$ , con base en  $k(n - 1)$  grados de libertad, es la fórmula familiar del error cuadrático medio:

$$s^2 = \frac{SSE}{k(n - 1)}$$

Resulta instructivo puntualizar la importancia de los valores esperados de las medias cuadráticas expresadas anteriormente. Mediante el empleo de la razón F con la media cuadrática del tratamiento en el numerador, se observa que cuando  $H_1$  es verdadera, la presencia de la condición  $E(s_1^2) > E(s^2)$  sugiere que la razón F se utiliza en el contexto de una prueba unilateral de cola superior. Es decir, cuando  $H_1$  es verdadera se esperaría que el numerador  $s_1^2$  fuera mayor que el denominador.

- Uso de la prueba F en el ANOVA

El estimador  $s^2$  es insesgado sin que importe la verdad o falsedad de la hipótesis nula. Es importante notar que la identidad de la suma de cuadrados ha hecho la partición no sólo de la variabilidad total de los datos, sino también del número total de grados de libertad. Es decir:

$$nk - 1 = k - 1 + k(n - 1)$$

- Razón F para probar la igualdad de las medias

Cuando  $H_0$  es verdadera, la razón  $f = s_1^2/s^2$  es un valor de la variable aleatoria F, que tiene distribución F con  $k - 1$  y  $k(n - 1)$  grados de libertad. Como  $s_1^2$  sobreestima  $\sigma^2$  cuando  $H_0$  es falsa, se tiene una prueba de una cola con la región crítica contenida por entero en la cola derecha de la distribución.

Con un nivel de significancia de  $\alpha$ , se rechaza la hipótesis nula  $H_0$  cuando:

$$f > f_{\alpha}[k - 1, k(n - 1)]$$

Otro enfoque, el del valor P, sugiere que la evidencia a favor o en contra de  $H_0$  es:

$$P = P[f[k - 1, k(n - 1)] > f]$$

En la tabla XXIV, se muestran las fórmulas para el análisis de varianza de un factor.

Tabla XXIV. **Fórmulas para el análisis de varianza del ANOVA para un solo factor**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	$f$ calculada
Tratamientos	$SSA$	$k - 1$	$s_1^2 = \frac{SSA}{k - 1}$	$\frac{s_1^2}{s^2}$
Error	$SSE$	$k(n - 1)$	$s^2 = \frac{SSE}{k(n - 1)}$	---
Total	$SST$	$kn - 1$		

Fuente: WALPOLE, Ronald E.; MYERS, Raymond H.; MYERS, Sharon L.; YE, Keying, Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. p 516.

En la prueba F, se considera la razón de las varianzas muestrales, es decir, la razón de los cuadrados de las desviaciones estándar. Si la hipótesis nula es verdadera, entonces la razón de varianzas debe estar próxima a 1.

Las diferencias respecto de 1 se deben a variaciones aleatorias, pero si las diferencias son demasiado grandes, no se pueden atribuir a esta causa.

Si el valor calculado de F excede un cierto valor crítico (obtenido del anexo 1), entonces se rechaza la hipótesis nula. Este valor crítico depende del tamaño de las muestras, del nivel de significación y del tipo de contraste realizado.

Asimismo, a través de un análisis probabilístico se puede saber si los resultados obtenidos son significativos o no. Cuando la probabilidad obtenida es menor que el nivel de significación, los resultados obtenidos son estadísticamente significativos. De esta forma, a menor valor de probabilidad, mayor es la seguridad de que existen diferencias significativas.

### **3.9. Plan de análisis de los resultados**

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante el método objetivo, el cual sólo observa los hechos reales y rechaza todo aquello que es de carácter subjetivo, para analizar y concluir objetivamente.

### **3.9.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables**

Los resultados del examen cuantitativo de la Norma ASTM C 88-99a, se realizaron según inciso 9, se reportaron según inciso 11, para agregado grueso, y se informaron según inciso 12, analizados gráfica, matemática y estadísticamente.

Los resultados obtenidos de la parte experimental referida al manejo de las diferentes soluciones de sulfato de sodio utilizadas, en función de la densidad, partiendo de los límites superior e inferior que propone la norma; el control de los cristales de sulfato de sodio de cada una de las diferentes sales utilizadas en función de su grado de hidratación y el manejo de los papeles filtro con fragmentos de partículas de agregado grueso; se manejaron por medio de tablas, gráficas de tendencia y modelos matemáticos.

Los datos obtenidos fueron analizados gráfica, matemática y estadísticamente, para evaluar objetivamente la capacidad de cada uno de los sulfatos utilizados como reactivo alternativo.

### **3.9.2. Programas para el análisis de datos**

Se utilizó el programa: Microsoft Office Excel 2010 (14.0.6112.5000) SP1. Parte de Microsoft Office Professional Plus 2010. © 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

Se utilizó el sistema operativo Windows 7 Home Basic, así como los siguientes programas:

- Microsoft Word: permitió crear y editar documentos profesionales
- Microsoft Excel: permitió procesar, graficar y analizar información
- Microsoft Visio: permitió crear, editar y compartir diagramas
- Microsoft PowerPoint: permitió crear y editar presentaciones

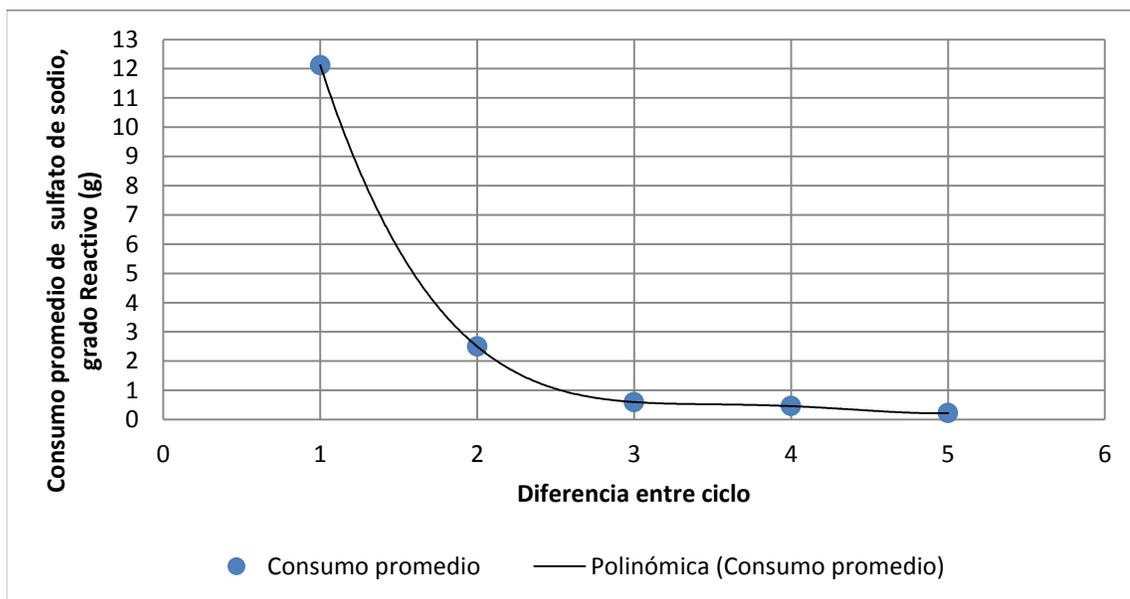


## 4. RESULTADOS

La información colectada y procesada en base al diseño de investigación experimental planteado, fue presentada gráficamente y complementada con las expresiones matemáticas que describen el patrón de su comportamiento.

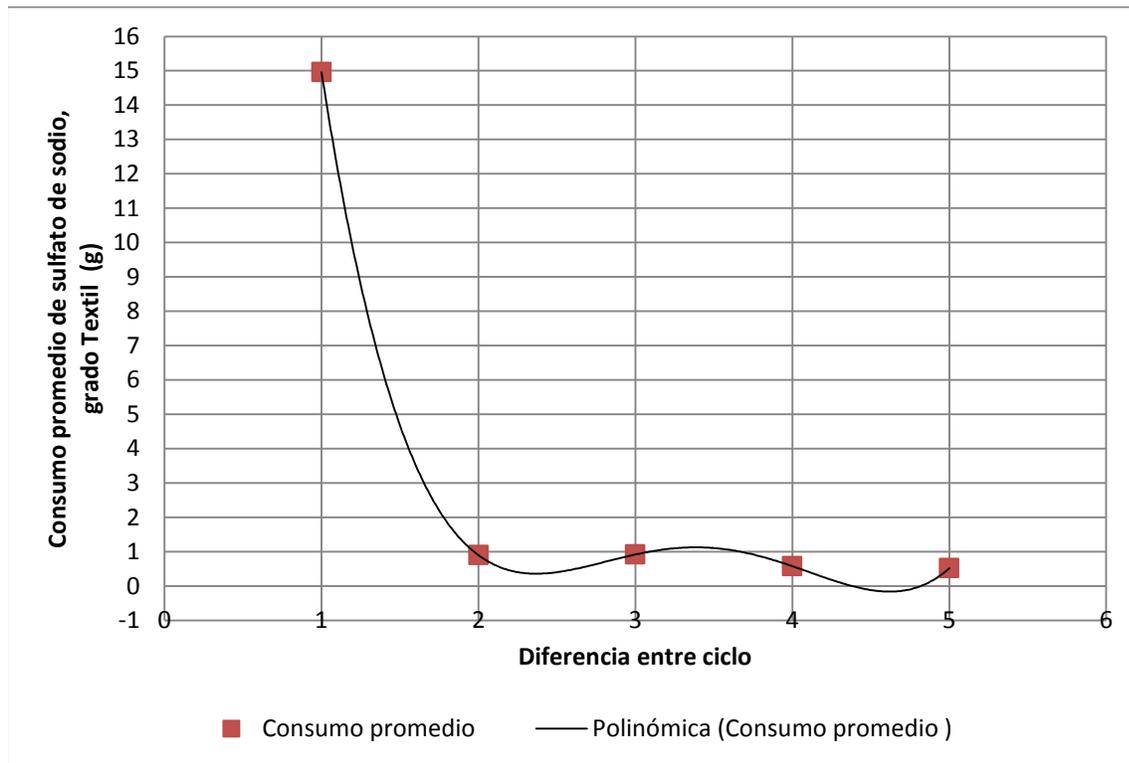
Resultados obtenidos en base al objetivo específico 1

Figura 36. **Gradiente de consumo de densidad diaria promedio de la solución de sulfato de sodio anhidro, grado reactivo, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a**



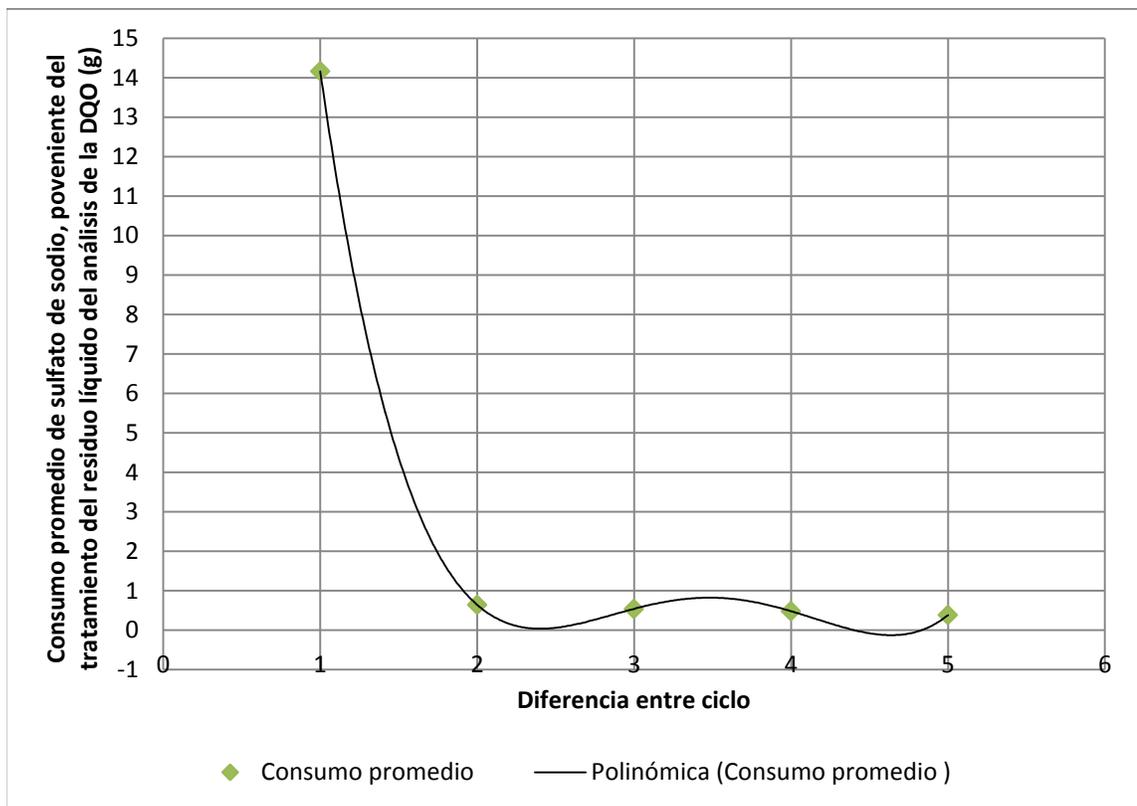
Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 37. **Gradiente de consumo de densidad diaria promedio de la solución de sulfato de sodio decahidratado, grado textil, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a**



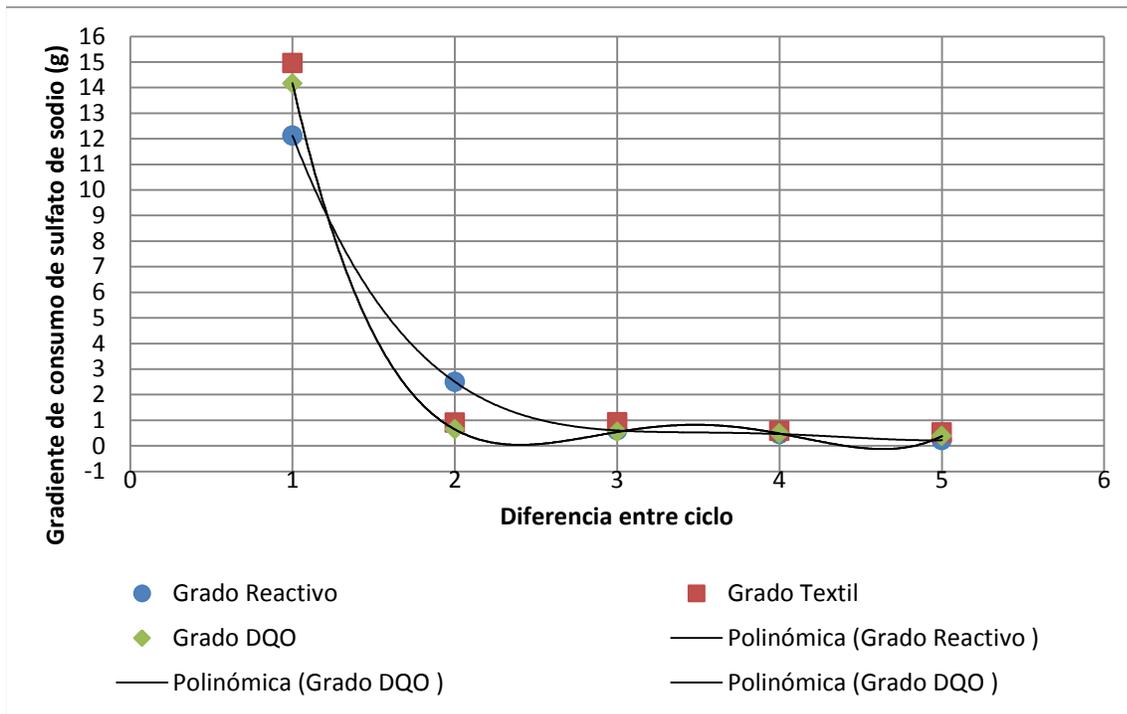
Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 38. **Gradiente de consumo de densidad diaria promedio de la solución de sulfato de sodio decahidratado, proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 39. **Comparación de gradiente de consumo de densidad diaria en base a las tres soluciones de sulfato de sodio evaluadas, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Tabla XXV. **Ecuación de regresión del gradiente de consumo de densidad diaria promedio de la solución de sulfato de sodio anhidro, grado reactivo, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a**

Tipo	Línea	Ecuación de regresión	Intervalo (ciclos)	R <sup>2</sup>
Reactivo		$\Delta\rho = 0,171\text{ciclo}^4 - 2,702\text{ciclo}^3 + 15,799\text{ciclo}^2 - 40,668\text{ciclo} + 39,520$	1 – 5	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Ecuación de regresión del gradiente de consumo de densidad diaria promedio de la solución de sulfato de sodio decahidratado, grado textil, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a**

Tipo	Línea	Ecuación de regresión	Intervalo (ciclos)	R <sup>2</sup>
Textil		$\Delta\rho = 0,628\text{ciclo}^4 - 8,690\text{ciclo}^3 + 43,472\text{ciclo}^2 - 93,070\text{ciclo} + 72,620$	1 – 5	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Ecuación de regresión del gradiente de consumo de densidad diaria promedio de la solución de sulfato de sodio decahidratado, proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a**

Tipo	Línea	Ecuación de regresión	Intervalo (ciclos)	R <sup>2</sup>
DQO		$\Delta\rho = 0,554\text{ciclo}^4 - 7,772\text{ciclo}^3 + 39,486\text{ciclo}^2 - 85,888\text{ciclo} + 67,780$	1 – 5	1

Fuente: elaboración propia.

