



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

**EVALUACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE LA ESCORIA DE MATA DE NÍQUEL EN SU  
EMPLEO COMO AGREGADO FINO PARA LA ELABORACIÓN DE MORTERO UTILIZANDO  
LOS MÉTODOS NORMALIZADOS ASTM C 227 Y ASTM C 109**

**Daniel Estuardo Matias Pérez**

Asesorado por el Ing. Qco. César Alfonso García Guerra  
e Ing. Qco. Adrián Antonio Soberanis Ibáñez

Guatemala, noviembre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE LA ESCORIA DE MATA DE NÍQUEL EN SU  
EMPLEO COMO AGREGADO FINO PARA LA ELABORACIÓN DE MORTERO UTILIZANDO  
LOS MÉTODOS NORMALIZADOS ASTM C 227 Y ASTM C 109**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**DANIEL ESTUARDO MATIAS PÉREZ**  
ASESORADO POR EL ING. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA  
E ING. ADRIAN ANTONIO SOBERANIS IBÁÑEZ  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADORA	Inga. Manuel Gilverto Galván Estrada
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

## **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 APROVECHAMIENTO DE LA ESCORIA DE MATA DE NÍQUEL EN SU EMPLEO COMO AGREGADO FINO PARA LA ELABORACIÓN DE MORTERO UTILIZANDO LOS MÉTODOS NORMALIZADOS ASTM C 227 Y ASTM C 109**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 7 de octubre de 2013.

**Daniel Estuardo Matias Pérez**

Guatemala, miércoles 16 de noviembre de 2016

Ingeniero

Carlos Salvador Won Davi

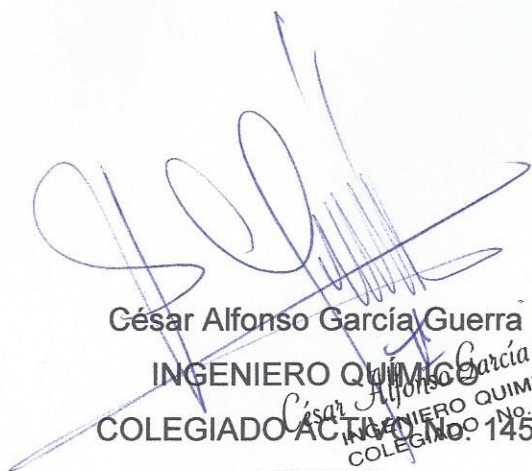
Director de Escuela de ingeniería Química

Su Despacho

De manera atenta me dirijo a usted para informarle que el informe final del trabajo de graduación titulado "EVALUACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE LA ESCORIA DE MATA DE NÍQUEL EN SU EMPLEO COMO AGREGADO FINO PARA LA ELABORACIÓN DE MORTERO UTILIZANDO LOS MÉTODOS NORMALIZADOS ASTM C 227 Y ASTM C 109", realizado por el estudiante Daniel Estuardo Matias Pérez (Registro Académico 2003-12472 & DPI 2488356530108) ha sido revisado como asesor del proyecto y procede la gestión para su evaluación y autorización del documento final.

Sin otro motivo en particular, me suscribo de usted con las muestras de mi consideración y respeto.

Atentamente.



César Alfonso García Guerra  
INGENIERO QUÍMICO  
COLEGIADO ACTIVO No. 145  
ASESOR



Guatemala, 29 de marzo de 2017.  
Ref. EIQ.TG-IF.012.2017.

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **088-2012** 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 el estudiante universitario: **Daniel Estuardo Matias Pérez**.  
Identificado con número de carné: **2003-12472**.  
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

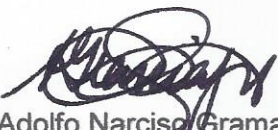
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE LA ESCORIA DE MATA DE NÍQUEL EN SU EMPLEO COMO AGREGADO FINO PARA LA ELABORACIÓN DE MORTERO UTILIZANDO LOS MÉTODOS NORMALIZADOS ASTM C 227 Y ASTM C 109**

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”

  
Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo







Ref.EIQ.TG.057.2017

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 del estudiante, **DANIEL ESTUARDO MATIAS PÉREZ** titulado: **"EVALUACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE LA ESCORIA DE MATA DE NÍQUEL EN SU EMPLEO COMO AGREGADO FINO PARA LA ELABORACIÓN DE MORTERO UTILIZANDO LOS MÉTODOS NORMALIZADOS ASTM C 227 Y ASTM C 109"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*



Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
Director  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, noviembre 2017

Cc: Archivo  
CSWD/ale

Universidad de San Carlos  
De Guatemala

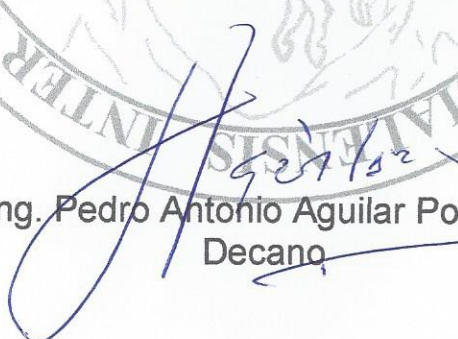


Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.587-2017

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 APROVECHAMIENTO DE LA ESCORIA DE MATA DE NIQUEL EN SU EMPLEO COMO AGREGADO FINO PARA LA ELABORACIÓN DE MORTERO UTILIZANDO LOS MÉTODOS NORMALIZADOS ASTM C 227 Y ASTM C 109**, presentado por el estudiante universitario: **Daniel Estuardo Matías Pérez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, noviembre de 2017

/cc





## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser la luz y mi Guía en cada momento de mi vida.
<b>Virgen María</b>	Por guardarme, iluminarme y bendecirme en los momentos difíciles y dichosos de mi vida.
<b>Mis padres</b>	Por creer en mí, su amor, dedicación, confianza y apoyo.
<b>San Miguel Arcángel</b>	Por cuidarme y apoyarme en todo momento.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Maricela Arias**

Gracias por tu apoyo y ayuda incondicional.

**Ing. César García**

Por su confianza y apoyo en el desarrollo de esta investigación.

**Ing. Adrián Soberanis**

Por su apoyo y atención en la revisión del presente informe.

**Ing. Víctor Monzón**

Por su apoyo y confianza.

**Mis tíos y sobrinos**

Por su cariño, confianza y apoyo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
Hipótesis .....	XXV
INTRODUCCIÓN .....	XXVII
1.    MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1.    Antecedentes de la investigación .....	1
1.1.1.    Caracterización fisicoquímica y planta, C. G. N.....	1
1.1.2.    Agregados finos.....	2
1.1.3.    Agregados para concreto .....	3
1.1.4.    Estudios de barra de mortero .....	3
1.2.    Justificación .....	4
1.3.    Determinación del problema.....	4
1.3.1.    Definición .....	4
1.3.2.    Delimitación .....	5
2.    MARCO TEÓRICO.....	7
2.1.    Agregados .....	7
2.1.1.    Agregado fino .....	8
2.1.2.    Agregado grueso .....	10
2.1.3.    Módulo de finura .....	14
2.1.4.    Otras consideraciones .....	15

2.1.5.	Estudios de calidad para agregados del concreto...	15
2.2.	Escoria de mata de níquel y proceso minero .....	15
2.2.1.	Preparación del mineral.....	18
2.2.2.	Reducción del mineral.....	18
2.2.3.	Fundición del mineral .....	19
2.2.4.	Conversión de mata de níquel.....	21
2.2.5.	Granulación del producto .....	22
2.3.	Examen petrográfico de los agregados.....	25
2.4.	Reactividad potencial álcali-sílice.....	29
2.4.1.	Significado de RAS .....	29
2.4.2.	¿Cómo se dan las RAS? .....	31
2.4.2.1.	La acción del sílice .....	32
2.4.2.2.	La acción del álcali .....	36
2.4.2.2.1.	Grupo A: reacción álcali-sílice Ocorre con minerales de sílice amorfos (poco cristalinos) y vidrios volcánicos o artificiales .....	37
2.4.2.2.2.	Grupo B: reacción álcali-sílice que ocurre con diversas variedades de cuarzo tales como cuarzo deformado y fracturado .....	37
2.4.2.3.	La acción del calcio .....	38
2.4.3.	Clasificación de las RAS .....	39