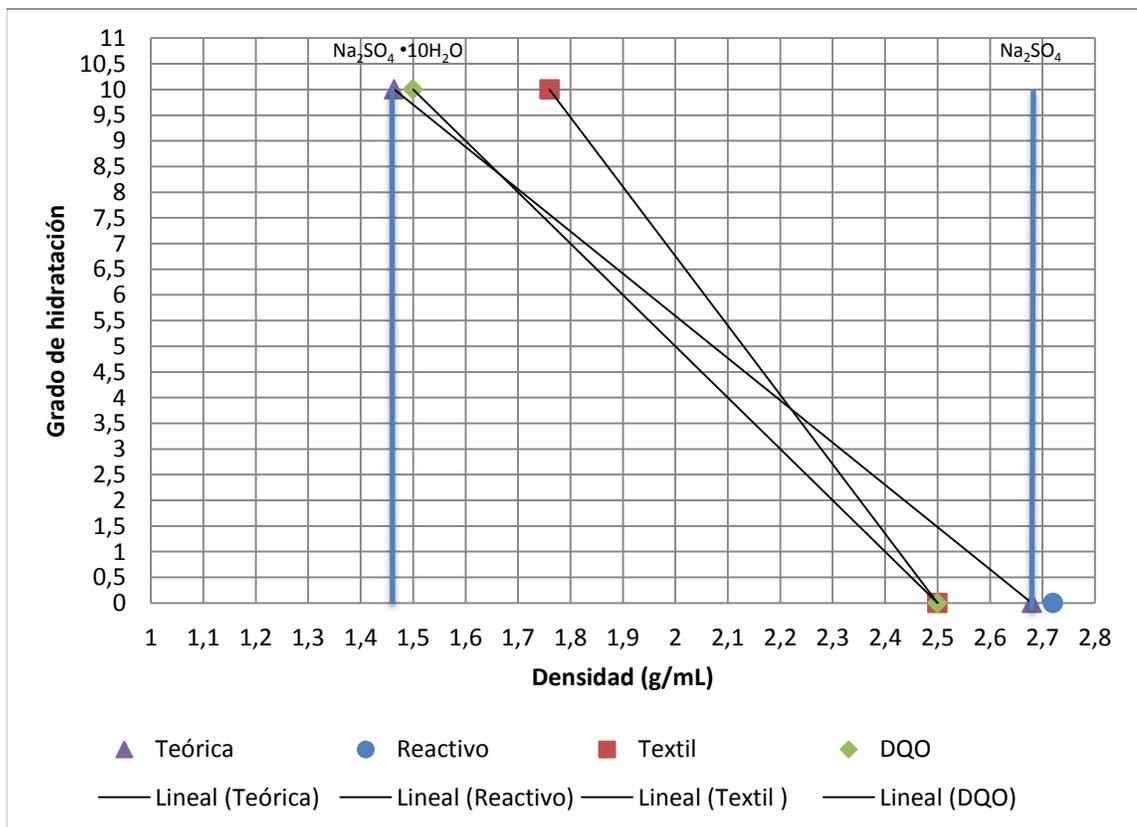
Tabla XXVIII. **Comparación de las ecuaciones de regresión del gradiente de consumo de densidad diaria en base a las tres soluciones de sulfato de sodio evaluadas, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a**

Tipo	Línea	Ecuación de regresión	Intervalo (ciclos)	R <sup>2</sup>
Reactivo		$\Delta\rho = 0,171\text{ciclo}^4 - 2,702\text{ciclo}^3 + 15,799\text{ciclo}^2 - 40,668\text{ciclo} + 39,520$	1 – 5	1
Textil		$\Delta\rho = 0,628\text{ciclo}^4 - 8,690\text{ciclo}^3 + 43,472\text{ciclo}^2 - 93,070\text{ciclo} + 72,620$	1 – 5	1
DQO		$\Delta\rho = 0,554\text{ciclo}^4 - 7,772\text{ciclo}^3 + 39,486\text{ciclo}^2 - 85,888\text{ciclo} + 67,780$	1 – 5	1

Fuente: elaboración propia.

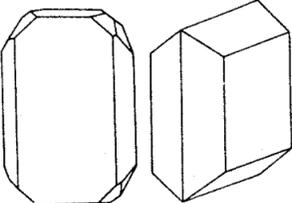
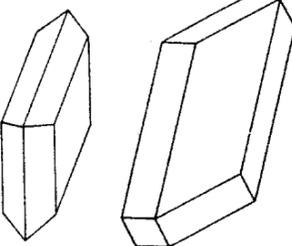
Resultados obtenidos en base al objetivo específico 2

Figura 40. **Comparación del grado de hidratación del cristal, en función de la densidad determinada del cristal de sulfato de sodio respectivo en base a las soluciones de sulfato de sodio evaluadas, según inciso 4 ASTM C 188-95**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Tabla XXIX. **Propiedades físico-mecánicas del cristal de sulfato de sodio**

<b>SULFATO DE SODIO</b>		
<b>Características y propiedades</b>	<b>Anhidro Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	<b>Decahidratado Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> • 10H<sub>2</sub>O</b>
<b>Forma mineral</b>	Thenardita	Mirabilita
<b>Densidad (g/mL)</b>	2,680	1,464
<b>Dureza (Escala Mohs)</b>	2,500	1 ½ - 2
<b>Estructura cristalina</b>	<b>Ortorrómico Piramidal,</b> centrado en el cuerpo  	<b>Monoclínico Prismático,</b> centrado en el cuerpo  

Fuente: [www.pt.goldenmap.com](http://www.pt.goldenmap.com). Consulta: 26 de agosto de 2013.

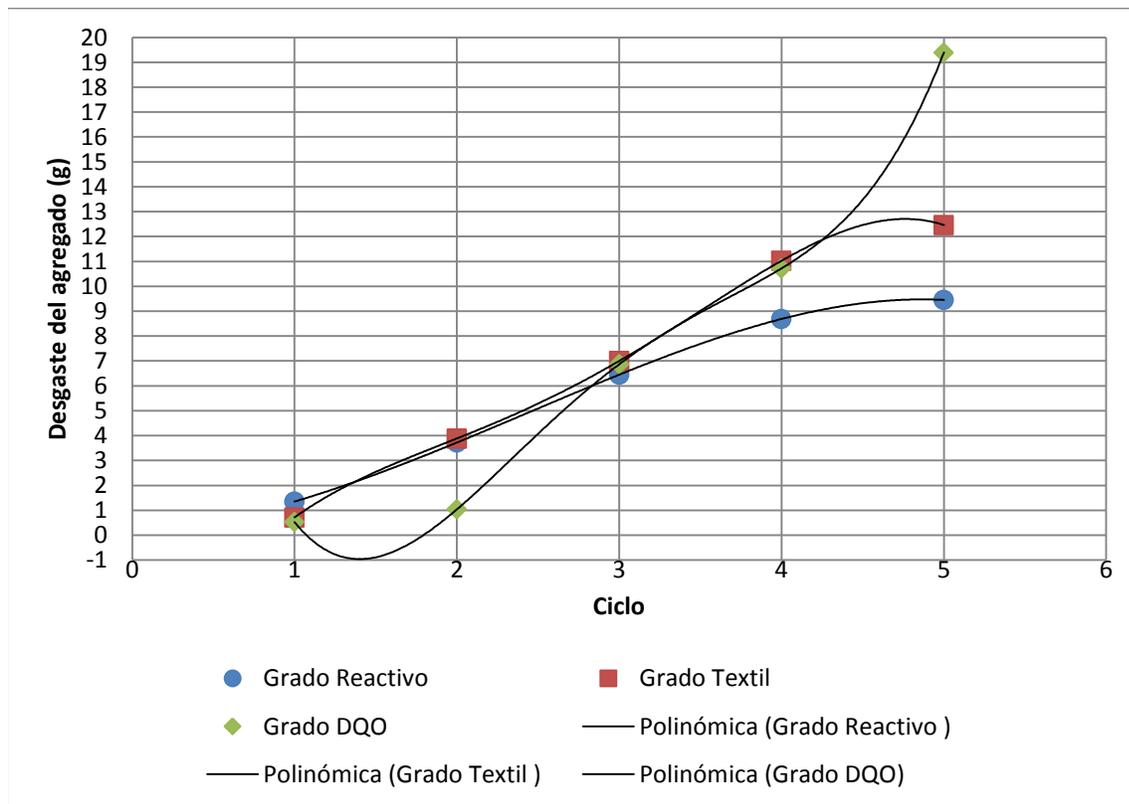
Resultados obtenidos en base al objetivo específico 3

Tabla XXX. **Análisis de varianza para la granulometría final del agregado grueso, en base a las soluciones de sulfato de sodio estudiadas, según inciso 9 ASTM C 88-99a**

ANÁLISIS DE VARIANZA DEL FACTOR GRANULOMETRÍA FINAL DEL AGREGADO GRUESO						
						Con una: Significancia $\alpha = 1\%$ Confianza $\beta = 99\%$
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Valor crítico para F	Probabilidad
Entre grupos	3,030	$(3 - 1)$ = 2	1,515	<b>6,354</b>	<b>10,925</b>	<b>0,033</b>
Dentro de los grupos	1,431	$(9 - 3)$ = 6	0,238			
Total	4,460	8				

Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Comparación de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, en base a las soluciones de sulfato de sodio evaluadas



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Tabla XXXI. **Comparación de las ecuaciones de regresión de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, en base a las soluciones de sulfato de sodio evaluadas**

Tipo	Línea	Ecuación de regresión	Intervalo (ciclos)	R <sup>2</sup>
Reactivo		desgaste del agregado = $-0,006\text{ciclo}^4 - 0,082\text{ciclo}^3 + 0,815\text{ciclo}^2 + 0,588\text{ciclo} + 0,035$	1 – 5	1
Textil		desgaste del agregado = $-0,186\text{ciclo}^4 + 2,026\text{ciclo}^3 - 7,524\text{ciclo}^2 + 14,357\text{ciclo} - 7,957$	1 – 5	1
DQO		desgaste del agregado = $0,587\text{ciclo}^4 - 7,084\text{ciclo}^3 + 30,491\text{ciclo}^2 - 50,178\text{ciclo} + 26,711$	1 – 5	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Análisis de varianza para la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, en base a las soluciones de sulfato de sodio estudiadas**

ANÁLISIS DE VARIANZA DEL FACTOR GRAVIMETRÍA DE LOS FRAGMENTOS DEL AGREGADO GRUESO						
						Con una: Significancia $\alpha = 1\%$ Confianza $\beta = 99\%$
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Valor crítico para F	Probabilidad
Entre grupos	3,030	$(3 - 1) = 2$	4,009	<b>0,125</b>	<b>6,927</b>	<b>0,883</b>
Dentro de los grupos	1,431	$(15 - 3) = 12$	31,972			
Total	4,460	14				

Fuente: elaboración propia.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El diseño experimental elaborado para el presente proyecto, permitió evaluar el grado de deterioro en el agregado en el curso de su medición, según la Norma ASTM C 88-99a. Además viabilizó la posibilidad de utilizar sulfato de sodio de diferentes grados de pureza, ratificando el uso alternativo de esta sal, no necesariamente de grado USP, como establece la norma. También amplió la información del procedimiento de realización del ensayo de solidez para agregados, y así orientar a los analistas que realizan este ensayo, en el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros del CII.

Mediante el diseño experimental elaborado, se utilizó la sal de sulfato de sodio anhidro grado reactivo, marca J. T. Baker, con un grado de pureza referido mayor del 99 por ciento. Este factor permitió utilizar la mencionada sal, como patrón referencia.

Así mismo, se seleccionó la sal de sulfato de sodio decahidratado grado textil, marca Quirey, con un grado de pureza del 99 por ciento, en vista que ha sido utilizado, desde hace varios años, en el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros del CII. Este reactivo tiene la particularidad en su uso para la ejecución del ensayo de agregados en base a la Norma ASTM C 88-99a, pero no existen antecedentes documentados de su pertinencia de uso, mediante evaluaciones controladas.

El sulfato de sodio resultado del tratamiento de los residuos líquidos de los reactivos del análisis de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), marca Merck y Hach, posee un grado de hidratación no establecido y un grado de pureza bajo. Se propuso la utilización de dicha sal, procedente de la ejecución del proyecto FODECYT No. 47-2009, como sal alternativa para el ensayo de solidez de agregados, que se realiza en la sección del CII mencionada. De manera que el plan de investigación de esta tesis, estableció plenamente la utilización de estas sales, bajo los términos de cumplimiento del inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a.

En base al objetivo específico 1 del presente proyecto, el factor de discrecionalidad empleado, fue cuantificar variaciones en la densidad de las tres soluciones de las sales evaluadas. Esta evolución de la densidad, fue monitoreada en el curso de los cinco ciclos de imbibición de las muestras de agregado y que reflejó la reducción de la densidad, debido a la absorción y adsorción de la sal en los intersticios del agregado grueso utilizado.

Comparando la reducción de la densidad de las soluciones salinas evaluadas, mediante la medición de los gradientes de reducción de densidad ( $\text{grd}$ ) y en función de la variación en cada uno de los cinco ciclos de estudio, la observación preliminar obtenida, fue la mayor absorción y adsorción por el agregado grueso, que se produjo en los ciclos 1 y 2 de cada tratamiento experimental. Esto debido a que en los dos primeros ciclos, los intersticios del agregado grueso están libres de cualquier obstrucción a la difusión de la sal. Además se verificó, que en los ciclos restantes, existió una disminución en el  $\text{grd}$  monitoreado.

La evolución en el gradiente de reducción de densidad, fue similar al compararse los resultados de cada monitoreo en las soluciones estudiadas. Así mismo, la densidad se conservó dentro del rango de 1,150 a 1,175 gramos por mililitro, según el inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a. Esto refleja una demanda de masa salina similar por el agregado, independiente de la pureza de la sal.

El potencial de Hidrógeno (pH), fue monitoreado como parámetro complementario, a la densidad de las soluciones salinas. Se midió y evaluó la variación del potencial de Hidrógeno en las soluciones salinas grado reactivo, grado textil y de la sal proveniente del tratamiento de los residuos líquidos del análisis de la DQO, comparándose entre sí. Aunque la solución de sulfato de sodio grado textil y la solución de sulfato de sodio proveniente del tratamiento de los residuos líquidos del análisis de la DQO, tuvieron un potencial de Hidrógeno más alto (en relación al pH de la solución de referencia, grado reactivo) es decir, fueron más alcalinas, eso no tuvo algún efecto significativo en los resultados.

Al evaluar el nivel de alcalinidad inicial en los tres tipos de sal estudiadas y en base al concepto de hidrólisis, se interpreta que el sulfato de sodio es una sal no hidrolizable, por lo que teóricamente dichas soluciones deben tener un potencial de Hidrógeno neutro. Evaluando los resultados de las mediciones del potencial de Hidrógeno inicial (pH<sub>o</sub>), se observa que existen componentes extraños que dieron pauta a que las soluciones posean un potencial de Hidrógeno inicial más alcalino.

La solución de sulfato de sodio grado reactivo, tuvo un potencial de Hidrógeno inicial de 8,630 y la solución salina grado textil de 8,880, lo que indica un incremento en la alcalinidad de 1,780 veces mayor en moles de oxhidrilos por litro.

Para el caso de la solución de sulfato de sodio del residuo del análisis de la DQO el potencial de Hidrógeno inicial fue de 9,780, indicando un incremento en la alcalinidad de 14,130 veces mayor en moles de oxhidrilos por litro, respecto a la solución salina de referencia.

La disminución del potencial de Hidrógeno inicial de la solución salina, como consecuencia del ensayo de solidez, a través de cada uno de los ciclos de tratamiento, puede atribuirse a la reactividad álcali-agregado, que sucede en el transcurso de las 16 horas del período de imbibición, a una temperatura de  $21 \pm 1$  grados Celsius, denominada reducción de alcalinidad en agregados como consecuencia del contenido de sílice disuelta, Norma ASTM C 1260-07.

Las observaciones en la variación del potencial de Hidrógeno para las respectivas soluciones salinas estudiadas, se comentan así: para la solución salina grado reactivo, la disminución del potencial de Hidrógeno inicial ( $\Delta\text{pH}$ ) fue de 0,040 (1,111 moles de oxhidrilos por litro menos). Para la solución salina grado textil, la disminución del potencial de Hidrógeno inicial ( $\Delta\text{pH}$ ) fue de igual magnitud, y para la solución del sulfato de sodio proveniente del tratamiento de los residuos líquidos del análisis de la DQO, la disminución del potencial de Hidrógeno inicial ( $\Delta\text{pH}$ ) fue de 0,180 (1,780 moles de oxhidrilos por litro menos).

La revisión de los datos anteriores, permitió interpretar que hay reacción colateral álcali-agregado, en vista que los únicos componentes en el sistema de evaluación de solidez estudiados, son el agregado grueso y la solución acuosa salina, pero como la reducción de alcalinidad es muy reducida, ratifica que el agregado grueso si fue efectivamente lavado para la realización del ensayo, lo que indica el cumplimiento del inciso 7.2 ASTM C 88-99a, en el estudio realizado.

Una causa que la solución de la sal proveniente del tratamiento de los residuos líquidos del análisis de la DQO tenga un potencial de hidrógeno inicial superior a las otras soluciones estudiadas, es debido al grado de pureza menor de la sal, por el contenido de aniones hidrolizables (carbonatos y bicarbonatos) presentes.

Basados en el análisis de varianza realizado a los resultados obtenidos del grado de las soluciones salinas evaluadas, en función de las diferencias de grado entre ciclos, se observó que no existe diferencia significativa en los resultados. El valor del parámetro estadístico  $F_{\text{experimental}}$ , para evaluar la diferencia de medias, fue igual a 0,007, mientras que el valor estadístico  $F_{\text{crítico}}$  fue igual a 6,927, tomado de la tabla de puntos porcentuales superiores para la distribución F.

En base al objetivo específico 2, el factor de discrecionalidad empleado, fue el grado de hidratación del cristal de cada una de las sales evaluadas en relación a su densidad y en función a los ciclos de tratamiento del ensayo de solidez. La información bibliográfica dará pauta para respaldar los resultados de densidad y complementar los efectos en la dureza y la estructura cristalina del sulfato de sodio según las referencias teóricas y que dependen del grado de hidratación de la sal.

Cuando un cristal de sulfato de sodio decahidratado ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), con una densidad de 1,464 gramos por mililitro, una dureza de  $1 \frac{1}{2}$  - 2 Mohs y una estructura cristalina monoclinica prismática, centrada en el cuerpo (según tabla XXIX), es sometido a un proceso de deshidratación, a  $110 \pm 5$  grados Celsius, durante 4 horas, se modifican cada una de las propiedades físicas del cristal, convirtiéndose por deshidratación, en un sulfato de sodio anhidro ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

La densidad alcanza un valor de 2,680 gramos por mililitro, la dureza un valor de 2,500 Mohs y la estructura cristalina se convierte a un sistema cristalino ortorrómbico piramidal, centrado en el cuerpo.

De manera que el cristal de sulfato de sodio, en su forma decahidratada, al ser sometido a un proceso de deshidratación, sufre una transformación en su estructura cristalina, obteniéndose un cristal de sulfato de sodio anhidro con una densidad mayor y una estructura cristalina: ortorrómbico piramidal, centrado en el cuerpo, con la capacidad suficiente de desarrollar esfuerzos mecánicos debido al crecimiento del cristal (hábito) y consecuentemente del desarrollo de sus propiedades complementarias, densidad y dureza.

Durante el estudio realizado, el agregado grueso fue saturado de sal decahidratada de sulfato de sodio mediante absorción-adsorción, y al ser sometido a los secados consecutivos, la sal se ocluyó dentro de los intersticios del agregado grueso. Así, que al momento de sufrir la transformación en su estructura cristalina y alcanzar su forma cristalina anhidra, la implicación, es que generó esfuerzos mecánicos, que produjeron fatiga y fracturación del agregado grueso, sobre todo en las zonas interiores del mismo en que hubiera porosidad.

Figura 42. **Detalle de las fracturas generadas en el proceso de secado del agregado grueso y resaltadas mediante el uso del indicador de contraste, fluoresceína sódica y observada mediante iluminación con luz ultravioleta**



Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos. LAFIQ. CII. USAC.