	2.4.3.1.	RAS rápida .....	39
	2.4.3.2.	RAS lenta.....	39
	2.4.4.	Condiciones que intervienen en las RAS.....	40
	2.4.5.	Proceso de las RAS en función del tiempo.....	40
	2.4.5.1.	Período de inducción .....	40
	2.4.5.2.	Período de reacción franca.....	41
	2.4.5.3.	Período de amortiguamiento.....	41
	2.4.6.	¿Cómo se manifiestan las RAS? .....	41
2.5.		Método químico para determinar la reactividad potencial álcali-sílice de los agregados (norma ASTM C 289).....	43
	2.5.1.	Determinación gravimétrica del sílice disuelto (S <sub>c</sub> ).....	46
	2.5.2.	Reducción de la alcalinidad (R <sub>c</sub> ).....	50
2.6.		Método de barra de mortero para la determinación de reactividad potencial álcali-sílice (norma ASTM C 227).....	51
	2.6.1.	Significancia.....	52
2.7.		Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 2 in o 50 mm de lado (norma ASTM C 109).....	57
	2.7.1.	Sumario .....	57
	2.7.2.	Significancia.....	58
3.		METODOLOGÍA.....	61
	3.1.	Variables.....	61
	3.1.1.	Variables de medición .....	64
	3.1.1.1.	Gradación ( <i>grading</i> ).....	64
	3.1.1.2.	Concentración (o proporción) .....	64
	3.1.1.3.	Diseño de mezcla .....	65

3.1.1.4.	Longitud efectiva del calibre (ASTM C 227).....	66
3.1.1.5.	Longitud base (ASTM C 227) .....	66
3.1.1.6.	Longitud a la edad determinada (ASTM C 227) .....	66
3.1.1.7.	Máxima carga total (ASTM C 109) .....	66
3.1.1.8.	Área de la superficie cargada (ASTM C 109).....	67
3.1.1.9.	Edad.....	67
3.1.1.10.	Volumen (de agua).....	67
3.1.1.11.	Temperatura.....	68
3.1.1.12.	Humedad.....	68
3.1.1.13.	Presión barométrica .....	69
3.1.2.	Variables de cálculo .....	69
3.1.2.1.	Porcentaje de Expansión (ASTM C 227) .....	69
3.1.2.2.	Resistencia mecánica a compresión (ASTM C 109) .....	69
3.1.2.3.	Relación agua/cemento.....	69
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	70
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	71
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	71
3.4.1.	Localización.....	71
3.4.2.	Equipo .....	71
3.4.3.	Cristalería .....	71
3.4.4.	Reactivos.....	72
3.4.5.	Equipo de laboratorio .....	72
3.4.6.	Otros instrumentos .....	72
3.5.	Técnicas cuantitativas .....	72

3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	72
3.6.1.	Muestreo.....	77
3.6.2.	Recolección de datos .....	77
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	77
3.7.1.	Tabulación y ordenamiento .....	77
3.7.1.1.	Gradación ( <i>grading</i> ).....	78
3.7.1.2.	Diseño de mezcla .....	81
3.7.1.3.	Mediciones de longitud (ensayo ASTM C 227) .....	84
3.7.1.4.	Mediciones de carga máxima total (ensayo ASTM C 109) .....	85
3.7.2.	Procesamiento.....	85
3.7.2.1.	Relación agua/cemento .....	86
3.7.2.2.	Ensayo de reactividad potencial álcali-sílice .....	87
3.7.2.3.	Ensayo de resistencia a compresión mecánica .....	90
3.7.2.4.	Análisis estadístico .....	94
3.8.	Plan de análisis de los resultados .....	95
3.8.1.	Métodos y modelos de datos según tipo de variables .....	95
3.8.1.1.	Identificación de variables .....	95
3.8.1.2.	Verificación de preguntas de investigación.....	97
3.8.1.3.	Verificación de los objetivos.....	97
3.8.1.4.	Verificación de hipótesis .....	98
3.8.2.	Programas a utilizar para el análisis de datos .....	98

4.	RESULTADOS.....	99
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	113
	CONCLUSIONES.....	121
	RECOMENDACIONES .....	123
	BIBLIOGRAFÍA.....	125
	APÉNDICES.....	129
	ANEXOS.....	133



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Agregado fino (árido de origen pétreo).....	9
2.	Curva granulométrica de agregado fino .....	10
3.	Agregado grueso (piedrín, árido, de origen pétreo) .....	11
4.	Agregado grueso (hormigón triturado, árido, de origen residual) .....	12
5.	Curva granulométrica de agregado grueso .....	14
6.	Escoria de mata de níquel (después de la gradación) .....	16
7.	Escoria de mata de níquel (posterior a gradación).....	17
8.	Diagrama de flujo del proceso para el primer año de operación .....	24
9.	Equipo de fluorescencia de rayos X.....	25
10.	Examen petrográfico para la identificación de diferentes tipos de cuarzo (promotor de RAS) .....	28
11.	Concreto fisurado debido a la reactividad potencial álcali-sílice (superficie) .....	30
12.	Concreto fisurado debido a la reactividad potencial álcali-sílice (fondo).....	30
13.	Proceso general de RAS.....	31
14.	Silicio tetraédrico (sílice, SiO <sub>2</sub> ).....	33
15.	Estructura del cuarzo (estructura cristalina, SiO <sub>2</sub> ).....	34
16.	Efecto de contenido de sílice en RAS (efecto pésimo).....	36
17.	Reacción perjudicial álcali-sílice en pavimento de Nebraska .....	42
18.	Una pieza de agregado (muestra el agrietamiento interno y un borde negro muy delgado alrededor de las afueras del agregado).....	42

19.	Grietas en la pasta (propagadas lejos de una partícula de agregado) .....	43
20.	Malla # 50 & #100 (referentes a la especificación ASTM E 11) .....	44
21.	Reactores (norma ASTM C 289).....	44
22.	Ataques ácidos en campana y aparato de filtración.....	47
23.	Evaporaciones con ácido fluorhídrico (HF) .....	48
24.	Reducción de la alcalinidad ( $R_c$ ) .....	50
25.	Barras de mortero curadas durante 24 horas en un cuarto de humedad, inmediatamente después de haber sido formadas (norma ASTM C 227).....	51
26.	Medición de expansión en laboratorio (norma ASTM C 227) .....	53
27.	Cemento UGC (tipo GU, norma ASTM C 1157) .....	53
28.	Lavado de agregado encima de malla # 100 (ASTM C 227) .....	55
29.	Medidas de malla requeridas para ensayos ASTM C 227 & ASTM C 1260 (métodos de barra de mortero).....	56
30.	Fundición y aplastamiento de cubos de mortero por resistencia (norma ASTM C 109).....	58
31.	Prensa hidráulica (máquina universal, norma ASTM C 109) .....	59
32.	Cuadro de variables.....	61
33.	Proceso de investigación: desarrollo .....	73
34.	Flujograma del desarrollo de la investigación .....	76
35.	Resultados de ensayo ASTM C 227 de categorías B, C & D de agregados.....	89
36.	Resultados de ensayo ASTM C 227 de categorías E de agregados ....	90
37.	Relación entre resistencia a compresión y edad del mortero (norma ASTM C 109) .....	93
38.	Desarrollo de resistencia relativa de cubos de mortero de cemento Portland como un porcentaje de la resistencia del día 28.....	93
39.	Tabla de ANOVA para diseño experimental de un factor .....	94

40.	Resultados de ensayo ASTM C 227 de categorías: escoria de mata de níquel y arena sílica .....	102
41.	Relación entre resistencia a compresión y edad del mortero para arena sílica y escoria de mata de níquel (norma ASTM C 109) .....	105

## TABLAS

I.	Gradación de agregados finos .....	8
II.	Reclasificados históricos de los recursos minerales .....	17
III.	Agregados que contienen cantidades de sílice susceptibles a RAS ....	35
IV.	Descripción de variables involucradas (de medición).....	62
V.	Descripción de variables involucradas (de cálculo).....	63
VI.	Descripción de variables a manipular.....	63
VII.	Material a combinar para conformar la arena sílica que se usará acorde a la gradación especificada en el ensayo ASTM C 227 .....	79
VIII.	Material a combinar para conformar la escoria de mata de níquel que se usará acorde a la gradación especificada en el ensayo ASTM C 227.....	80
IX.	Material a combinar para conformar la arena sílica que se usará acorde a la gradación especificada en el ensayo ASTM C 109 .....	80
X.	Material a combinar para conformar la escoria de mata de níquel que se usará acorde a la gradación especificada en el ensayo ASTM C 109.....	81
XI.	Diseño de mezcla: concentraciones para agregado fino.....	82
XII.	Diseño de mezcla: ensayo ASTM C 227 – NTC 3828 (concentraciones para barras de mortero) .....	82
XIII.	Diseño de mezcla: ensayo ASTM C 109 – NTC 220 (concentraciones para cubos de mortero).....	83