El anterior estudio realizado, fue establecido para obtener una observación veraz del fenómeno de fracturación, que redundará en la generación de los fragmentos menores que reducen la masa del agregado grueso original.

Según el control del grado de hidratación del cristal, formado a partir de cada una de las sales estudiadas y en relación a la medida de la densidad, utilizándose el matraz de Le Châtelier, según Norma ASTM C 188-95, fueron comparadas las densidades de las sales, decahidratada y anhidra y calculadas las variaciones en las densidades mencionadas.

En la tabla siguiente se reportan:

Tabla XXXIII. **Densidades medidas para cada sal, según Norma ASTM C 188-95 y la magnitud de variación en la densidad, por efecto del proceso de deshidratación realizado a 110°C, durante 4 horas.**

Sal	Densidad, $\rho$ (g/mL)		Variación
	Decahidratado	Anhidro	% $\Delta\rho$
Teórica	1,460	2,680	83,60
Grado reactivo	1,460	2,720	86,30
Grado textil	1,760	2,500	42,05
Grado residuo DQO	1,500	2,500	66,67

Fuente: elaboración propia.

Estos controles, indican que el sulfato de sodio decahidratado proveniente de las sales evaluadas, alcanzan su forma anhidra en el proceso de secado, según procedimiento del inciso 4.5 ASTM C 88-99a. Esto demuestra que las diferentes sales ejercieron, dentro del agregado, los esfuerzos mecánicos deseados y que ratifican el fundamento teórico del ensayo de solidez.

Es de mencionar, que aunque de lo observado en la tabla XXXIII, existen variaciones en la densidad de los cristales entre cada una de las sales evaluadas, que no implican diferencias significativas en los resultados al realizar las granulometrías y en la cuantificación de pérdida en peso del agregado clasificado en el tamizado.

En relación al objetivo específico 3, se enfocó en evaluar el efecto resultante de la sal, según inciso 9 ASTM C 88-99a, que repercute en los parámetros ensayados de determinación del peso residual, para cada muestra clasificada mediante tamizaje especificado, según inciso 6 ASTM C 88-99a.

Además se incluyó en el presente estudio de tesis, la evaluación gravimétrica de los fragmentos generados por el tratamiento salino, provenientes del agregado grueso y que fueron procesados mediante el procedimiento para manejo del papel filtro, gravimetría de los fragmentos del agregado, inciso 3.6.1.3, del presente trabajo.

La medición de la granulometría inicial y final al agregado grueso, se realizó conjuntamente con el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros del CII/USAC, en base al inciso 9 ASTM C 88-99a.

Los resultados promedio del triplicado del ensayo realizado con cada una de las sales evaluadas, reportados mediante el informe No. SC-055, orden de trabajo no. 30254, del laboratorio mencionado, se integran en la siguiente tabla:

Tabla XXXIV. **Resultados promedio del ensayo de estabilidad volumétrica de agregados por ataque de sulfato de sodio, Norma ASTM C 88-99a, en base al Informe presentado por el Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros**

Sulfato de sodio, grado	Desgaste referido a granulometría inicial (%)	
	Experimental	Especificación (Límite inferior, según inciso 12.1 ASTM C 88-99a)
Reactivo	0,337	≥ 6%
Textil	0,199	
DQO	1,493	

Fuente: elaboración propia. Según Norma ASTM C 88-99a.

De los resultados obtenidos para el cálculo del desgaste, se observó que el agregado grueso utilizado, tiene una solidez alta, debido al cumplimiento de poseer un desgaste menor al límite inferior de la especificación mencionada y ratificado con cada una de las sales estudiadas.

Mediante el análisis de varianza realizado a la granulometría final del agregado grueso, en base a cada una de las soluciones, entre las diferencias de las medias para cada una de las sales evaluadas, el resultado obtenido fue que no existe diferencia significativa, en base a el valor del parámetro estadístico  $F_{\text{experimental}}$  para evaluar la diferencia de medias, y cuyo valor fue igual a 6,354, mientras que el valor estadístico  $F_{\text{crítico}}$  fue 10,925, tomado de la tabla de puntos porcentuales superiores para la distribución F.

Esto permite concluir que cualquiera de las sales estudiadas, puede utilizarse para la realización del ensayo de solidez. De manera que la recomendación que establece el inciso 5.1 ASTM C 88-99a, no debe plantearse con una sal de grado de pureza tan alto, y sobre todo de grado USP. Por lo que puede ser recomendado un grado industrial, como el textil estudiado a consideración. Así mismo, se puede interpretar de los resultados obtenidos, que la sal proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, no establece diferencia significativa, por lo que podría refinarse y ser una sal posible de sustituir a la que la norma recomienda.

Adicionalmente al estudio de la granulometría del agregado grueso, se realizó una evaluación gravimétrica a los fragmentos colectados por filtración, en cada uno de los ciclos, los cuales fueron refinados mediante lavados continuos y verificada la eliminación de sal residual con el test de cloruro de bario, los cuales correlacionan con los resultados de la granulometría del agregado grueso.

Esto ratificó que la pérdida de solidez del agregado grueso, se debe a que dichos fragmentos son resultado del fraccionamiento del agregado, por efecto de crecimiento cristalino del sulfato de sodio anhidro.

Según el análisis de varianza realizado al peso total de fragmentos colectados de los cinco ciclos, para cada una de las sales evaluadas, se estableció que no existió diferencia significativa en base al valor del parámetro estadístico  $F_{\text{experimental}}$  para evaluar la diferencia de medias, y cuyo valor fue igual a 0,125, mientras que el valor estadístico  $F_{\text{crítico}}$  fue 6,927, tomado de la tabla de puntos porcentuales superiores para la distribución F.

Por lo tanto, queda comprobado que la hipótesis nula ( $H_0$ ) planteada, queda aprobada como verdadera, rechazándose la hipótesis alternativa ( $H_1$ ).



## CONCLUSIONES

1. El presente proyecto fue posible ejecutarlo y alcanzó los resultados deseados, según el diseño metodológico de la investigación.
2. No existe variación en las capacidades de absorción-adsorción de sulfato de sodio por el agregado, en función de los gradientes de reducción de densidad de las soluciones salinas estudiadas.
3. No existe variación en el potencial de Hidrógeno (pHo) de las tres soluciones salinas estudiadas, para el control del efectivo lavado del agregado grueso utilizado en el estudio.
4. No existe diferencia significativa en el gradiente de reducción de densidad (grd), entre las soluciones salinas evaluadas, en el curso de los ciclos de ensayo de solidez, lo que ratifica un comportamiento similar de cada una de las sales estudiadas.
5. Existe diferencia en la variación de la densidad de cada cristal de sulfato de sodio estudiado, en su transición de la forma cristalina decahidratada a la anhidra y como consecuencia en su capacidad de desarrollar los efectos mecánicos deseados sobre el agregado grueso.

6. La evaluación estadística realizada para el examen cuantitativo, sección 9 ASTM C 88-99a, permitió determinar que no existe diferencia significativa en el porcentaje de pérdida pesada, en función de la serie de tamices seleccionados, según tabla 1, sección 9 ASTM C 88-99a.
  
7. A través de procedimientos planteados, se pudo reutilizar la solución salina para cada una de las repeticiones respectivas, de las tres sales evaluadas.

## RECOMENDACIONES

1. Utilizar como parámetro complementario de medición en las soluciones de sulfato de sodio (independiente del tipo de sal utilizada), el potencial de Hidrógeno (pHo), para verificar el efectivo lavado al agregado a ensayar.
2. Monitorear la densidad de la solución de sulfato de sodio utilizada entre cada uno de los ciclos realizados (independiente del tipo de sal empleada), para verificar el cumplimiento de los requerimientos que establece la norma en el inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a.
3. Filtrar permanentemente la solución de sulfato de sodio (independiente del tipo de sal utilizada), después del período de imbibición en cada uno de los 5 ciclos de tratamiento, para eliminar núcleos de cristalización y focos de contaminación.
4. Realizar un monitoreo del peso total de los fragmentos procedentes de los agregados gruesos, para corroborar el desgaste del agregado en forma alternativa.
5. Realizar procedimiento para determinar la densidad de los cristales de sulfato de sodio, decahidratado y anhidro, mediante la Norma ASTM C 188-95 (independiente del tipo de sal utilizada).

6. Realizar un estudio de la evolución en la pérdida de agua (tesis de pregrado), mediante termogravimetría (TGA), a cada una de las sales de sulfato de sodio estudiadas.
7. Utilizar el procedimiento indicado como técnica de fluorescencia para el agregado grueso, con el fin de tener una evidencia visual de las fisuras provocadas por los esfuerzos mecánicos, producidos en los intersticios del mismo, debido a la acción del agente salino.
8. Utilizar agua desmineralizada para la realización del último lavado preparatorio del agregado y para el lavado en el quinto ciclo, en sustitución del agua de grifo, para asegurar que el análisis del agregado se realiza libre de sólidos extraños que incrementan los fragmentos en los lavados.
9. Evitar la realización de molienda adicional, al agregado grueso, en el laboratorio, para la obtención de muestras de agregado del tamaño requerido, según inciso 6 ASTM C 88-99a.
10. Complementar la información del ensayo de solidez, realizando mediciones de los parámetros siguientes: densidad, dureza, reactividad potencial, resistencia al desgaste y granulometría, al agregado grueso.

## BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing and Material. *Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate*. ASTM C 88-99a. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 1999. 5 p.
2. BENÍTEZ PACHECO, Ingrid; GARCÍA GUERRA, César. *Evaluación de la técnica de tratamiento del desecho líquido del análisis instrumental de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) generado por laboratorios analíticos guatemaltecos, para atenuar el impacto ambiental*. Proyecto No. 47-2009. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT), Fondo para el Desarrollo Científico y Tecnológico (FODECYT), Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACYT), Laboratorio de Análisis Físicoquímicos (LAFIQ), Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), y Dirección General de Investigación (DIGI), USAC. Guatemala, 2009. 75 p.
3. ECUTÉ BANTES, Francisco Javier. *Evaluación y variabilidad de las propiedades de los agregados de dos plantas, una en escuintla y la otra en Tecún Umán*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2003. 41 p.

4. FUENTES HUETTE, Carlos Eduardo. *Materiales de construcción en Guatemala y su aplicación actual*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 230 p.
5. GARCÍA RODRÍGUEZ, Felipe de Jesús. *Evaluación de estructuras de concreto*. México: IMCYC, 2002. 146 p.
6. GONZÁLES DE LA COTERA, Manuel. *Ataque químico al concreto*. Perú: ACI, Capítulo Peruano sobre: Corrosión en Estructuras de Concreto, 1991. 18 p.
7. HARRIS, Daniel C. *Quantitative chemical analysis*. 7a ed. Estados Unidos de Norteamérica: W. H. Freeman and Company, 2003. 663 p.
8. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos; BAPTISTA LUCIO, Pilar. *Metodología de la Investigación*. 2a. ed. México: McGraw-Hill, 1998. 501 p.
9. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. *Cemento y concreto resistentes a sulfatos. El concreto en la obra, problemas, causas y soluciones*. México: IMCYC. Sección coleccionable 9. Octubre, 2006. 4 p.
10. JONES, A. G. *Crystallization process systems*. Londres: Butterworth-Heinemann, Elsevier Science, 2002. 356 p.

11. KOSMATKA, Steven H.; KERKHOFF, Beatrix; PANARESE, William C.; TANESI, Jussara. *Diseño y control de mezclas de concreto*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association -PCA-, 2004. 449 p.
12. KUMAR, Metha P.; MONTEIRO, Paulo J. M. *Concreto: estructura, propiedades y materiales*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. México:IMCYC, 1998. 381 p.
13. LÓPEZ CÓRDOVA, Sergio Iván. *Determinación de las características: Físicas, mecánicas, químicas y petrográficas de agregados, extraídos del Río Samalá, del municipio de San Sebastián, Retalhuleu y del Río San Miguel Panán, del municipio de San Miguel Panán, Suchitepéquez, para su uso en la Industria del Concreto*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 270 p.
14. MACARRULLA, José M.; GOÑI, Félix M. *Agregados*. España: Reverté, 1978. 208 p.
15. MAÑUNGA, Tatiana; GUTIÉRREZ, Héctor Mario; RODRÍGUEZ, Victoria; VILLAREAL Díaz, Jenny Alexandra. Tratamiento de residuos de DQO generados en laboratorios de análisis ambientales. *Ingeniería e Investigación*. Bogotá, Colombia: REDALYC, 2010, Vol. 30, núm. 2, 9 p.
16. MARMION, Daniel M. *Handbook of US: sieving of aggregates, fine and coarse*. 2a ed. Estados Unidos de Norteamérica: John Wiley & Sons, 1984. 1813 p.

17. MARTÍNEZ DE LA CUESTA, Pedro J.; RUS MARTÍNEZ, Eloísa. *Operaciones de Separación en Ingeniería Química. Métodos de Cálculo*. Madrid: Prentice Hall, Pearson Educación, 2004. 1040 p.
18. MERSMANN, A. *Crystallization technology handbook*. 2a ed. Garching, Alemania: Technical University of Munich, Marcel Dekker, Inc., 2001. 781 p.
19. MILLER, James N.; MILLER, Jane C. *Estadística y quimiometría para química analítica*. 4a ed. Madrid: Pearson Educación, 2002. 278 p.
20. MONTGOMERY, Douglas C. *Diseño y análisis de experimentos*. 2a ed. México: Limusa, 2004. 686 p.
21. NAVIDI, William. *Statistics for engineers and scientists*. 3a ed. Estados Unidos de Norteamérica: McGraw-Hill, 2011. 912 p.
22. ORTÍZ DE LEÓN, Evelyn Elizabeth. *Calidad de agregados producidos en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2004. 111 p.
23. PALENCIA ALVARADO, César Augusto. *Los materiales en la construcción Tecnología y ensayos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1970. 242 p.
24. PULIDO, Humberto G. *Calidad total y productividad*. 3a ed. México: McGraw-Hill, 2010. 363 p.

25. RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, Regina María. *Autenticación histológica de los agregados finos y gruesos*. Trabajo de graduación de Lic. Químico Farmacéutico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, 2000. 153 p.
26. SECRETARÍA DE LA SALUD. *Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos*. 9a ed. México: Secretaría de la Salud, 2008. Volumen 1. 13701 p.
27. SPIEGEL, Murray R. *Teoría y problemas de probabilidad y estadística*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2006. 416 p.
28. TREYBAL, Robert Ewald. *Operaciones de transferencia de masa*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1980. 858 p.
29. WALPOLE, Ronald E.; MYERS, Raymond H.; MYERS, Sharon L.; YE, Keying. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 8a ed. México: Pearson Educación, 2007. 840 p.



## **APÉNDICES**



## 1. Muestra de cálculo

- Cálculo de la densidad de la solución de cada una de las sales evaluadas:

$$\rho_s = \frac{m_{sp} - m_t}{V_p} \quad \text{[Ecuación No.1]}$$

Donde:

$\rho_s$  = densidad de la solución (g/mL)

$m_{sp}$  = masa solución en picnómetro (g)

$m_t$  = masa tara (g)

$V_p$  = volumen del picnómetro (mL)

Por lo tanto, la determinación de la densidad de la solución de sulfato de sodio grado reactivo, repetición 1, se realizó de la siguiente manera:

$$\rho_s = \frac{64,532 - 35,291}{25,000}$$

$$= 1,169 \text{ g/mL}$$

De igual forma se realizaron los cálculos de las densidades de las soluciones de las tres diferentes sales evaluadas de las tablas XXXV, XXXVI, XXXVII, XXXVIII, XXXIX, XL, XLI, XLII, XLIII, XLIV, XLV, XLVI, XLVII, XLVIII y XLIX.

- Determinación del gradiente de densidad del cristal de la sal, en función del grado de hidratación:

$$\Delta\rho = \rho_{c.a} - \rho_{c.d} \quad \text{[Ecuación No.2]}$$

Donde:

$\Delta\rho$  = gradiente de la densidad del cristal (g/mL)

$\rho_{c.a}$  = densidad del cristal de la sal anhidra (g/mL)

$\rho_{c.d}$  = densidad del cristal de la sal decahidratada (g/mL)

Por lo tanto, la determinación del gradiente de la densidad del cristal de la sal grado textil, se realizó de la siguiente manera:

$$\Delta\rho = 2,50 - 1,76$$

$$= 0,74 \text{ g/mL}$$

De igual forma se realizaron los cálculos de los gradientes de las densidades de los cristales de las tres diferentes sales evaluadas de las tablas L, LI y LII.

- Cálculo del valor promedio

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{[Ecuación No. 3]}$$

Donde:

- $\bar{x}$  = valor promedio
- $x_i$  = valor del dato i
- n = número total de datos

Por lo tanto, la determinación promedio del consumo de la densidad de la solución de sulfato de sodio grado reactivo, se realizó de la siguiente manera:

$$\bar{x} = \frac{12,080 + 12,160}{2}$$

$$\bar{x} = 12,120 \text{ g/mL}$$

De igual forma se realizaron los cálculos del valor promedio de las tablas XXXIX, XLIV, XLIX, LIII, LVI, LV, LVI, LVII, LVIII, LIX, LX, LXI y LXII.



## 2. Datos calculados

Tabla XXXV. **Control de la densidad de la solución de sulfato de sodio, grado reactivo, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a. Repetición 1**

Ciclo	Peso picnómetro con solución (g)	Densidad de la solución (g/mL)	Potencial de hidrógeno (pH)
0	64,532	1,169	8,630
1	64,532	1,169	8,630
2	64,230	1,157	8,630
3	64,166	1,155	8,590
4	64,153	1,154	8,590
5	64,141	1,154	8,590
6	64,133	1,153	8,590

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Control de la densidad de la solución de sulfato de sodio, grado reactivo, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a. Repetición 2 y 3**

Ciclo	Peso picnómetro con solución (g)	Densidad de la solución (g/mL)	Potencial de hidrógeno (pH)
0	64,524	1,169	8,630
1	64,524	1,169	8,630
2	64,220	1,157	8,630
3	64,159	1,154	8,590
4	64,142	1,154	8,590
5	64,131	1,153	8,590
6	64,128	1,153	8,590

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Gradiente de consumo de sulfato de sodio, grado reactivo, en el transcurso de los 5 ciclos de imbibición, según inciso 8.1 ASTM C 88-99a. Repetición 1**

<b>Diferencia entre ciclos</b>	<b>Gradiente de consumo de sal utilizada (g)</b>
0-1	12,080
1-2	2,560
2-3	0,520
3-4	0,480
4-5	0,320
<b>Total</b>	<b>15,96</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Gradiente de consumo de sulfato de sodio, grado reactivo, en el transcurso de los 5 ciclos de imbibición, según inciso 8.1 ASTM C 88-99a. Repetición 2 y 3**

<b>Diferencia entre ciclos</b>	<b>Gradiente de consumo de sal utilizada (g)</b>
0-1	12,160
1-2	2,440
2-3	0,680
3-4	0,440
4-5	0,120
<b>Total</b>	<b>15,840</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Consumo promedio del gradiente de consumo de sulfato de sodio, grado reactivo, en el transcurso de los 5 ciclos de imbibición, según inciso 8.1 ASTM C 88-99a**

Ciclo	Consumo		Promedio consumo (g)
	Gradiente de consumo de sal utilizada (g) Repetición 1	Gradiente de consumo de sal utilizada (g) Repetición 2 y 3	
0-1	12,080	12,160	12,120
1-2	2,560	2,440	2,500
2-3	0,520	0,680	0,600
3-4	0,480	0,440	0,460
4-5	0,320	0,120	0,220
		<b>Total</b>	<b>15,900</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Control de la densidad de la solución de sulfato de sodio, grado textil, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a. Repetición 1**

Ciclo	Peso picnómetro con solución (g)	Densidad de la solución (g/mL)	Potencial de hidrógeno (pH)
0	64,604	1,172	8.000
1	64,604	1,172	8.000
2	64,228	1,157	8.000
3	64,208	1,156	8.000
4	64,183	1,155	8.000
5	64,166	1,155	8.000
6	64,150	1,154	8.000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Control de la densidad de la solución de sulfato de sodio, grado textil, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a. Repetición 2 y 3**

Ciclo	Peso picnómetro con solución (g)	Densidad de la solución (g/mL)	Potencial de hidrógeno (pH)
0	64,621	1,173	8,880
1	64,621	1,173	8,880
2	64,249	1,158	8,880
3	64,224	1,157	8,840
4	64,203	1,156	8,840
5	64,191	1,156	8,840
6	64,181	1,155	8,840

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Gradiente de consumo de sulfato de sodio, grado textil, en el transcurso de los 5 ciclos de imbibición, según inciso 8.1 ASTM C 88-99a. Repetición 1**

Diferencia entre ciclos	Gradiente de consumo de sal utilizada (g)
0-1	15,040
1-2	0,800
2-3	1,000
3-4	0,680
4-5	0,640
<b>Total</b>	<b>18,160</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Gradiente de consumo de sulfato de sodio, grado textil, en el transcurso de los 5 ciclos de imbibición, según inciso 8.1 ASTM C 88-99a. Repetición 2 y 3**

Diferencia entre ciclos	Gradiente de consumo de sal utilizada (g)
0-1	14,880
1-2	1,000
2-3	0,840
3-4	0,480
4-5	0,400
<b>Total</b>	<b>17,600</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Consumo promedio del gradiente de consumo de sulfato de sodio, grado textil, en el transcurso de los 5 ciclos de imbibición, según inciso 8.1 ASTM C 88-99a.**

Ciclo	Consumo		Promedio consumo (g)
	Gradiente de consumo de sal utilizada (g) Repetición 1	Gradiente de consumo de sal utilizada (g) Repetición 2 y 3	
0-1	15,040	14,880	14,960
1-2	0,800	1,000	0,900
2-3	1,000	0,840	0,920
3-4	0,680	0,480	0,580
4-5	0,640	0,400	0,520
		<b>Total</b>	<b>17,880</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Control de la densidad de la solución de sulfato de sodio, proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a. Repetición 1 y 2**

<b>Ciclo</b>	<b>Peso picnómetro con solución (g)</b>	<b>Densidad de la solución (g/mL)</b>	<b>Potencial de hidrógeno (pH)</b>
0	64,580	1,171	9,880
1	64,580	1,171	9,880
2	64,225	1,157	9,830
3	64,209	1,156	9,800
4	64,196	1,156	9,800
5	64,185	1,155	9,800
6	64,176	1,155	9,770

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Control de la densidad de la solución de sulfato de sodio, proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a. Repetición 3**

<b>Ciclo</b>	<b>Peso picnómetro con solución (g)</b>	<b>Densidad de la solución (g/mL)</b>	<b>Potencial de hidrógeno (pH)</b>
0	64,569	1,171	9,780
1	64,568	1,171	9,780
2	64,215	1,156	9,610
3	64,199	1,156	9,600
4	64,185	1,155	9,600
5	64,172	1,155	9,530
6	64,162	1,154	9,530

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Gradiente de consumo de sulfato de sodio, proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, en el transcurso de los 5 ciclos de imbibición, según inciso 8.1 ASTM C 88-99a. Repetición 1 y 2**

<b>Diferencia entre ciclos</b>	<b>Gradiente de consumo de sal utilizada (g)</b>
0-1	14,200
1-2	0,640
2-3	0,520
3-4	0,440
4-5	0,360
<b>Total</b>	<b>16,160</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Gradiente de consumo de sulfato de sodio, proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, en el transcurso de los 5 ciclos de imbibición, según inciso 8.1 ASTM C 88-99a. Repetición 3**

<b>Diferencia entre ciclos</b>	<b>Gradiente de consumo de sal utilizada (g)</b>
0-1	14,120
1-2	0,640
2-3	0,560
3-4	0,520
4-5	0,400
<b>Total</b>	<b>16,240</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Consumo promedio del gradiente de consumo de sulfato de sodio, proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, en el transcurso de los 5 ciclos de imbibición, según inciso 8.1 ASTM C 88-99a**

Ciclo	Consumo		Promedio consumo (g)
	Gradiente de consumo de sal utilizada (g) Repetición 1	Gradiente de consumo de sal utilizada (g) Repetición 2 y 3	
0-1	14,200	14,120	14,160
1-2	0,640	0,640	0,640
2-3	0,520	0,560	0,540
3-4	0,440	0,520	0,480
4-5	0,360	0,400	0,380
		<b>Total</b>	<b>16,200</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Control del grado de hidratación del cristal, en función de la densidad determinada del cristal de sulfato de sodio grado textil, según inciso 4 ASTM C 188-95**

Forma	Grado de hidratación	Densidad (g/mL)
Anhidro	0	2,500
	1	---
	2	---
	⋮	⋮
	8	---
	9	---
	10	1,760
Decahidratado	$\Delta\rho$	0,740

Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **Control del grado de hidratación del cristal, en función de la densidad determinada del cristal de sulfato de sodio proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO, según inciso 4 ASTM C 188-95**

Forma	Grado de hidratación	Densidad (g/mL)
Anhidro	0	2,500
	1	---
	2	---
	⋮	⋮
	8	---
	9	---
	10	1,500
Decahidratado	$\Delta\rho$	1,000

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Control del grado de hidratación del cristal, en función de la densidad determinada del cristal de cada una de las sales evaluadas, según inciso 4 ASTM C 188-95**

Forma	Grado de hidratación	Densidad Teórica (g/mL)	Densidad Reactivo (g/mL)	Densidad Textil (g/mL)	Densidad DQO (g/mL)
Anhidro	0	2,680	2,720	2,500	2,500
	1	---	---	---	---
	2	---	---	---	---
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	8	---	---	---	---
	9	---	---	---	---
	10	1,460	No hay dato	1,760	1,500
Decahidratado	$\Delta\rho$	1,000	2,720	0,740	1,000

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Control de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, por la solución de sulfato de sodio grado reactivo. Repetición 1**

No. ciclo	<b>A</b> -tara de papel filtro numerado- (g)	<b>B</b> -papel filtro seco con sulfato- (g)	<b>C</b> -papel filtro libre de sulfatos con fragmentos de partículas de agregado- (g)	<b>C-A</b> -masa partículas de agregado producido por el Desgaste de la acción del sulfato de sodio- (g)	<b>Masa total</b> -sumatoria diaria- (g)
1.	0,552	0,883	0,637	0,085	<b>1,231</b>
	0,565	1,203	0,970	0,405	
	0,565	1,721	1,306	0,741	
2.	0,554	0,831	0,664	0,110	<b>3,473</b>
	0,572	2,856	1,651	1,079	
	0,559	4,983	2,843	2,284	
3.	0,556	1,154	0,924	0,368	<b>6,248</b>
	0,548	0,932	0,686	0,138	
	0,537	1,532	6,279	5,742	
4.	0,572	0,786	0,721	0,149	<b>8,639</b>
	0,558	4,012	1,265	0,707	
	0,540	1,843	8,323	7,783	
5.	0,568	0,976	0,588	0,020	<b>9,487</b>
	0,572	12,508	5,390	4,818	
	0,541	13,112	5,190	4,649	
				<b>Total</b>	<b>29,078</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIV. **Control de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, por la solución de sulfato de sodio grado reactivo. Repetición 2**

No. ciclo	<b>A</b> -tara de papel filtro numerado- (g)	<b>B</b> -papel filtro seco con sulfato- (g)	<b>C</b> -papel filtro libre de sulfatos con fragmentos de partículas de agregado- (g)	<b>C-A</b> -masa partículas de agregado producido por el Desgaste de la acción del sulfato de sodio- (g)	<b>Masa total</b> -sumatoria diaria- (g)
1.	0,552	2,222	1,376	0,824	1,125
	0,558	0,931	0,761	0,203	
	0,561	0,801	0,659	0,098	
2.	0,571	2,981	1,199	0,628	4,211
	0,557	3,598	1,873	1,316	
	0,546	4,367	2,813	2,267	
3.	0,551	0,819	0,637	0,086	6,767
	0,543	0,796	0,569	0,026	
	0,537	36,83	7,192	6,655	
4.	0,545	0,899	0,602	0,057	8,719
	0,553	6,906	2,961	2,408	
	0,543	9,293	6,797	6,254	
5.	0,561	0,808	0,613	0,052	9,457
	0,558	3,782	1,711	1,153	
	0,571	10,933	8,823	8,252	
				<b>Total</b>	<b>30,279</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. **Control de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, por la solución de sulfato de sodio grado reactivo. Repetición 3**

No. ciclo	A -tara de papel filtro numerado- (g)	B -papel filtro seco con sulfato- (g)	C -papel filtro libre de sulfatos con fragmentos de partículas de agregado- (g)	C-A -masa partículas de agregado producido por el Desgaste de la acción del sulfato de sodio- (g)	Masa total -sumatoria diaria- (g)
1.	0,543	0,942	0,693	0,150	1,693
	0,552	2,138	1,675	1,123	
	0,563	1,512	0,983	0,420	
2.	0,562	1,813	1,298	0,736	3,481
	0,571	3,619	1,994	1,423	
	0,551	2,983	1,873	1,322	
3.	0,547	1,541	1,299	0,752	6,331
	0,544	4,476	1,852	1,308	
	0,546	36,041	4817	4,271	
4.	0,554	0,907	0,596	0,042	8,703
	0,538	3,906	2,888	2,350	
	0,553	7,607	6,864	6,311	
5.	0,559	0,775	0,611	0,052	9,410
	0,557	5,770	3,636	3,079	
	0,553	10,731	6,832	6,279	
				<b>Total</b>	<b>29,618</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVI. **Control de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, por la solución de sulfato de sodio grado textil. Repetición 1**

No. ciclo	<b>A</b> -tara de papel filtro numerado- (g)	<b>B</b> -papel filtro seco con sulfato- (g)	<b>C</b> -papel filtro libre de sulfatos con fragmentos de partículas de agregado- (g)	<b>C-A</b> -masa partículas de agregado producido por el Desgaste de la acción del sulfato de sodio- (g)	<b>Masa total</b> -sumatoria diaria- (g)
1.	0,552	0,782	0,622	0,070	0,506
	0,565	0,953	0,771	0,206	
	0,565	1,645	0,795	0,230	
2.	0,614	1,062	0,964	0,350	3,551
	0,623	1,893	1,445	0,822	
	0,618	3,021	2,997	2,379	
3.	0,614	1,025	0,956	0,342	6,404
	0,622	2,895	0,942	0,320	
	0,618	13,319	6,360	5,742	
4.	0,614	0,863	0,745	0,131	11,123
	0,617	3,638	2,121	1,504	
	0,616	12,78	10,104	9,488	
5.	0,614	0,885	0,724	0,110	12,612
	0,611	11,210	6,271	5,660	
	0,633	11,299	7,475	6,842	
				<b>Total</b>	<b>34,196</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVII. **Control de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, por la solución de sulfato de sodio grado textil. Repetición 2**

No. ciclo	<b>A</b> -tara de papel filtro numerado- (g)	<b>B</b> -papel filtro seco con sulfato- (g)	<b>C</b> -papel filtro libre de sulfatos con fragmentos de partículas de agregado- (g)	<b>C-A</b> -masa partículas de agregado producido por el Desgaste de la acción del sulfato de sodio- (g)	<b>Masa total</b> -sumatoria diaria- (g)
1.	0,610	2,242	1,362	0,752	0,947
	0,614	0,925	0,759	0,145	
	0,612	0,797	0,662	0,050	
2.	0,633	2,893	1,308	0,675	4,022
	0,611	3,621	1,828	1,217	
	0,623	4,357	2,753	2,130	
3.	0,631	3,059	1,863	1,232	7,168
	0,621	4,814	3,041	2,420	
	0,614	8,141	4,130	3,516	
4.	0,605	6,910	4,458	3,853	10,560
	0,608	5,760	4,110	3,502	
	0,616	6,239	3,821	3,205	
5.	0,617	6,200	4,229	3,612	12,384
	0,596	7,201	5,033	4,437	
	0,607	6,670	4,942	4,335	
				<b>Total</b>	<b>35,081</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVIII. **Control de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, por la solución de sulfato de sodio grado textil. Repetición 3**

No. ciclo	<b>A</b> -tara de papel filtro numerado- (g)	<b>B</b> -papel filtro seco con sulfato- (g)	<b>C</b> -papel filtro libre de sulfatos con fragmentos de partículas de agregado- (g)	<b>C-A</b> -masa partículas de agregado producido por el Desgaste de la acción del sulfato de sodio- (g)	<b>Masa total</b> -sumatoria diaria- (g)
1.	0,617	0,848	0,643	0,026	0,695
	0,608	2,148	1,277	0,669	
	0,612	1,936	1,420	0,808	
2.	0,617	3,528	2,981	2,364	4,087
	0,606	2,944	1,521	0,915	
	0,622	4,408	3,711	3,089	
3.	0,620	5,079	2,073	1,453	7,428
	0,616	6,877	3,502	2,886	
	0,607	9,325	6,139	5,532	
4.	0,613	8,232	3,827	3,214	11,395
	0,598	7,762	3,247	2,649	
	0,606	8,799	5,641	5,035	
5.	0,597	7,830	3,648	3,051	12,384
	0,620	5,428	4,918	4,298	
	0,617	0,848	0,643	0,026	
				<b>Total</b>	<b>35,989</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIX. **Control de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, por la solución de sulfato proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO. Repetición 1**

No. ciclo	A -tara de papel filtro numerado- (g)	B -papel filtro seco con sulfato- (g)	C -papel filtro libre de sulfatos con fragmentos de partículas de agregado- (g)	C-A -masa partículas de agregado producido por el Desgaste de la acción del sulfato de sodio- (g)	Masa total -sumatoria diaria- (g)
1.	0,607	0,902	0,723	0,116	0,513
	0,621	0,771	0,666	0,045	
	0,611	1,101	0,963	0,352	
2.	0,606	1,319	1,057	0,451	0,958
	0,620	0,790	0,632	0,012	
	0,606	1,323	1,101	0,495	
3.	0,607	5,515	2,372	1,765	7,104
	0,608	7,098	3,579	2,971	
	0,616	6,949	2,984	2,368	
4.	0,604	12,879	4,828	4,224	10,705
	0,601	13,353	2,906	2,305	
	0,617	14,136	4,793	4,176	
5.	0,595	7,579	4,604	4,009	19,838
	0,614	11,292	9,331	8,717	
	0,611	9,919	7,723	7,112	
				<b>Total</b>	<b>39,118</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla LX. **Control de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, por la solución de sulfato proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO. Repetición 2**

No. ciclo	A -tara de papel filtro numerado- (g)	B -papel filtro seco con sulfato- (g)	C -papel filtro libre de sulfatos con fragmentos de partículas de agregado- (g)	C-A -masa partículas de agregado producido por el Desgaste de la acción del sulfato de sodio- (g)	Masa total -sumatoria diaria- (g)
1.	0,595	0,743	0,630	0,035	0,552
	0,607	0,767	0,685	0,078	
	0,609	1,223	1,048	0,439	
2.	0,616	0,830	0,655	0,039	1,199
	0,611	0,849	0,638	0,027	
	0,600	1,990	1,733	1,133	
3.	0,621	5,818	3,008	2,387	6,389
	0,598	5,503	2,943	2,345	
	0,597	5,488	2,254	1,657	
4.	0,618	13,263	4,328	3,710	10,751
	0,609	14,264	4,176	3,567	
	0,603	11,138	4,077	3,474	
5.	0,608	10,048	5,429	4,821	18,496
	0,603	9,478	7,493	6,890	
	0,607	7,978	7,392	6,785	
				<b>Total</b>	<b>37,387</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Control de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, por la solución de sulfato proveniente del tratamiento del residuo líquido del análisis de la DQO. Repetición 3**

No. ciclo	A -tara de papel filtro numerado- (g)	B -papel filtro seco con sulfato- (g)	C -papel filtro libre de sulfatos con fragmentos de partículas de agregado- (g)	C-A -masa partículas de agregado producido por el Desgaste de la acción del sulfato de sodio- (g)	Masa total -sumatoria diaria- (g)
1.	0,603	0,912	0,693	0,090	0,516
	0,622	0,770	0,675	0,053	
	0,610	1,111	0,983	0,373	
2.	0,604	1,318	1,057	0,453	0,955
	0,621	1,003	0,632	0,011	
	0,610	1,322	1,101	0,491	
3.	0,608	5,517	2,372	1,764	7.103
	0,605	7,111	3,579	2,974	
	0,619	6,950	2,984	2,365	
4.	0,602	13,876	4,828	4,226	10,701
	0,604	13,352	2,906	2,302	
	0,620	14,131	4,793	4,173	
5.	0,593	8,569	4,604	4,011	19,839
	0,615	11,282	9,331	8,716	
	0,611	9,819	7,723	7,112	
				<b>Total</b>	<b>39,114</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXII. **Control promedio de las repeticiones de la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, en base a cada una de las sales evaluadas**

No. ciclo	Gravimetría promedio		
	Reactivo (g)	Textil (g)	DQO (g)
1	1,350	0,716	0,527
2	3,722	3,887	1,037
3	6,449	7,000	6,865
4	8,687	11,026	10,719
5	9,451	12,460	19,391
<b>Total desgaste</b>	29,658	35,089	38,540

Fuente: elaboración propia.