XIV.	Diseño de Mezcla: Ensayo ASTM C 227 – NTC 3828 (masas para 1 barra de mortero) .....	83
XV.	Diseño de mezcla: ensayo ASTM C 109 – NTC 220 (masas para 6 cubos de mortero).....	83
XVI.	Diseño de mezcla: ensayo ASTM C 109 – NTC 220 (masas para 9 cubos de mortero).....	84
XVII.	Longitud (mm) a 1 día, según el ensayo ASTM C 227 .....	84
XVIII.	Máxima carga total (kg <sub>f</sub> ) a 1 día, según el ensayo ASTM C 109 ..	85
XIX.	Relación a/c de las barras de mortero (norma ASTM C 227) .....	86
XX.	Relación a/c de los barras de mortero (norma ASTM C 109) .....	87
XXI.	Porcentaje de expansión (%) a 3 días según la norma ASTM C 227 .....	87
XXII.	Porcentaje de expansión según la norma ASTM C 227 .....	88
XXIII.	Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 3 días según la norma ASTM C 109 .....	91
XXIV.	Resistencia a compresión mecánica (MPa) según la norma ASTM C 109 .....	91
XXV.	Porcentaje de expansión (%) a 1 día según la norma ASTM C 227 .....	99
XXVI.	Porcentaje de expansión (%) a 3 días según la norma ASTM C 227 ...	99
XXVII.	Porcentaje de expansión (%) a 7 días según la norma ASTM C 227 .	100
XXVIII.	Porcentaje de expansión (%) a 14 días según la norma ASTM C 227 .....	100
XXIX.	Porcentaje de expansión (%) a 28 días según la norma ASTM C 227 .....	100
XXX.	Porcentaje de expansión (%) a 56 días según la norma ASTM C 227 .....	101
XXXI.	Porcentaje de expansión según la norma ASTM C 227 .....	101
XXXII.	Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 1 día según la norma ASTM C 109 .....	102



XXXIII.	Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 3 días según la norma ASTM C 109.....	103
XXXIV.	Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 7 días según la norma ASTM C 109.....	103
XXXV.	Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 14 días según la norma ASTM C 109.....	103
XXXVI.	Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 28 días según la norma ASTM C 109.....	104
XXXVII.	Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 56 días según la norma ASTM C 109.....	104
XXXVIII.	Resistencia a compresión según la norma ASTM C 109 .....	104
XXXIX.	ANOVA 1 factor, porcentaje de expansión (%) a 1 día según norma ASTM C 227.....	106
XL.	ANOVA 1 factor, porcentaje de expansión (%) a 3 días según norma ASTM C 227.....	106
XLI.	ANOVA 1 factor, porcentaje de expansión (%) a 7 días según norma ASTM C 227.....	106
XLII.	ANOVA 1 factor, porcentaje de expansión (%) a 14 días según norma ASTM C 227.....	107
XLIII.	ANOVA 1 factor, porcentaje de expansión (%) a 28 días según norma ASTM C 227.....	107
XLIV.	ANOVA 1 factor, porcentaje de expansión (%) a 56 días según norma ASTM C 227.....	107
XLV.	ANOVA 2 factores, porcentaje de expansión (%) según norma ASTM C 227.....	108
XLVI.	ANOVA 1 factor, resistencia a compresión mecánica (MPa) a 1 día según norma ASTM C 109.....	108
XLVII.	ANOVA 1 factor, resistencia a compresión mecánica (MPa) a 3 días según norma ASTM C 109 .....	109

XLVIII.	ANOVA 1 factor, resistencia a compresión mecánica (MPa) a 7 días según norma ASTM C 109.....	109
XLIX.	ANOVA 1 factor, resistencia a compresión mecánica (MPa) a 14 días según norma ASTM C 109.....	109
L.	ANOVA 1 factor, resistencia a compresión mecánica (MPa) a 28 días según norma ASTM C 109.....	110
LI.	ANOVA 1 factor, resistencia a compresión mecánica (MPa) a 56 días según norma ASTM C 109.....	110
LII.	ANOVA 2 factores, resistencia a compresión mecánica (MPa) según norma ASTM C 109 .....	110

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Área de la superficie cargada
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetros cuadrados
<b>DM</b>	Diseño de mezcla
<b>t</b>	Edad del mortero
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>g</b>	Gramos
<b>H<sub>a</sub></b>	Hipótesis alterna
<b>H<sub>o</sub></b>	Hipótesis nula
<b>H</b>	Humedad
<b>Kg<sub>f</sub></b>	Kilogramos de fuerza
<b>lb<sub>f</sub></b>	Libra de fuerza
<b>L<sub>x</sub></b>	Longitud a la edad determinada
<b>L<sub>i</sub></b>	Longitud base
<b>G</b>	Longitud efectiva del calibre
<b>P</b>	Máxima carga total
<b>MPa</b>	Megapascales
<b>μm</b>	Micrómetros
<b>mL</b>	Mililitros
<b>mm</b>	Milímetros
<b>mm<sup>2</sup></b>	Milímetros cuadrados
<b>mmHg</b>	Milímetros de mercurio