### 3. Análisis estadístico

- Densidad de las diferentes soluciones evaluadas

Tabla LXIII. **Análisis de varianza del gradiente de consumo de densidad diaria en base a las tres soluciones de sulfato de sodio evaluadas, para realizar la saturación del agregado grueso, en función de la diferencia entre ciclos, según inciso 5.1.1 ASTM C 88-99a**

ANÁLISIS DE VARIANZA DEL GRADIENTE DE CONSUMO DE DENSIDAD DIARIA EN BASE A LAS SALES ESTUDIADAS						
						Con una: Significancia $\alpha = 1\%$ Confianza $\beta = 99\%$
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Valor crítico para F	Probabilidad
Entre grupos	0,456	$(3 - 1)$ = 2	27,000	<b>0,007</b>	<b>6,927</b>	<b>0,993</b>
Dentro de los grupos	414,422	$(15 - 3)$ = 12	34,535			
Total	414,877	14				

Fuente: elaboración propia.

- Granulometría del agregado grueso en base a las diferentes sales evaluadas

Tabla LXIV. **Análisis de varianza para la granulometría final del agregado grueso, en base a las soluciones de sulfato de sodio estudiadas, según inciso 9 ASTM C 88-99a**

ANÁLISIS DE VARIANZA DEL FACTOR GRANULOMETRÍA FINAL DEL AGREGADO GRUESO						
						Con una: Significancia $\alpha = 1\%$ Confianza $\beta = 99\%$
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Valor crítico para F	Probabilidad
Entre grupos	3,030	$(3 - 1)$ = 2	1,515	<b>6,354</b>	<b>10,925</b>	<b>0,033</b>
Dentro de los grupos	1,431	$(9 - 3)$ = 6	0,238			
Total	4,460	8				

Fuente: elaboración propia.

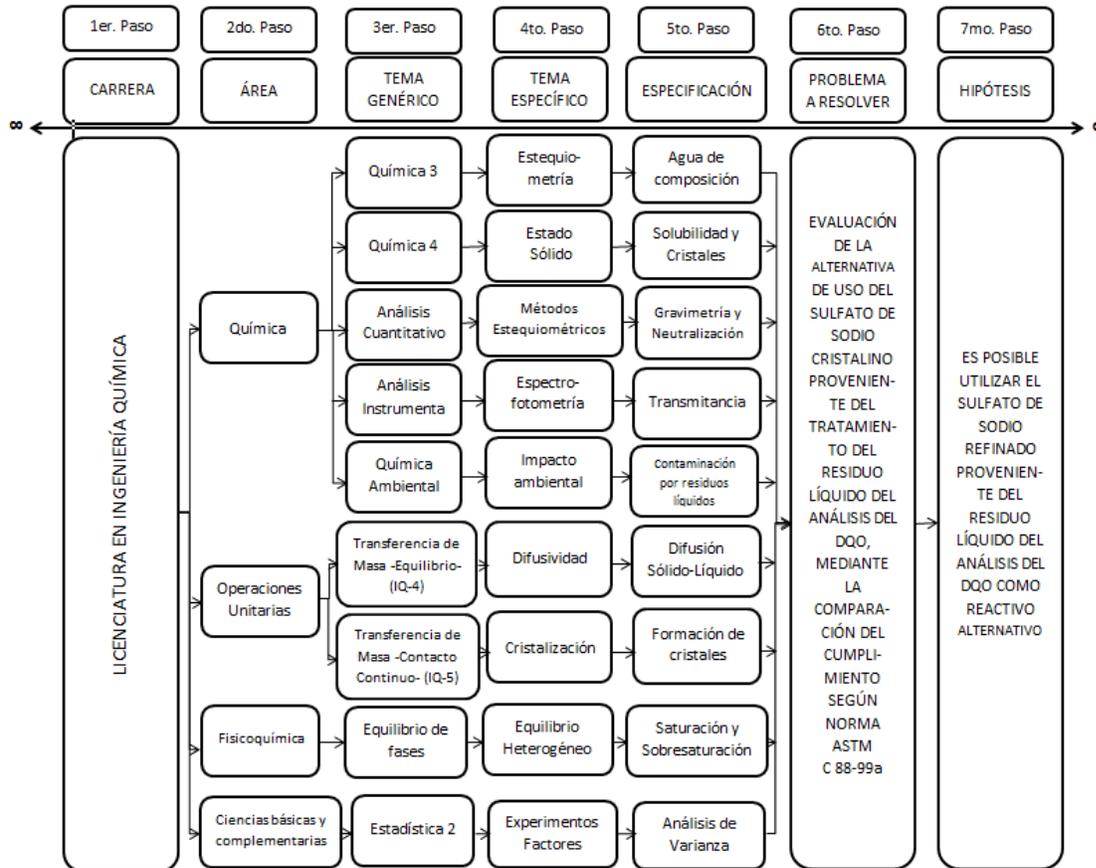
- Gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, retenidos por filtración de las soluciones, en base a las soluciones de sulfato de sodio evaluadas

Tabla LXV. **Análisis de varianza para la gravimetría de los fragmentos del agregado grueso debido al desgaste entre ciclos, en base a las soluciones de sulfato de sodio estudiadas**

ANÁLISIS DE VARIANZA DEL FACTOR GRAVIMETRÍA DE LOS FRAGMENTOS DEL AGREGADO GRUESO						
						Con una: Significancia $\alpha = 1\%$ Confianza $\beta = 99\%$
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Valor crítico para F	Probabilidad
Entre grupos	3,030	$(3 - 1)$ $= 2$	4,009	<b>0,125</b>	<b>6,927</b>	<b>0,883</b>
Dentro de los grupos	1,431	$(15 - 3)$ $= 12$	31,972			
Total	4,460	14				

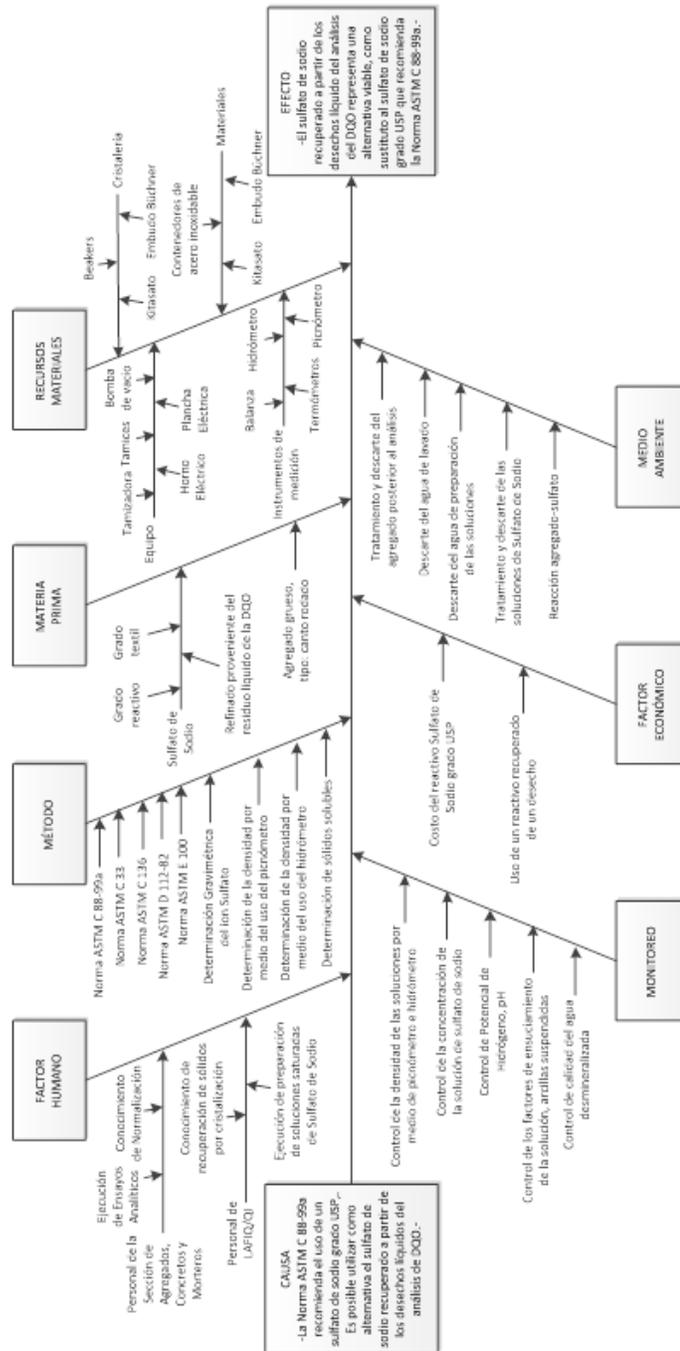
Fuente: elaboración propia.

Figura 43. Diagrama de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Figura 44. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.



## **ANEXOS**



Tabla LXVI. Puntos porcentuales superiores para la distribución F

$\nu_2$	$\alpha$	$\nu_1$								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.100	39.86	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	59.86
	0.050	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54
	0.010	4052.18	4999.50	5403.35	5624.58	5763.65	5858.99	5928.36	5981.07	6022.47
	0.001	405284	500012	540382	562501	576405	585938	592874	598144	603040
2	0.100	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38
	0.050	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38
	0.010	98.50	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.36	99.37	99.39
	0.001	998.50	999.00	999.17	999.25	999.30	999.33	999.36	999.37	999.39
3	0.100	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24
	0.050	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81
	0.010	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.35
	0.001	167.03	148.50	141.11	137.10	134.58	132.85	131.58	130.62	129.86
4	0.100	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94
	0.050	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00
	0.010	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66
	0.001	74.14	61.25	56.18	53.44	51.71	50.53	49.66	49.00	48.47
5	0.100	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32
	0.050	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77
	0.010	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16
	0.001	47.18	37.12	33.20	31.09	29.75	28.83	28.16	27.65	27.24
6	0.100	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.96
	0.050	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10
	0.010	12.75	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98
	0.001	35.51	27.00	23.70	21.92	20.80	20.03	19.46	19.03	18.69
7	0.100	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.72
	0.050	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68
	0.010	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72
	0.001	29.25	21.69	18.77	17.20	16.21	15.52	15.02	14.63	14.33
8	0.100	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.56
	0.050	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39
	0.010	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91
	0.001	25.41	18.49	15.83	14.39	13.48	12.86	12.40	12.05	11.77
9	0.100	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.44
	0.050	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18
	0.010	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35
	0.001	22.86	16.39	13.90	12.56	11.71	11.13	10.70	10.37	10.11

Continuación de la tabla LXVI.

$\nu_2$	$\alpha$	$\nu_1$								
		10	12	15	20	25	30	40	50	60
<b>1</b>	<b>0.100</b>	60.19	60.71	61.22	61.74	62.05	62.26	62.53	62.69	62.79
	<b>0.050</b>	241.88	243.91	245.95	248.01	249.26	250.10	251.14	251.77	252.20
	<b>0.010</b>	6055.85	6106.32	6157.29	6208.73	6239.83	6260.65	6286.78	6302.52	6313.03
	<b>0.001</b>	606316	611276	616292	621362	624430	626486	659725	660511	6610390
<b>2</b>	<b>0.100</b>	9.39	9.41	9.42	9.44	9.45	9.46	9.47	9.47	9.47
	<b>0.050</b>	19.40	19.41	19.43	19.45	19.46	19.46	19.47	19.48	19.48
	<b>0.010</b>	99.40	99.42	99.43	99.45	99.46	99.47	99.47	99.48	99.48
	<b>0.001</b>	999.40	999.42	999.43	999.45	999.46	999.47	999.47	999.48	999.48
<b>3</b>	<b>0.100</b>	5.23	5.22	5.20	5.18	5.17	5.17	5.16	5.15	5.15
	<b>0.050</b>	8.79	8.74	8.70	8.66	8.63	8.62	8.59	8.58	8.57
	<b>0.010</b>	27.23	27.05	26.87	26.69	26.58	26.50	26.41	26.35	26.32
	<b>0.001</b>	129.25	128.32	127.37	126.42	125.84	125.45	124.96	124.66	124.47
<b>4</b>	<b>0.100</b>	3.92	3.90	3.87	3.84	3.83	3.82	3.80	3.80	3.79
	<b>0.050</b>	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.70	5.69
	<b>0.010</b>	14.55	14.37	14.20	14.02	13.91	13.84	13.75	13.69	13.65
	<b>0.001</b>	48.05	47.41	46.76	46.10	45.70	45.43	45.09	44.88	44.75
<b>5</b>	<b>0.100</b>	3.30	3.27	3.24	3.21	3.19	3.17	3.16	3.15	3.14
	<b>0.050</b>	4.74	4.68	4.62	4.56	4.52	4.50	4.46	4.44	4.43
	<b>0.010</b>	10.05	9.89	9.72	9.55	9.45	9.38	9.29	9.24	9.20
	<b>0.001</b>	26.92	26.42	25.91	25.39	25.08	24.87	24.60	24.44	24.33
<b>6</b>	<b>0.100</b>	2.94	2.90	2.87	2.84	2.81	2.80	2.78	2.77	2.76
	<b>0.050</b>	4.06	4.00	3.94	3.87	3.83	3.81	3.77	3.75	3.74
	<b>0.010</b>	7.87	7.72	7.56	7.40	7.30	7.23	7.14	7.09	7.06
	<b>0.001</b>	18.41	17.99	17.56	17.12	16.85	16.67	16.44	16.31	16.21
<b>7</b>	<b>0.100</b>	2.70	2.67	2.63	2.59	2.57	2.56	2.54	2.52	2.51
	<b>0.050</b>	3.64	3.57	3.51	3.44	3.40	3.38	3.34	3.32	3.30
	<b>0.010</b>	6.62	6.47	6.31	6.16	6.06	5.99	5.91	5.86	5.82
	<b>0.001</b>	14.08	13.71	13.32	12.93	12.69	12.53	12.33	12.20	12.12
<b>8</b>	<b>0.100</b>	2.54	2.50	2.46	2.42	2.40	2.38	2.36	2.35	2.34
	<b>0.050</b>	3.35	3.28	3.22	3.15	3.11	3.08	3.04	3.02	3.01
	<b>0.010</b>	5.81	5.67	5.52	5.36	5.26	5.20	5.12	5.07	5.03
	<b>0.001</b>	11.54	11.19	10.84	10.48	10.26	10.11	9.92	9.80	9.73
<b>9</b>	<b>0.100</b>	2.42	2.38	2.34	2.30	2.27	2.25	2.23	2.22	2.21
	<b>0.050</b>	3.14	3.07	3.01	2.94	2.89	2.86	2.83	2.80	2.79
	<b>0.010</b>	5.26	5.11	4.96	4.81	4.71	4.65	4.57	4.52	4.48
	<b>0.001</b>	9.89	9.57	9.24	8.90	8.69	8.55	8.37	8.26	8.19

Continuación de la tabla LXVI.

$\nu_2$	$\alpha$	$\nu_1$								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0.100	3.29	2.92	2.73	2.61	2.52	2.46	2.41	2.38	2.35
	0.050	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02
	0.010	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94
	0.001	21.04	14.91	12.55	11.28	10.48	9.93	9.52	9.20	8.96
11	0.100	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27
	0.050	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90
	0.010	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63
	0.001	19.69	13.81	11.56	10.35	9.58	9.05	8.66	8.35	8.12
12	0.100	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21
	0.050	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80
	0.010	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39
	0.001	18.64	12.97	10.80	9.63	8.89	8.38	8.00	7.71	7.48
13	0.100	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16
	0.050	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71
	0.010	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19
	0.001	17.82	12.31	10.21	9.07	8.35	7.86	7.49	7.21	6.98
14	0.100	3.10	2.73	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12
	0.050	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65
	0.010	8.86	6.51	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03
	0.001	17.14	11.78	9.73	8.62	7.92	7.44	7.08	6.80	6.58
15	0.100	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09
	0.050	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59
	0.010	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89
	0.001	16.59	11.34	9.34	8.25	7.57	7.09	6.74	6.47	6.26
16	0.100	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06
	0.050	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54
	0.010	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78
	0.001	16.12	10.97	9.01	7.94	7.27	6.80	6.46	6.19	5.98
17	0.100	3.03	2.64	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03
	0.050	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49
	0.010	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68
	0.001	15.72	10.66	8.73	7.68	7.02	6.56	6.22	5.96	5.75
18	0.100	3.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00
	0.050	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46
	0.010	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60
	0.001	15.38	10.39	8.49	7.46	6.81	6.35	6.02	5.76	5.56
19	0.100	2.99	2.61	2.40	2.27	2.18	2.11	2.06	2.02	1.98
	0.050	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42
	0.010	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52
	0.001	15.08	10.16	8.28	7.27	6.62	6.18	5.85	5.59	5.39
20	0.100	2.97	2.59	2.38	2.25	2.16	2.09	2.04	2.00	1.96
	0.050	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39
	0.010	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46
	0.001	14.82	9.95	8.10	7.10	6.46	6.02	5.69	5.44	5.24

Continuación de la tabla LXVI.

$\nu_2$	$\alpha$	$\nu_1$								
		10	12	15	20	25	30	40	50	60
10	0.100	2.32	2.28	2.24	2.20	2.17	2.16	2.13	2.12	2.11
	0.050	2.98	2.91	2.85	2.77	2.73	2.70	2.66	2.64	2.62
	0.010	4.85	4.71	4.56	4.41	4.31	4.25	4.17	4.12	4.08
	0.001	8.75	8.45	8.13	7.80	7.60	7.47	7.30	7.19	7.12
11	0.100	2.25	2.21	2.17	2.12	2.10	2.08	2.05	2.04	2.03
	0.050	2.85	2.79	2.72	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.49
	0.010	4.54	4.40	4.25	4.10	4.01	3.94	3.86	3.81	3.78
	0.001	7.92	7.63	7.32	7.01	6.81	6.68	6.52	6.42	6.35
12	0.100	2.19	2.15	2.10	2.06	2.03	2.01	1.99	1.97	1.96
	0.050	2.75	2.69	2.62	2.54	2.50	2.47	2.43	2.40	2.38
	0.010	4.30	4.16	4.01	3.86	3.76	3.70	3.62	3.57	3.54
	0.001	7.29	7.00	6.71	6.40	6.22	6.09	5.93	5.83	5.76
13	0.100	2.14	2.10	2.05	2.01	1.98	1.96	1.93	1.92	1.90
	0.050	2.67	2.60	2.53	2.46	2.41	2.38	2.34	2.31	2.30
	0.010	4.10	3.96	3.82	3.66	3.57	3.51	3.43	3.38	3.34
	0.001	6.80	6.52	6.23	5.93	5.75	5.63	5.47	5.37	5.30
14	0.100	2.10	2.05	2.01	1.96	1.93	1.91	1.89	1.87	1.86
	0.050	2.60	2.53	2.46	2.39	2.34	2.31	2.27	2.24	2.22
	0.010	3.94	3.80	3.66	3.51	3.41	3.35	3.27	3.22	3.18
	0.001	6.40	6.13	5.85	5.56	5.38	5.25	5.10	5.00	4.94
15	0.100	2.06	2.02	1.97	1.92	1.89	1.87	1.85	1.83	1.82
	0.050	2.54	2.48	2.40	2.33	2.28	2.25	2.20	2.18	2.16
	0.010	3.80	3.67	3.52	3.37	3.28	3.21	3.13	3.08	3.05
	0.001	6.08	5.81	5.54	5.25	5.07	4.95	4.80	4.70	4.64
16	0.100	2.03	1.99	1.94	1.89	1.86	1.84	1.81	1.79	1.78
	0.050	2.49	2.42	2.35	2.28	2.23	2.19	2.15	2.12	2.11
	0.010	3.69	3.55	3.41	3.26	3.16	3.10	3.02	2.97	2.93
	0.001	5.81	5.55	5.27	4.99	4.82	4.70	4.54	4.45	4.39
17	0.100	2.00	1.96	1.91	1.86	1.83	1.81	1.78	1.76	1.75
	0.050	2.45	2.38	2.31	2.23	2.18	2.15	2.10	2.08	2.06
	0.010	3.59	3.46	3.31	3.16	3.07	3.00	2.92	2.87	2.83
	0.001	5.58	5.32	5.05	4.78	4.60	4.48	4.33	4.24	4.18
18	0.100	1.98	1.93	1.89	1.84	1.80	1.78	1.75	1.74	1.72
	0.050	2.41	2.34	2.27	2.19	2.14	2.11	2.06	2.04	2.02
	0.010	3.51	3.37	3.23	3.08	2.98	2.92	2.84	2.78	2.75
	0.001	5.39	5.13	4.87	4.59	4.42	4.30	4.15	4.06	4.00
19	0.100	1.96	1.91	1.86	1.81	1.78	1.76	1.73	1.71	1.70
	0.050	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	2.00	1.98
	0.010	3.43	3.30	3.15	3.00	2.91	2.84	2.76	2.71	2.67
	0.001	5.22	4.97	4.70	4.43	4.26	4.14	3.99	3.90	3.84
20	0.100	1.94	1.89	1.84	1.79	1.76	1.74	1.71	1.69	1.68
	0.050	2.35	2.28	2.20	2.12	2.07	2.04	1.99	1.97	1.95
	0.010	3.37	3.23	3.09	2.94	2.84	2.78	2.69	2.64	2.61
	0.001	5.08	4.82	4.56	4.29	4.12	4.00	3.86	3.77	3.70

Continuación de la tabla LXVI.