<b>N</b>	Newton (unidad de fuerza) o normalidad (unidad de concentración)
<b>#</b>	Número
<b>pm</b>	Picómetros
<b>L</b>	Porcentaje de expansión
<b>%</b>	Porcentaje o porcentaje en masa (unidad de concentración)
<b>in</b>	Pulgadas
<b>R<sub>c</sub></b>	Reducción en la alcalinidad
<b>a/c</b>	Relación agua/cemento
<b>S<sub>c</sub></b>	Sílice disuelto
<b>SS(AB)</b>	Suma de cuadrados de la interacción entre el factor A & B
<b>SSE</b>	Suma de cuadrados del error
<b>SSA</b>	Suma de cuadrados del factor A
<b>SSB</b>	Suma de cuadrados del factor B
<b>SST</b>	Suma de cuadrados del total
<b>T</b>	Temperatura

## **GLOSARIO**

<b>Adherencia</b>	Adhesión y enlace entre los morteros de pega y de inyección con las unidades de mampostería, el refuerzo y los conectores.
<b>Agregado</b>	Material granular inerte tal como la arena natural, arena artificial, grava y roca triturada que se utilizan para elaborar concreto o mortero.
<b>Alcalinidad</b>	Propiedad de las sustancias capaces de ceder iones hidróxido cuando están en disolución acuosa.
<b>Álcalis</b>	Hidróxidos formados cuando elementos alcalinos entran en contacto con el agua. En el cemento estos elementos alcalinos son el sodio y el potasio.
<b>ANOVA</b>	Siglas en inglés de análisis de varianza.
<b>Árido</b>	Sinónimo de agregado.
<b>ASTM</b>	Siglas en inglés de la Sociedad Americana para el Ensayo e Inspección de Materiales.

<b>ATF</b>	Aceite especial para lubricar cajas de vehículos automáticos.
<b>Concreto</b>	Mezcla dosificada, compuesta de agregados (fino y grueso), cemento, agua y aditivos.
<b>Control de calidad</b>	Proceso que asegura el cumplimiento de las especificaciones, parámetros y normas aplicadas al agregado como al mortero.
<b>Curado</b>	Mantenimiento del concreto o el mortero en condiciones óptimas de humedad y temperatura durante su proceso de fraguado, para que desarrolle la resistencia y no presente fisuras por contracciones o dilataciones.
<b>Densidad</b>	Relación entre la masa y el volumen bruto de una unidad o espécimen.
<b>Durabilidad</b>	Habilidad de un material para resistir la acción de la intemperie, el ataque químico, la abrasión y otras condiciones de servicio.
<b>Ensayo</b>	Procedimiento al que se somete un espécimen para evaluar alguna característica de este.

<b>Escoria</b>	Residuo impuro formado fundamentalmente por calcio, hierro, aluminio y silicato de magnesio, que aparece en el proceso de producción de arrabio, acero y en la fundición de metales como cobre, plomo y níquel.
<b>Espécimen</b>	Unidad (o parte de esta) o porción de mortero que hacen parte de la muestra y que se somete a ensayo.
<b>Flujo</b>	Propiedad de un mortero, medida en un laboratorio, que indica el porcentaje de incremento en el diámetro de la base de un cono truncado de mortero, cuando se coloca sobre una mesa de flujo, la cual se levanta mecánicamente y se deja caer un número de veces determinado, bajo condiciones específicas.
<b>Fraguado</b>	Es el cambio del estado plástico al estado endurecido de una mezcla; la cual puede ser pasta, mortero o concreto.
<b>Gradación</b>	Es la distribución del tamaño de partículas de los agregados (en inglés <i>Grading</i> ). Granulometría.
<b>Grados de libertad</b>	Son los que indican el número de elementos de datos que son independientes de los otros y que se constituyen como piezas únicas de información.

<b>Granulometría</b>	Es la distribución del tamaño de las partículas de una muestra de agregado, determinada por separación mediante una serie de tamices estandarizados.
<b>HF</b>	Ácido fluorhídrico.
<b>Hormigón</b>	Sinónimo de concreto.
<b>JIS</b>	Siglas en inglés de Normas Industriales Japonesas.
<b>Limonita</b>	Es una mezcla de minerales de la clase IV (óxidos), según la clasificación de Strunz. La limonita es normalmente mineral goethita, pero puede consistir también en proporciones variables de magnetita, hematites, lepidocrocita, hisigerita, pitticita, jarosita, entre otros.
<b>Malla</b>	Tamiz.
<b>Material pétreo</b>	Son aquellos materiales inorgánicos, naturales o procesados que derivan de la roca.
<b>Mortero</b>	Es una mezcla consistente en material cementante, árido fino, agua, con o sin adiciones; el cual es utilizado como recubrimiento, acabado o para unir bloques de mampostería.