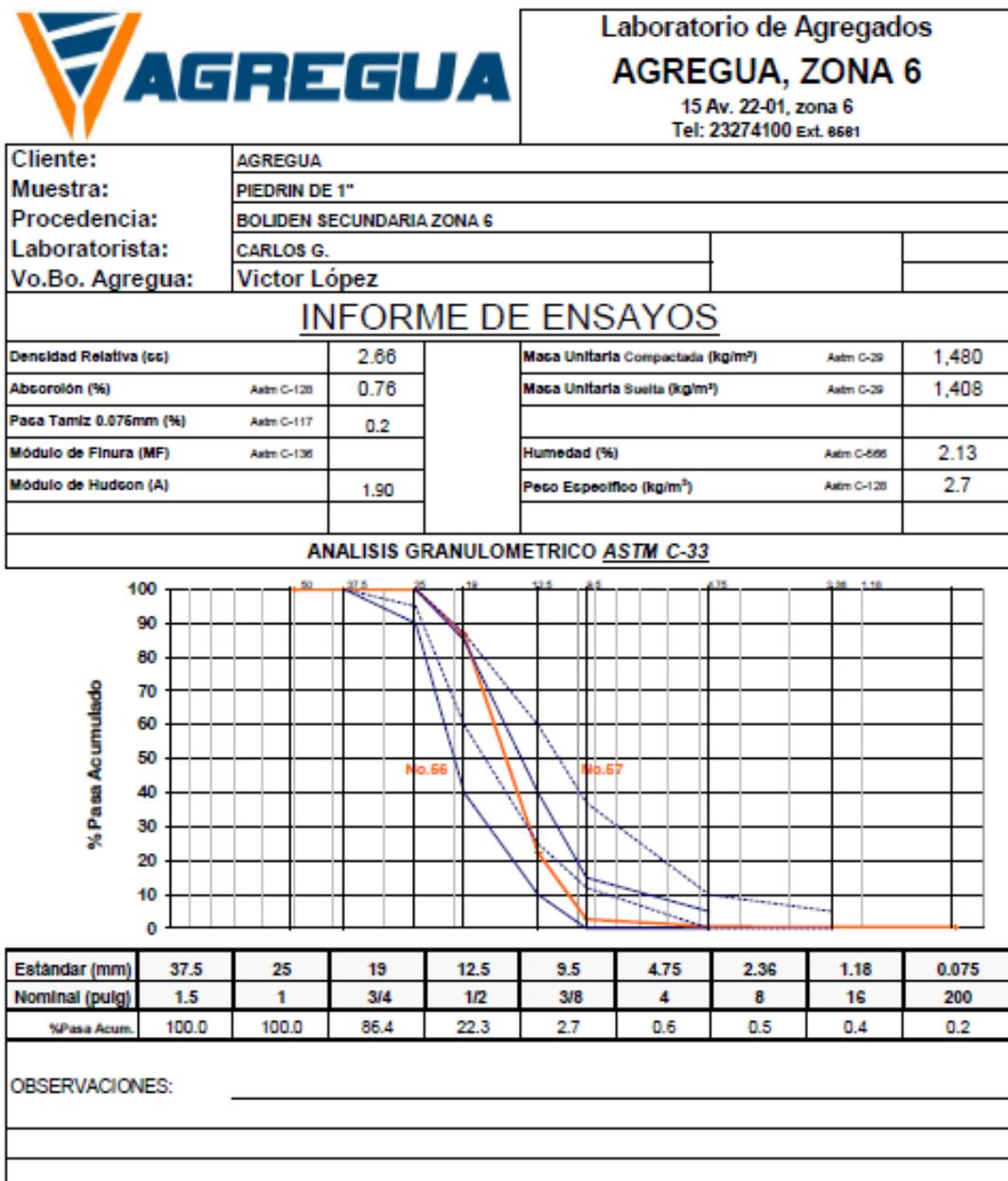
$\nu_2$	$\alpha$	$\nu_1$								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	0.100	2.96	2.57	2.36	2.23	2.14	2.08	2.02	1.98	1.95
	0.050	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37
	0.010	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40
	0.001	14.59	9.77	7.94	6.95	6.32	5.88	5.56	5.31	5.11
22	0.100	2.95	2.56	2.35	2.22	2.13	2.06	2.01	1.97	1.93
	0.050	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34
	0.010	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35
	0.001	14.38	9.61	7.80	6.81	6.19	5.76	5.44	5.19	4.99
23	0.100	2.94	2.55	2.34	2.21	2.11	2.05	1.99	1.95	1.92
	0.050	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32
	0.010	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30
	0.001	14.20	9.47	7.67	6.70	6.08	5.65	5.33	5.09	4.89
24	0.100	2.93	2.54	2.33	2.19	2.10	2.04	1.98	1.94	1.91
	0.050	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30
	0.010	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26
	0.001	14.03	9.34	7.55	6.59	5.98	5.55	5.23	4.99	4.80
25	0.100	2.92	2.53	2.32	2.18	2.09	2.02	1.97	1.93	1.89
	0.050	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28
	0.010	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22
	0.001	13.88	9.22	7.45	6.49	5.89	5.46	5.15	4.91	4.71
26	0.100	2.91	2.52	2.31	2.17	2.08	2.01	1.96	1.92	1.88
	0.050	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27
	0.010	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18
	0.001	13.74	9.12	7.36	6.41	5.80	5.38	5.07	4.83	4.64
27	0.100	2.90	2.51	2.30	2.17	2.07	2.00	1.95	1.91	1.87
	0.050	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25
	0.010	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15
	0.001	13.61	9.02	7.27	6.33	5.73	5.31	5.00	4.76	4.57
28	0.100	2.89	2.50	2.29	2.16	2.06	2.00	1.94	1.90	1.87
	0.050	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24
	0.010	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12
	0.001	13.50	8.93	7.19	6.25	5.66	5.24	4.93	4.69	4.50
29	0.100	2.89	2.50	2.28	2.15	2.06	1.99	1.93	1.89	1.86
	0.050	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22
	0.010	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09
	0.001	13.39	8.85	7.12	6.19	5.59	5.18	4.87	4.64	4.45
30	0.100	2.88	2.49	2.28	2.14	2.05	1.98	1.93	1.88	1.85
	0.050	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21
	0.010	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07
	0.001	13.29	8.77	7.05	6.12	5.53	5.12	4.82	4.58	4.39
31	0.100	2.87	2.48	2.27	2.14	2.04	1.97	1.92	1.88	1.84
	0.050	4.16	3.30	2.91	2.68	2.52	2.41	2.32	2.25	2.20
	0.010	7.53	5.36	4.48	3.99	3.67	3.45	3.28	3.15	3.04
	0.001	13.20	8.70	6.99	6.07	5.48	5.07	4.77	4.53	4.34

Continuación de la tabla LXVI.

$\nu_2$	$\alpha$	$\nu_1$								
		10	12	15	20	25	30	40	50	60
21	0.100	1.92	1.87	1.83	1.78	1.74	1.72	1.69	1.67	1.66
	0.050	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.94	1.92
	0.010	3.31	3.17	3.03	2.88	2.79	2.72	2.64	2.58	2.55
	0.001	4.95	4.70	4.44	4.17	4.00	3.88	3.74	3.64	3.58
22	0.100	1.90	1.86	1.81	1.76	1.73	1.70	1.67	1.65	1.64
	0.050	2.30	2.23	2.15	2.07	2.02	1.98	1.94	1.91	1.89
	0.010	3.26	3.12	2.98	2.83	2.73	2.67	2.58	2.53	2.50
	0.001	4.83	4.58	4.33	4.06	3.89	3.78	3.63	3.54	3.48
23	0.100	1.89	1.84	1.80	1.74	1.71	1.69	1.66	1.64	1.62
	0.050	2.27	2.20	2.13	2.05	2.00	1.96	1.91	1.88	1.86
	0.010	3.21	3.07	2.93	2.78	2.69	2.62	2.54	2.48	2.45
	0.001	4.73	4.48	4.23	3.96	3.79	3.68	3.53	3.44	3.38
24	0.100	1.88	1.83	1.78	1.73	1.70	1.67	1.64	1.62	1.61
	0.050	2.25	2.18	2.11	2.03	1.97	1.94	1.89	1.86	1.84
	0.010	3.17	3.03	2.89	2.74	2.64	2.58	2.49	2.44	2.40
	0.001	4.64	4.39	4.14	3.87	3.71	3.59	3.45	3.36	3.29
25	0.100	1.87	1.82	1.77	1.72	1.68	1.66	1.63	1.61	1.59
	0.050	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.84	1.82
	0.010	3.13	2.99	2.85	2.70	2.60	2.54	2.45	2.40	2.36
	0.001	4.56	4.31	4.06	3.79	3.63	3.52	3.37	3.28	3.22
26	0.100	1.86	1.81	1.76	1.71	1.67	1.65	1.61	1.59	1.58
	0.050	2.22	2.15	2.07	1.99	1.94	1.90	1.85	1.82	1.80
	0.010	3.09	2.96	2.81	2.66	2.57	2.50	2.42	2.36	2.33
	0.001	4.48	4.24	3.99	3.72	3.56	3.44	3.30	3.21	3.15
27	0.100	1.85	1.80	1.75	1.70	1.66	1.64	1.60	1.58	1.57
	0.050	2.20	2.13	2.06	1.97	1.92	1.88	1.84	1.81	1.79
	0.010	3.06	2.93	2.78	2.63	2.54	2.47	2.38	2.33	2.29
	0.001	4.41	4.17	3.92	3.66	3.49	3.38	3.23	3.14	3.08
28	0.100	1.84	1.79	1.74	1.69	1.65	1.63	1.59	1.57	1.56
	0.050	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.79	1.77
	0.010	3.03	2.90	2.75	2.60	2.51	2.44	2.35	2.30	2.26
	0.001	4.35	4.11	3.86	3.60	3.43	3.32	3.18	3.09	3.02
29	0.100	1.83	1.78	1.73	1.68	1.64	1.62	1.58	1.56	1.55
	0.050	2.18	2.10	2.03	1.94	1.89	1.85	1.81	1.77	1.75
	0.010	3.00	2.87	2.73	2.57	2.48	2.41	2.33	2.27	2.23
	0.001	4.29	4.05	3.80	3.54	3.38	3.27	3.12	3.03	2.97
30	0.100	1.82	1.77	1.72	1.67	1.63	1.61	1.57	1.55	1.54
	0.050	2.16	2.09	2.01	1.93	1.88	1.84	1.79	1.76	1.74
	0.010	2.98	2.84	2.70	2.55	2.45	2.39	2.30	2.25	2.21
	0.001	4.24	4.00	3.75	3.49	3.33	3.22	3.07	2.98	2.92
31	0.100	1.81	1.77	1.71	1.66	1.62	1.60	1.56	1.54	1.53
	0.050	2.15	2.08	2.00	1.92	1.87	1.83	1.78	1.75	1.73
	0.010	2.96	2.82	2.68	2.52	2.43	2.36	2.27	2.22	2.18
	0.001	4.19	3.95	3.71	3.45	3.28	3.17	3.03	2.94	2.87

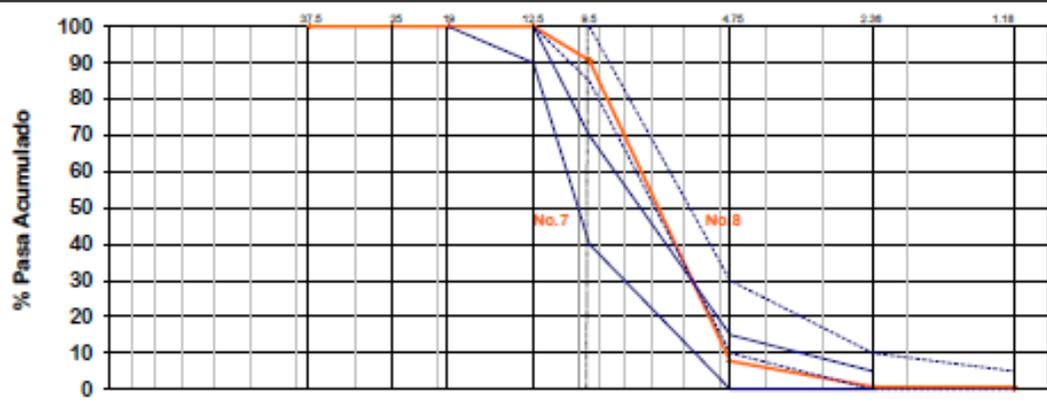
Fuente: NAVIDI, William. Statistics for engineers and scientists. Pág. 819.

Figura 45. Certificado de granulometría realizada por AGREGUA, pedrín de 25,0 mm (1 pulg)



Fuente: Laboratorio de Agregados, AGREGUA.

Figura 46. Certificado de granulometría realizada por AGREGUA, pedrín de 9,5 mm (3/8 pulg)

		Laboratorio de Agregados <b>AGREGUA, ZONA 6</b> 15 Av. 22-01, zona 6 Tel: 23274100 Ext. 6661							
		Cliente: AGREGUA Muestra: PIEDRIN DE 3/8" Procedencia: PRODUCCION NORMAL Laboratorista: Carlos Gómez Vo.Bo. Agregua: Victor Lopez							
<b>INFORME DE ENSAYOS</b>									
Densidad Relativa (cc)	2.66	Maca Unitaria Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	Asm C-29 1,446						
Absorción (%) Asm C-126	1.16	Maca Unitaria Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	Asm C-29 1,389						
Pasa Tamiz 0.075mm (%)	Asm C-117 0.3	Humedad (%)	Asm C-566 3.40						
Módulo de Finura (MF) Asm C-136	6.00	Peso Especifico (kg/m <sup>3</sup> )	Asm C-126 2.7						
Módulo de Hudson (A)	3.00								
<b>ANALISIS GRANULOMETRICO ASTM C-33</b>									
									
Estándar (mm)	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.075
Nominal (pulg)	1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	4	8	16	200
% Pasa Acumulado	100.00	100.00	100.00	100.00	90.69	7.73	0.71	0.56	0.28
OBSERVACIONES:									

Fuente: Laboratorio de Agregados, AGREGUA.

Figura 47. Informe Laboratorio Agregados, Concretos y Morteros CII/USAC. Grado reactivo, repetición 1



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



---

**ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA DE AGREGADOS  
POR ATAQUE DE SULFATO DE SODIO  
NORMA ASTM C-88**

INFORME No. SC - 055 O.T. No. 30254

**INTERESADO:** Marian Angelica Mejia Giordano Carnet: 200614750

**Material:** Agregado Grueso

**Proyecto:** Trabajo de graduacion "Evaluacion de la alternativa de uso del sulfato de sodio cristalino proveniente del tratamiento del residuo liquido del analisis del DQO"

**Direccion:** 10a. Av. 25-80, zona 12.

**Solución utilizada:** Sulfato de Sodio

**FECHA:** 22 de enero de 2013

TAMAÑOS		Graduación por fracción	Antes de ensayo	Después de ensayo	% de Desgaste	Desgaste ref. a Graduación
PASA	RETENIDOS					
2 1/2" (63.5 mm)	1 1/2" (38.1 mm)	0.00	-----	-----	0.00	0.000
1 1/2" (38.1 mm)	3/4" (19.05 mm)	98.29	1500.00	1492.60	0.49	0.485
3/4" (19.05 mm)	3/8" (9.52 mm)	1.06	1000.00	972.70	2.73	0.029
3/8" (9.52 mm)	No. 4 (4.76 mm)	0.05	300.00	282.70	5.77	0.003
Fondo		0.60	-----	-----	5.77	0.034
<b>TOTALES</b>		<b>100.00</b>	<b>2800.00</b>	-----	-----	<b>0.551</b>

OBSERVACIONES:

a) Muestra proporcionada por el interesado  
b) Solucion de sulfato identificada como: "Grado reactivo (patron), Corrida 1"

ATENTAMENTE,

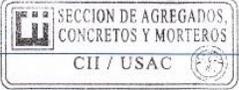
Vo.Bo.



Inga. Telma Maricela Cano Morales  
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros.



FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exis. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC

Figura 48. Informe Laboratorio Agregados, Concretos y Morteros CII/USAC. Grado reactivo, repetición 2



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



---

**ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA DE AGREGADOS  
POR ATAQUE DE SULFATO DE SODIO  
NORMA ASTM C-88**

INFORME No. SC - 055 O.T. No. 30254

**INTERESADO:** Marian Angelica Mejia Giordano Carnet: 200614750

**Material:** Agregado Grueso

**Proyecto:** Trabajo de graduacion "Evaluacion de la alternativa de uso del sulfato de sodio cristalino proveniente del tratamiento del residuo liquido del analisis del DQO"

**Direccion:** 10a. Av. 25-80, zona 12.

**Solución utilizada:** Sulfato de Sodio

**FECHA:** 22 de enero de 2013

PASA	TAMAÑOS RETENIDOS	Graduación por fracción	Antes de ensayo	Después de ensayo	% de Desgaste	Desgaste ref. a Graduación
2 1/2" (63.5 mm)	1 1/2" (38.1 mm)	0.00	-----	-----	0.00	0.000
1 1/2" (38.1 mm)	3/4" (19.05 mm)	98.29	1500.00	1499.80	0.01	0.013
3/4" (19.05 mm)	3/8" (9.52 mm)	1.06	1000.00	960.80	3.92	0.042
3/8" (9.52 mm)	No. 4 (4.76 mm)	0.05	300.00	285.70	4.77	0.002
	Fondo	0.60	-----	-----	4.77	0.028
<b>TOTALES</b>		100.00	2800.00	-----	-----	0.086

**OBSERVACIONES:**

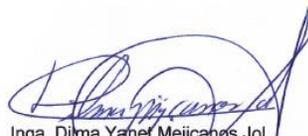
a) Muestra proporcionada por el interesado  
b) Solucion de sulfato identificada como: "Grado reactivo (patron), Corrida 2"

ATENTAMENTE,

Vo.Bo.



Inga. Telma Maricela Cano Morales  
Directora CII/USAC



Inga. Dirma Yanet Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros.

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC

Figura 49. Informe Laboratorio Agregados, Concretos y Morteros CII/USAC. Grado textil, repetición 1



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



---

**ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA DE AGREGADOS  
POR ATAQUE DE SULFATO DE SODIO  
NORMA ASTM C-88**

INFORME No. SC - 055 O.T. No. 30254

**INTERESADO:** Marian Angelica Mejia Giordano Carnet: 200614750

**Material:** Agregado Grueso

**Proyecto:** Trabajo de graduacion "Evaluacion de la alternativa de uso del sulfato de sodio cristalino proveniente del tratamiento del residuo liquido del analisis del DQO"

**Direccion:** 10a. Av. 25-80, zona 12.

**Solución utilizada:** Sulfato de Sodio

**FECHA:** 22 de enero de 2013

TAMAÑOS		Graduación por fracción	Antes de ensayo	Después de ensayo	% de Desgaste	Desgaste ref. a Graduación
PASA	RETENIDOS					
2 1/2" (63.5 mm)	1 1/2" (38.1 mm)	0.00	-----	-----	0.00	0.000
1 1/2" (38.1 mm)	3/4" (19.05 mm)	98.29	1500.00	1494.40	0.37	0.367
3/4" (19.05 mm)	3/8" (9.52 mm)	1.06	1000.00	963.50	3.65	0.039
3/8" (9.52 mm)	No. 4 (4.76 mm)	0.05	300.00	283.60	5.47	0.003
	Fondo	0.60	-----	-----	5.47	0.033
<b>TOTALES</b>		100.00	2800.00	-----	-----	0.441

**OBSERVACIONES:**

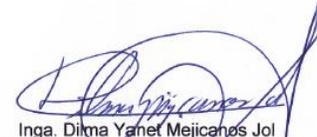
- Muestra proporcionada por el interesado
- Solucion de sulfato identificada como: "Grado Textil, Corrida 1"

ATENTAMENTE,

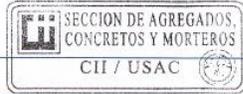
Vo.Bo.



Inga. Telma Maricela Cano Morales  
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yanef Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros.



FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC.

Figura 50. Informe Laboratorio Agregados, Concretos y Morteros CII/USAC. Grado textil, repetición 2



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



---

**ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA DE AGREGADOS  
POR ATAQUE DE SULFATO DE SODIO  
NORMA ASTM C-88**

INFORME No. SC - 055 O.T. No. 30254

**INTERESADO:** Marian Angelica Mejia Giordano Carnet: 200614750

**Material:** Agregado Grueso

**Proyecto:** Trabajo de graduacion "Evaluacion de la alternativa de uso del sulfato de sodio cristalino proveniente del tratamiento del residuo liquido del analisis del DQO"

**Direccion:** 10a. Av. 25-80, zona 12.

**Solución utilizada:** Sulfato de Sodio

**FECHA:** 22 de enero de 2013

TAMAÑOS		Graduación por fracción	Antes de ensayo	Después de ensayo	% de Desgaste	Desgaste ref. a Graduación
PASA	RETENIDOS					
2 1/2" (63.5 mm)	1 1/2" (38.1 mm)	0.00	-----	-----	0.00	0.000
1 1/2" (38.1 mm)	3/4" (19.05 mm)	98.29	1500.00	1500.00	0.00	0.000
3/4" (19.05 mm)	3/8" (9.52 mm)	1.06	1000.00	962.00	3.80	0.040
3/8" (9.52 mm)	No. 4 (4.76 mm)	0.05	300.00	277.00	7.67	0.004
Fondo		0.60	-----	-----	7.67	0.046
<b>TOTALES</b>		<b>100.00</b>	<b>2800.00</b>	<b>-----</b>	<b>-----</b>	<b>0.090</b>

**OBSERVACIONES:**

a) Muestra proporcionada por el interesado  
b) Solucion de sulfato identificada como: "Grado Textil, Corrida 2"

ATENTAMENTE,

Vo.Bo.

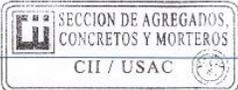


Inga. Telma Maricela Cano Morales  
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros.

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC.

Figura 51. Informe Laboratorio Agregados, Concretos y Morteros CII/USAC. Grado DQO, repetición 1



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



---

**ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA DE AGREGADOS  
POR ATAQUE DE SULFATO DE SODIO  
NORMA ASTM C-88**

INFORME No. SC - 055 O.T. No. 30254

**INTERESADO:** Marian Angelica Mejia Giordano Carnet: 200614750

**Material:** Agregado Grueso

**Proyecto:** Trabajo de graduacion "Evaluacion de la alternativa de uso del sulfato de sodio cristalino proveniente del tratamiento del residuo liquido del analisis del DQO"

**Direccion:** 10a. Av. 25-80, zona 12.

**Solución utilizada:** Sulfato de Sodio

**FECHA:** 22 de enero de 2013

TAMAÑOS		Graduación por fracción	Antes de ensayo	Después de ensayo	% de Desgaste	Desgaste ref. a Graduación
PASA	RETENIDOS					
2 1/2" (63.5 mm)	1 1/2" (38.1 mm)	0.00	-----	-----	0.00	0.000
1 1/2" (38.1 mm)	3/4" (19.05 mm)	98.29	1500.00	1485.00	1.00	0.983
3/4" (19.05 mm)	3/8" (9.52 mm)	1.06	1000.00	958.20	4.18	0.044
3/8" (9.52 mm)	No. 4 (4.76 mm)	0.05	300.00	279.00	7.00	0.004
	Fondo	0.60	-----	-----	7.00	0.042
<b>TOTALES</b>		100.00	2800.00	-----	-----	1.073

OBSERVACIONES:

- a) Muestra proporcionada por el interesado
- b) Solucion de sulfato identificada como: "DQO, Corrida 1"

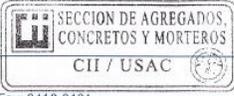
ATENTAMENTE,



Vo.Bo.  
Inga. Telma Maricela Cano Morales  
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros.



FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC.

Figura 52. Informe Laboratorio Agregados, Concretos y Morteros CII/USAC. Grado DQO, repetición 2



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



---

**ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA DE AGREGADOS  
POR ATAQUE DE SULFATO DE SODIO  
NORMA ASTM C-88**

INFORME No. SC - 055 O.T. No. 30254

**INTERESADO:** Marian Angelica Mejia Giordano Carnet: 200614750

**Material:** Agregado Grueso

**Proyecto:** Trabajo de graduacion "Evaluacion de la alternativa de uso del sulfato de sodio cristalino proveniente del tratamiento del residuo liquido del analisis del DQO"

**Direccion:** 10a. Av. 25-80, zona 12.

**Solución utilizada:** Sulfato de Sodio

**FECHA:** 22 de enero de 2013

TAMAÑOS		Graduación por fracción	Antes de ensayo	Después de ensayo	% de Desgaste	Desgaste ref. a Graduación
PASA	RETENIDOS					
2 1/2" (63.5 mm)	1 1/2" (38.1 mm)	0.00	-----	-----	0.00	0.000
1 1/2" (38.1 mm)	3/4" (19.05 mm)	98.29	1500.00	1485.90	0.94	0.924
3/4" (19.05 mm)	3/8" (9.52 mm)	1.06	1000.00	952.60	4.74	0.050
3/8" (9.52 mm)	No. 4 (4.76 mm)	0.05	300.00	284.60	5.13	0.003
	Fondo	0.60	-----	-----	5.13	0.031
<b>TOTALES</b>		100.00	2800.00	-----	-----	1.008

**OBSERVACIONES:**

a) Muestra proporcionada por el interesado  
b) Solucion de sulfato identificada como: "DQO, Corrida 2"

ATENTAMENTE,

Vo.Bo.



Inga. Telma Maricela Cano Morales  
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol  
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros.

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

SECCION DE AGREGADOS  
CONCRETOS Y MORTEROS  
CII / USAC

Fuente: Laboratorio de Agregados, Concretos y Morteros. CII. USAC.

Figura 53. Norma ASTM C 88-99a



**4. Traducción Libre por: Marian Angelica Mejía Giordano**  
Denominación: C 88 – 99a

## Método de Ensayo Normalizado para Solidez de los Agregados mediante el Uso de Sulfato de Sodio o Sulfato de Magnesio<sup>1</sup>

Esta norma ha sido publicada bajo la denominación fija C 88; el número inmediato que sigue a la denominación indica el año de adopción inicial o, en caso de revisión, el año de la última modificación. Un número entre paréntesis indica el año de la última re-aprobación. Un carácter épsilon ( $\epsilon$ ) como superíndice indica un cambio en la redacción desde la última revisión o re-aprobación.

*Esta especificación ha sido aprobada para su uso por las agencias del Departamento de Defensa.*

### 1. Alcance

1.1 Este método de ensayo cubre la prueba de los agregados para estimar su solidez cuando son sometidos a la acción del clima en el concreto o en otras aplicaciones. Esto se logra por inmersiones repetidas en soluciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, seguido por secado en horno para deshidratar parcial o totalmente la sal depositada en los poros permeables. La fuerza interna de expansión derivada por la rehidratación de la sal por reimmersion, simula la expansión del agua al refrigerarse. Este método de ensayo proporciona información útil para juzgar la solidez cuando no se dispone de información adecuada de registros de servicio del material expuesto a condiciones climáticas actuales.

1.2 Los valores dados en paréntesis son para propósitos de información solamente.

1.3 *Este estándar no pretende señalar los problemas de seguridad, asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma, establecer la seguridad apropiada y prácticas saludables así como determinar la aplicabilidad de las limitaciones reguladoras antes de su uso.*

### 2. Documentos de referencia

#### 2.1 Normas ASTM:

- C 33 Especificación de Agregados para Concreto<sup>2</sup>
- C 136 Método de Ensayo para Análisis Granulométrico del Agregado Grueso y Fino<sup>2</sup>
- C 670 Práctica para Preparar las Declaraciones de Precisión y Tendencia en Métodos de Ensayo para Materiales de Construcción<sup>2</sup>
- C 702 Práctica para Reducir Muestras de Agregado a Tamaños de Ensayo<sup>2</sup>

D 75 Práctica para Muestreo de Agregados<sup>3</sup>

D 3665 Práctica para el Muestreo Aleatorio de Materiales de Construcción<sup>3</sup>

E 11 Especificación para Mallas de Tejido de Alambre para Propósitos de Ensayo<sup>4</sup>

E 100 Especificación para Hidrómetros ASTM<sup>5</sup>

E 323 Especificación para Mallas de Plato perforado para Propósitos de Ensayo<sup>4</sup>

### 3. Significado y Uso

3.1 Este método de ensayo provee un procedimiento para hacer un estimado preliminar de la solidez de los agregados para el uso en el concreto u otros propósitos. Los valores obtenidos pueden ser comparados con las especificaciones, por ejemplo la especificación C33, la cual está diseñada para indicar la conveniencia del agregado para propósitos de uso. Ya que la precisión de este método de ensayo es pobre (sección 12), este puede no ser apropiado para rechazar enfáticamente los agregados sin la confirmación de otros ensayos más cercanamente relacionados al servicio específico pretendido.

3.2 Los valores para el porcentaje permitido de pérdida por este método de ensayo, son usualmente diferentes para agregados gruesos y finos, un llamado de atención al hecho de que los resultados de ensayo por el uso de dos sales difieren considerablemente y debe tenerse cuidado al fijar los límites apropiados en cualquier especificación que incluya los requerimientos para estos ensayos. El ensayo es usualmente más severo cuando se emplea sulfato de magnesio; por consiguiente, los límites para el porcentaje de pérdida permitidos cuando el sulfato de magnesio es empleado son normalmente más grandes que los límites para el sulfato de sodio.

NOTA 1 – Referir a la secciones apropiadas en la Especificación C33 que establece las condiciones para la aceptación de los agregados gruesos y finos que no aprueban los requerimientos basados en este ensayo.

### 4. Aparatos

4.1 *Mallas* – Con aberturas cuadradas siguiendo los

<sup>1</sup> Este método está bajo la jurisdicción del Comité ASTM C-9 en Concreto y Agregados del Concreto y es la responsabilidad directa del Subcomité C09.20 sobre Métodos de Prueba.

Edición actual aprobada el 10 de Marzo 1999. Originalmente publicado como C 88-99 T. Última edición C 88-99.

<sup>2</sup> Libro anual de Normas ASTM, Vol. 04.02.

<sup>3</sup> Libro anual de Normas ASTM, Vol. 04.03.

<sup>4</sup> Libro anual de Normas ASTM, Vol. 14.02.

<sup>5</sup> Libro anual de Normas ASTM, Vol. 14.03.

## Continuación de la figura 53.



C 88

tamaños conforme a la Especificación E 11 o E 323, para tamizar las muestras de acuerdo con las secciones 6,7 y 9:

150 $\mu\text{m}$ (No. 100)	8.0 mm (5/16 pulg.) 9.5 mm (3/8 pulg.)
300 $\mu\text{m}$ (No. 50)	12.5 mm (1/2 pulg.) 16.0 mm (5/8 pulg.)
600 $\mu\text{m}$ (No. 30)	19.0 mm (3/4 pulg.) 25.0 mm (1 pulg.)
1.18 mm (No. 16)	31.5 mm (1 1/4 pulg.)
2.36 mm (No. 8)	37.5 mm (1 1/2 pulg.) 50 mm (2 pulg.)
4.0 mm (No. 5)	63 mm (2 1/2 pulg.)
4.75 mm (No. 4)	tamaños más grandes por 12.5 mm (1/2 pulg.) Separar.

4.2 *Contenedores* – Los contenedores para sumergir las muestras de agregado en la solución, de acuerdo con el procedimiento descrito en este método, deben ser perforados de tal manera que permita que la solución tenga libre acceso a la muestra y esta drene de la muestra sin pérdida de agregado.

NOTA 2 – Canastas hechas con malla de alambre adecuado o tamices con aberturas adecuadas son contenedores apropiados para las muestras.

4.3 *Regulación de Temperatura* – Un medio adecuado debe ser provisto para regular la temperatura de las muestras durante la inmersión en la solución de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

4.4 *Balanzas* – Para agregado fino, una balanza o escala con una precisión de 0.1 g sobre el rango requerido para este ensayo; para agregado grueso, una balanza o escala con una precisión de 0.1% o 1 g, lo que sea mayor sobre el rango requerido para este ensayo.

4.5 *Horno de Secado* – El horno debe ser capaz de ser calentado continuamente a  $230 \pm 9$  °F ( $110 \pm 5$  °C) y la razón de evaporación a este rango de temperatura, debe ser de al menos 25 g/h para 4 h, durante el cual las puertas del horno deben mantenerse cerradas. Esta razón debe ser determinada por la pérdida de agua en beakers de 1 L, conteniendo inicialmente 500 g de agua a una temperatura de  $70 \pm 3$  °F ( $21 \pm 2$  °C), colocados en cada esquina y centro de cada repisa del horno. La evaporación requerida es para aplicar a todos los puntos de ensayo cuando el horno está vacío excepto para los beakers con agua.

4.6 *Medidores de Gravedad Específica* – Hidrómetros conforme a los requerimientos de la Especificación E 100, o una combinación adecuada de cristalería graduada y balanza, capaz de medir la gravedad específica dentro de  $\pm 0.001$ .

### 5. Soluciones Requeridas Especiales

5.1 Prepare la solución para sumergir las muestras de ensayo en sulfato de sodio o magnesio de acuerdo con 5.1.1 o 5.1.2 (Nota 3). El volumen de la solución debe ser al menos cinco veces el volumen sólido de todas las muestras inmersas en cualquier momento.

Nota 3 – Algunos agregados que contienen carbonato de calcio o magnesio, son atacados químicamente por la solución de sulfato fresca, resultando erróneamente en altas medidas de pérdida. Si esta condición se sospecha o es encontrada, repetir el ensayo usando una solución filtrada que ha sido usada previamente para ensayos con el mismo tipo de rocas con carbonato, probar que la solución se encuentre dentro de los requerimientos de 5.1.1 y 5.1.2.

5.1.1 *Solución de Sulfato de Sodio* – Prepárese una solución saturada de sulfato de sodio por disolver un USP o de grado igual de la sal en agua a una temperatura de 77 a 86 °F (25 a 30 °C). Agregar suficiente sal (Nota 4), de Sulfato de Sodio Anhidrido ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), o en forma de cristales ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), para asegurar no solo saturación, sino también la presencia de exceso de cristales, cuando la solución está lista para el uso en el ensayo. Agitar vigorosamente la mezcla durante la adición de la sal y agitar a intervalos frecuentes hasta ser usada. Para reducir la evaporación y prevenir la contaminación, mantenga todo el tiempo la solución cubierta cuando no se utilice. Dejar la solución enfriar a  $70 \pm 2$  °F ( $21 \pm 1$  °C). De nuevo agitar, y dejar la solución reposar a la temperatura designada por al menos 48 h antes de ser utilizada. Antes de cada uso, diluir los trozos de sal, si hay alguno en el contenedor, agitar vigorosamente la solución y determinese la gravedad específica. Cuando se utilice, la solución tendrá una gravedad específica no menor que 1.151 y no más que 1.174. Deseche la solución si esta descolorida o filtrela y chequee su gravedad específica.

Nota 4 – Para la solución, 215 g de sal anhidra o 700 g de sal decahidratada por litro son suficientes para la saturación a 71.6 °F (22 °C). Sin embargo, dado que estas sales no son completamente estables y que es deseable que un exceso de cristales este presente, el uso de no menos de 350g de sal anhidra o 750 g de sal decahidratada por litro es recomendado.

5.1.2 *Solución de Sulfato de Magnesio* – Prepárese una solución saturada de sulfato de magnesio por disolver un USP o de grado igual de la sal en agua a una temperatura de 77 a 86 °F (25 a 30 °C). Agregar suficiente sal (Nota 5), de Sulfato de magnesio anhidrido ( $\text{MgSO}_4$ ), o en forma de cristales ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) (sal de Epsom), para asegurar la saturación y la presencia de exceso de cristales, cuando la solución está lista para el uso en el ensayo. Agitar vigorosamente la mezcla durante la adición de la sal y agitar a intervalos frecuentes hasta ser usada. Para reducir la evaporación y prevenir la contaminación, mantenga todo el tiempo la solución cubierta cuando no se utilice. Dejar la solución enfriar a  $70 \pm 2$  °F ( $21 \pm 1$  °C). De nuevo agitar, y dejar la solución reposar a la temperatura designada por al menos 48 h antes de ser utilizada. Antes de cada uso, diluir los trozos de sal, si hay alguno en el contenedor, agitar vigorosamente la solución y determinese la gravedad específica. Cuando se utilice, la solución tendrá una gravedad específica no menor que 1.295 y no más que 1.308. Deseche la solución si esta descolorida o filtrela y chequee su gravedad específica.

Nota 5 – Para la solución, 350 g de sal anhidra o 1230 g de sal heptahidratada por litro son suficientes para la saturación a 73.4 °F (23 °C). Sin embargo, dado que estas sales no son completamente estables, con la sal hidratada siendo la más estable de las dos y que es deseable que un exceso de cristales este presente, es recomendado que la sal heptahidratada sea usada en una cantidad de no menos de 1400g/litro de agua.

5.1.3 *Solución de Cloruro de Bario* – Preparar 100 ml de solución al 5 % de cloruro de bario, disolviendo 5 g de  $\text{BaCl}_2$  en 100 ml de agua destilada.

6 La experiencia con el mejor método indica que el sulfato de sodio grado comercial en forma de polvo seco, considerado aproximadamente anhidro, es el más práctico para su uso. Dicho grado es más económicamente disponible de la forma anhidra. El sulfato de sodio decahidratado presenta dificultades en su composición para la solución requerida a causa de su efecto de enfriamiento en la solución.

## Continuación de la figura 53.



C 88

### 6. Muestreo

6.1 La muestra debe ser obtenida en general de acuerdo con la práctica D 75 y reducida tamaño de prueba de acuerdo a C 702.

6.2 *Agregado Fino* – El agregado fino para el ensayo debe pasar a través de la malla 9.5 mm (3/8"). La muestra debe ser de tamaño tal que rinda no menos de 100 g para cada una de las siguientes mallas, las cuales deben estar en cantidades de 5% o más, expresado en términos de las siguientes mallas:

Pasa la Malla	Retenido en la Malla
600 $\mu\text{m}$ (No. 30)	300 $\mu\text{m}$ (No. 50)
1.18 mm (No. 16)	600 $\mu\text{m}$ (No. 30)
2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)
4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)
9.5 mm (3/8 pulg)	4.75 mm (No. 4)

6.3 *Agregado Grueso* – El agregado grueso para el ensayo debe consistir de material retenido sobre la malla No. 4. La muestra debe ser de tamaño tal que rinda las siguientes cantidades de los tamaños indicados que estén en cantidades de 5% o más:

Tamaño (Mallas con aberturas cuadradas)	Masa, g
9.5 mm (3/8 pulg) a 4.75 mm (No. 4)	300 $\pm$ 5
19.0mm (3/4 pulg) a 9.5 mm (3/8 pulg)	1000 $\pm$ 10
Material consistente de:	
12.5-mm (1/2-pulg) a 9.5-mm (3/8-pulg)	330 $\pm$ 5
19.0-mm (3/4-pulg) a 12.5-mm (1/2-pulg)	670 $\pm$ 10
37.5mm (1 1/2-pulg) a 19.0 mm (3/4-pulg)	1500 $\pm$ 50
Material consistente de:	
25.0 mm (1-pulg) a 19.0 mm (3/4-pulg)	500 $\pm$ 30
19.0 mm (1 1/2-pulg) a 12.5 mm (1-pulg)	1000 $\pm$ 10
63mm (2 1/2-pulg) a 37.5 mm (1 1/2-pulg)	5000 $\pm$ 300
Material consistente de:	
50 mm (2 pulg) a 37.5mm (1 1/2-pulg)	2000 $\pm$ 200
63mm (2 1/2-pulg) a 50mm (2-pulg)	3000 $\pm$ 300
Tamaños más grandes por 25 mm (1-pulg)	
Separados en tamaños de malla, cada fracción	7000 $\pm$ 1000

6.4 *Agregado Fino* – Cuando el agregado a ser ensayado contiene cantidades apreciables de material grueso y fino, teniendo una granulometría con más del 10% en peso de agregado grueso mayor que la malla 9.5 mm (3/8 pulg) y también más del 10% en peso de finos que la malla 4.75 mm (No. 4), ensayar las muestras separadas, la fracción menor que la No. 4 y la fracción mayor que la No. 4, de acuerdo con los procedimientos para agregados finos y gruesos, respectivamente. Reportar los resultados separadamente para la fracción fina y la fracción gruesa, dando los porcentajes de fracciones gruesa y fina referidos a la granulometría inicial.

### 7. Preparación de la Muestra de Ensayo

7.1 *Agregado Fino* – Lavar vigorosamente la muestra de agregado fino sobre la malla No.50, secar a peso constante a 230  $\pm$  9 °F (110  $\pm$  5 °C), y separar en los diferentes tamaños por tamizado, como sigue: haga una separación aproximada de la muestra graduada por medio de un juego de mallas estándar especificadas en 6.2. de las fracciones obtenidas, seleccionar las muestras de suficiente tamaño para rendir 100g después de tamizado de descarte. (En general, una muestra de 110 g será suficiente) No utilizar agregado fino atrapado en las mallas en la preparación de la muestra. Pese las muestras consistentes de 100

$\pm$  0.1 g para cada una de las fracciones separadas después del tamizado final y colocarlas en contenedores separados para el ensayo.

7.2 *Agregado Grueso* – Lavar vigorosamente y secar la muestra de agregado grueso a peso constante 230  $\pm$  9 °F (110  $\pm$  5 °C) y separar en los diferentes tamaños como se muestra en 6.3 por tamizado para descarte. Pesar las cantidades de los diferentes tamaños dentro de las tolerancias de 6.3 y cuando la porción consiste de dos tamaños, combinarlas para el designado peso total. Registrar los pesos de las muestras de ensayo y sus componentes fraccionarias. En el caso de las partículas más grandes que 19.0 mm (3/4"), registre el número de partículas en las muestras de ensayo.

### 8. Procedimiento

8.1 *Almacenamiento de muestras en la solución* – Sumérjense las muestras en la solución preparada de sulfato de sodio o sulfato de magnesio por lo menos de 16 horas y no más de 18 horas, de tal manera que la solución cubra las muestras como mínimo 1/2 pulgada. (Nota 6). Cúbrase los depósitos para reducir la evaporación y prevenir la adición accidental de sustancias extrañas. Manténgase la muestra sumergida en la solución a una temperatura de 70  $\pm$  2 °F (21  $\pm$  1 °C) por el periodo de inmersión.

Nota 6 – Una parrilla de alambre de peso adecuado colocada sobre la muestra permitirá que los agregados de peso muy ligero alcancen a cubrirse.

8.2 *Secado de las muestras después de la inmersión* – Después del periodo de inmersión, remover la muestra de agregado de la solución y permitir que drene por 15  $\pm$  5 min, posteriormente colocarla en el horno de secado. La temperatura del horno debe haber sido alcanzada previamente a 230  $\pm$  9 °F (110  $\pm$  5 °C). Secar las muestras a la temperatura especificada hasta alcanzar peso constante. Establezca el tiempo requerido para alcanzar peso constante de la siguiente manera: con el horno conteniendo todas las muestras, revise las pérdidas de peso de las muestras de ensayo, sacándolas y pesándolas, sin enfriar a intervalos de 2 a 4 horas; hacer suficientes revisiones para establecer el tiempo de secado requerido para el lugar menos favorable del horno (ver 4.5) y la condición de la muestra (Nota 7). El peso constante podrá ser considerado que ha sido alcanzado cuando la pérdida de peso sea menor que 0.1% del peso de la muestra en 4 horas de secado. Después que el peso constante ha sido alcanzado, dejar las muestras enfriar a temperatura ambiente, hasta que sean de nuevo inmersas en la solución preparada como se describe en 8.1.

Nota 7 – El tiempo requerido de secado para alcanzar peso constante puede variar considerablemente por varias razones. La eficiencia del secado será reducida al acumularse los ciclos por la sal adherida a las partículas y en algunos casos por el incremento del área superficial debido a las partiduras. Los diferentes tamaños de fracciones de agregados tienen diferentes razones de secado. Los tamaños más pequeños tenderán a secarse más despacio debido a sus áreas de superficie más grandes y vacíos restringidos, pero esta tendencia puede cambiar por los efectos del tamaño y tipo del recipiente.

8.3 *Número de Ciclos* – Repita los procesos alternos de inmersión y secado hasta obtener el número de ciclos.

8.4 Después de completar el ciclo final y la muestra se ha enfriado, lavar la muestra con agua para quitarle el sulfato de sodio o

Continuación de la figura 53.



C 88

sulfato de magnesio, lo cual se determina por la reacción del cloruro de bario (BaCl<sub>2</sub>) con el agua de lavado. Lavar con agua que circule a 110 ± 10 °F (43 ± 6 °C) a través de las muestras en sus recipientes. Esto puede ser hecho, colocándolas en un tanque en el cual el agua caliente puede ser introducida en el fondo. En la operación de lavado, las muestras no deben estar sujetas a impacto o abrasión que pueda tender a quebrar las partículas.

Nota 8 – El agua de grifo contiene sulfato la cual cuando es usada para el agua de lavado esta se turbará cuando se ensaye con la solución de sulfato de sodio. Lo turbio de una solución de agua de grifo y cloruro de bario puede ser evaluado que cuando se utiliza como agua de lavado del ensayo con el mismo grado de turbidez, puede asumirse que está libre del sulfato del ensayo.

9. Examen Cuantitativo

9.1 Haga el examen cuantitativo como sigue:

9.1.1 Después que la solución de sulfato de sodio o sulfato de magnesio ha sido removida, secar cada fracción de la muestra a peso constante a 230 ± 9 °F (110 ± 5°C). Tamizar el agregado fino sobre las mismas mallas sobre las cuales fue retenido antes del ensayo, y tamice el agregado grueso sobre las mallas que se muestran abajo para el tamaño apropiado de la partícula. Para el agregado fino, el método y duración del tamizado será el mismo que fue usado en la preparación de las muestras. Para el agregado grueso, tamizar manualmente, con agitación suficiente para asegurar que todo el material de tamaño más pequeño pase la malla designada. No hay que emplear manipulación extra para quebrar las partículas o hacer que pasen las mallas. Pesar el material retenido en cada malla y registrar cada cantidad. La diferencia entre las cantidades y el peso inicial de la fracción de la muestra ensayada es la pérdida en el ensayo y es expresado como un porcentaje del peso inicial para uso en la tabla 1.

Tamaño del agregado	Malla usada para determinar la pérdida
63 mm (2½ pulg.) a 37.5 mm (1½ pulg.)	31.5 mm (1¼ pulg.)
37.5 mm (1½ pulg.) a 19.0 mm (¾ pulg.)	16.0 mm (5/8 pulg.)
19 mm (¾ pulg.) a 9.5 mm (3/8 pulg.)	8.0 mm (5/16 pulg.)
9.5 mm (3/8 pulg.) a 4.75 mm (No. 4)	4.0 mm (No. 5)

10. Examen Cualitativo

10.1 Hacer un examen cualitativo de las muestras de ensayo más grandes que 19.0 mm (¾") como sigue (Nota 9):

10.1.1 Separa las partículas de cada muestra de ensayo en grupos de acuerdo con el efecto producido por el ensayo (Nota 9).

10.1.2 Anote el número de partículas que manifieste cada tipo de daño.

Nota 9 – Muchos tipos de efectos pueden esperarse. En general pueden ser clasificados como, desintegración, partidas, desmenzadas, agrietadas, escamadas, etc. mientras que solo las partículas mayores a ¾ de pulgada en tamaño con requeridas para ser examinadas cualitativamente y es recomendable para el examen de las partículas mas pequeñas sea hecho en orden para determinar si hay alguna evidencia de excesiva división.

11. Reporte

11.1 Reporte los siguientes datos (Nota 10):

11.1.1 El peso de cada fracción de cada muestra antes del ensayo

11.1.2 El material de cada fracción de la muestra más fino que la malla designada en la sección 9.1.1 por tamizado después del ensayo, expresado como un porcentaje del peso original de la fracción.

11.1.3 El pesado promedio calculado de acuerdo con el método de ensayo C 136 del el porcentaje de pérdida de cada fracción, basado en la graduación de la muestra cuando recibida o preferiblemente en la graduación promedio del material de la porción del suministro del cual la muestra es representativa excepto que:

11.1.3.1 Para agregados finos (con menos del 10% de gruesos mayores que la malla 3/8"), asumir que los tamaños más finos que la malla No. 50 tienen 0% de pérdida y tamaños más gruesos que la malla de 3/8" tienen la misma pérdida que el próximo tamaño más pequeño, para el cual el dato de ensayo es aceptable.

11.1.3.2 Para agregado grueso (con menos del 10% de finos menores que la malla No.4), asumir que los tamaños más finos que la No. 4 tienen la misma pérdida que el próximo tamaño más grande, para el cual el dato del ensayo es aceptable.

TABLA 1 Forma Sugerida para Registrar los Datos de Ensayo (con valores de ensayo)

Tamaño de Malla	Graduación de la Muestra Original, %	Peso de Fracciones Antes del Ensayo, g	Porcentaje que pasa la malla designada después del ensayo	Porcentaje de pérdida pesados
Ensayo de Solidez del Agregado Fino				
Menos que 150 µm (No.100)	6	...	...	...
300 µm (No.50) a No.100	11	...	...	...
600 µm (No.30) a No.50	26	100	4.2	1.1
1.18 mm (No.16) a No.30	25	100	4.8	1.2
2.36 mm (No.8) a No.16	17	100	8.0	1.4
4.75 mm (No.4) a No.8	11	100	11.2	1.2
9.5 mm (3/8 pulg.) a No.4	4	...	11.2*	0.4
Totales	100.0	...	...	5
Ensayo de Solidez del Agregado Grueso				
63 mm (2½ pulg.) a 50 mm (2 pulg.)	2825 g	20	4783	4.8
50 mm (2 pulg.) a 37.5 mm (1½ pulg.)	1958 g			
37.5 mm (1½ pulg.) a 25 mm (1 pulg.)	1012 g	45	1525	8.0
25 mm (1 pulg.) a 19 mm (¾ pulg.)	513 g			
19 mm (¾ pulg.) a 12.5 mm (½ pulg.)	675 g	23	1008	9.6
12.5 mm (½ pulg.) a 9.5 mm (¾ pulg.)	333 g			
9.5 mm (¾ pulg.) a 4.75 mm (No.4)	298 g	12	298	11.2
Totales	100	...	...	8

\*El porcentaje de pérdida (11.2%) del tamaño próximo menor es usado como porcentaje de pérdida para este tamaño, dado que el tamaño contiene menos del 5% de la muestra original.

Continuación de la figura 53.



C 88

TABLA 2 Forma Sugerida para el Examen Cualitativo (con valores de ensayo)									
Examen Cualitativo para agregado grueso									
Tamaño de Malla	Partículas Expuestas al Desgaste								Total No. de Partículas antes del Ensayo
	Partículas		Desmenuzadas		Agrietadas		Escamadas		
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	
63 mm (2 ½ pulg.) a 37.5 mm (1 ½ mm)	2	7	...	...	2	7	...	...	29
37.5 mm (1 ½ pulg.) a 19.0 mm (¾ pulg.)	5	10	1	2	4	8	...	...	50

11.1.3.3 Para un agregado que contiene cantidades apreciables de agregado grueso y fino, ensayarlo en dos muestras separadas como requerido en 6.4, calcular los promedios de pesos de pérdida separadamente, para las fracciones menores que la malla No. 4 y los mayores que la No. 4 basados en las graduaciones recalculadas considerando la fracción fina como 100% y la fracción gruesa como 100%. Reporte los resultados separadamente dando los porcentajes del material menores que la No. 4 y mayores que la No.4 en la graduación original.

11.1.3.4 Para los propósitos de cálculo del promedio de peso, considerar cualquier tamaño en 6.2 y 6.3 que contengan menos del 5% de la muestra, los cuales tendrán la misma pérdida como el promedio del próximo menor y el próximo mayor o si uno de estos tamaños está ausente, que tenga la misma pérdida del próximo mayor o próximo menor, del cual este presente.

11.1.4 Reporte los porcentajes de pérdida de peso al entero mayor.

11.1.5 En el caso de las partículas mayores que la malla 19.0 mm (3/4"), efectuar antes de ensayar: (1) El número de las Partículas de cada fracción (2) El número de partículas afectadas, clasificadas como el número y desintegradas, partidas, desmenuzadas agrietadas, escamadas, etc. Como se muestra en la Tabla 2.

11.1.6 Clase de solución (Sulfato de sodio o magnesio) y si la solución fue fresca o de uso previo.

Nota 9 – Muchos tipos de efectos pueden esperarse. En general pueden ser clasificados como, desintegración, partidas, desmenuzadas, agrietadas, escamadas, etc. mientras que solo las partículas mayores a ¼ de pulgada en tamaño con requeridas para ser examinadas cualitativamente y es recomendable para el examen de las partículas mas pequeñas sea hecho en orden para determinar si hay alguna evidencia de excesiva división.

## 12. Informe

12.1 Para agregado grueso con pérdidas de solidez de peso promedio, en los rangos de 6 a 16% para sulfato de sodio y 9 a 20% para magnesio, los índices de precisión son los siguientes:

	Coefficiente de Variación (1S %), % <sup>A</sup>	Diferencia Entre Dos Ensayos (D2S %), % de Media <sup>A</sup>
Multilaboratorio:		
Sulfato de Sodio	41	116
Sulfato de Magnesio	25	71
Único-Operador:		
Sulfato de Sodio	24	68
Sulfato de Magnesio	11	31

<sup>A</sup>Estos número representan, respectivamente, los límites de (1S%) y (D2S%) como se describe en la Práctica C 670.

12.2 *Tendencia* – Dado que no existe material adecuado aceptable de referencia para determinar la tendencia para este proceso, ninguna declaración sobre la tendencia está siendo hecha.

## 13. Palabras Clave

13.1 agregados, sulfato de sodio; sulfato de magnesio; solidez; intemperismo.

Reference: Annual Book of ASTM Standards, 2003  
Volume: 04.02 Concrete and Aggregates

Fuente: elaboración propia. Norma ASTM C 88-99a.