<b>NTC</b>	Siglas de Norma Técnica Colombiana.
<b>Porosidad</b>	Capacidad de un material de absorber líquidos, dado al volumen de huecos que posea.
<b>RAS</b>	Reacción álcali-sílice, reactividad potencial álcali-sílice.
<b>Saprolita</b>	Es una roca que se ha meteorizado a tal grado que constituye una masa de arcilla o grava donde todavía se pueden ver estructuras de la roca original.
<b>Sílice</b>	El óxido de silicio (IV) o dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) es un compuesto de silicio y oxígeno, llamado comúnmente sílice. Es uno de los componentes de la arena. Una de las formas en que aparece naturalmente es el cuarzo.
<b>Tamiz</b>	Mallas metálicas que sirven para separar partículas más grandes, de otras más pequeñas que pueden pasar a través de los orificios hechos por los hilos metálicos de las mismas.
<b>Toma de muestra</b>	Lugar donde se extraen los agregados, estos pueden ser: ríos, lagos, montañas y canteras. En su defecto si son de origen residual pueden ser vertederos.

**Trabajabilidad**

Característica de un mortero en cuanto a su facilidad para ser colocado o extendido.

**UGC**

Cemento de uso general para la construcción. Cemento UGC – Cementos Progreso. Este es un cemento Portland reforzado con puzolana y nuevas adiciones minerales, se clasifica como cemento para uso general en la construcción. ASTM C 1157; *type GU (general use)*.

## RESUMEN

La investigación propuesta consistió en realizar un estudio preliminar para el aprovechamiento del residuo de escoria de mata de níquel, de la Compañía Guatemalteca de Níquel (C. G. N.), como agregado fino en la manufactura de mortero, en combinación al cemento UGC, aplicación determinada en estudios previos.

Las evaluaciones se realizaron mediante ensayos fisicomecánicos consistentes en determinar la reactividad álcali-sílice mediante el método de expansión de la barra de mortero (ASTM C 227); se evalúa esta respuesta mediante ensayo fisicomecánico y la resistencia a compresión mediante el método de cubos de mortero (ASTM C 109); los morteros a ensayar se elaboraron a través de un diseño experimental para distintas concentraciones de escoria de mata de níquel.

El procedimiento experimental se realizó en el laboratorio fisicoquímico de la sección de química industrial, y en Laboratorio de la Sección de Agregados, Concretos y Morteros, del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) ubicado en el edificio T-5, que se encuentra a una presión atmosférica aproximada de 640 mmHg.

En efecto, se llegó a establecer el cumplimiento de los límites de longitud de expansión de las barras mortero, acorde a las normas ASTM para establecer que el material no es perjudicial (deletéreo) en combinación al cemento Portland para la elaboración de morteros y hormigones. Además, se obtuvieron distintas

lecturas de resistencia a compresión para los cubos de mortero a distintas edades para establecer el cumplimiento conforme las normas ASTM.

## **OBJETIVOS**

### **Generales**

Evaluar la reactividad potencial álcali-sílice y la resistencia a compresión mecánica de la escoria de mata de níquel, proveniente de la Compañía Níquel de Guatemala (C. G. N.), mediante los métodos de barra y cubos de mortero respectivamente, en su empleo como agregado fino en combinación con el cemento UGC.

### **Específicos**

1. Realizar la gradación de la escoria de mata de níquel acorde a las normas ASTM C 227 & ASTM C 109.
2. Estimar el porcentaje de expansión (o contracción) de las barras de mortero elaboradas con escoria de mata de níquel, a distintas concentraciones y a distintas edades conforme la norma ASTM C 227.
3. Calcular la resistencia a compresión mecánica de los cubos de mortero elaborados con escoria de mata de níquel a distintas concentraciones y a distintas edades conforme la norma ASTM C 109.
4. Dictaminar para cada diseño de mezcla la inocuidad de la escoria de mata de níquel en su empleo como agregado fino en función de la reactividad potencial álcali-sílice según la norma ASTM C 227.

5. Establecer para cada diseño de mezcla la inocuidad de la escoria de mata de níquel en su empleo como agregado fino en función de la resistencia a compresión mecánica según la norma ASTM C 109.
6. Sugerir el mejor diseño de mezcla, entre los propuestos, como primera elección, para la escoria de mata de níquel.

# HIPÓTESIS

## Hipótesis de trabajo

Evaluar la inocuidad (si es o no es perjudicial el material para su uso) del material escoria de mata de níquel y analizarlo en función de buena respuesta a la reactividad potencial álcali-sílice utilizando la norma ASTM C 227 y resistencia a compresión mecánica utilizando la norma ASTM C 109.

## Hipótesis estadística

Hipótesis nula ( $H_0$ )

Existe similitud en la resistencia a compresión y el porcentaje de expansión para los distintos diseños de mezcla de escoria de mata de níquel en morteros para analizarse según la norma ASTM C 109 & ASTM C 227, respectivamente a distintas edades.

Hipótesis alterna ( $H_a$ )

No existe similitud en la resistencia a compresión y el porcentaje de expansión para los distintos diseños de mezcla de escoria de mata de níquel en morteros para analizarse según la norma ASTM C 109 & ASTM C 227, respectivamente a distintas edades.





## INTRODUCCIÓN

La escoria de mata de níquel es material residual, conformado primordialmente por hierro, magnesio, silicio, aluminio y magnesio se obtiene a partir del proceso de producción de níquel en combinación de hierro, pues al fundirse como metal, se genera un desecho que se descarta como una escoria granulada.

El almacenamiento de la escoria de mata de níquel de la planta de la Compañía Guatemalteca de Níquel (C. G. N.), como desecho de producción de níquel, se transforma en un problema de impacto ambiental al medio ambiente, debido a que se encuentra a la intemperie y no se le da ninguna utilización, esto ocasiona que los lixiviados se difundan en el suelo.

Para mitigar problemas en los afluentes subterráneos, en estudios anteriores (*Evaluación de la escoria de ferroníquel para morteros de albañilería y acabados, evaluación de la escoria de ferroníquel como agregado fino para concreto*) se determinaron formas de emplear estos desechos en aplicaciones útiles, ya que en tales estudios se evaluó el empleo de la escoria de mata de níquel como agregado fino en la elaboración de concretos y morteros. Se hace énfasis técnico de que estos estudios son exclusivamente proyectos de investigación.

La presente investigación pretende contribuir con el análisis, estructuración y divulgación de información existente y dar a conocer como sugerencia una forma clara y concisa, a los diseñadores y encargados de proyectos, las razones por las cuales se debe complementar los estudios de

reactividad potencial álcali-sílice obtenidos por el método químico (ASTM C 289), con el método barra de mortero (ASTM C 227), y evitar daños causados por las reacciones álcali-sílice (RAS) en estructuras de hormigón o en morteros elaborados con la escoria de mata de níquel.

En el pasado, la resistencia a compresión mecánica era el parámetro más importante de la calidad del mortero y el concreto.

Otros investigadores refieren la adquisición de más experiencia y conocimientos sobre la durabilidad del concreto y el mortero, la cual se manifiesta en otros parámetros de relevancia en comparación con las resistencias a compresión mecánica determinadas por medio de los ensayos de probetas cilíndricas de concreto (ASTM C 39) y cubos de mortero (ASTM C 109), a los 28 días, motivo por el cual en la actualidad las mezclas de concreto y mortero se diseñan por resistencia y durabilidad

Existen demasiadas causas del deterioro en el concreto y el mortero: erosión, abrasión, exposición a temperaturas muy altas o muy bajas, fisuración por contracción por secado, ataques químicos (ocasionados por sulfatos, ácidos, agua de mar) y reacciones internas entre los constituyentes del concreto (como la reacción álcali-sílice, RAS, la reacción álcali-carbonato, y otras).

Entre todas estas causas, la investigación presente se enfocó a la evaluación de la reacción álcali-sílice por el método de barra mortero (ASTM C 227) y su efecto en concretos y morteros realizados en estudios anteriores, a elaborarse con la escoria de mata de níquel (a distintas concentraciones), proveniente del vertedero (fuente residual) de la planta de la Compañía Guatemalteca de Níquel (C. G. N.) ubicada en el municipio de El Estor, del

departamento de Izabal, pues la recopilación de ensayos, informes e investigaciones relacionados con el tema han demostrado tal requerimiento.

Además, se evaluó la inocuidad del material en función del ensayo de compresión mecánica mediante el ensayo de cubos de mortero (ASTM C 109) para las mismas proporciones de escoria de mata de níquel a utilizarse para elaborar las barras de mortero.

Se ha de recordar que la escoria de mata de níquel no es un material que haya sido brindado por un proceso natural, ya que proviene de un proceso de producción de níquel; por ende, la incorporación de este material como agregado fino en concretos y morteros altera sus características, dando lugar a algunos cuidados en las pruebas convencionales de evaluación de las reacciones álcali-sílice y su elección.

El método químico (norma ASTM C 289) provee información de forma rápida si un material es deletéreo (perjudicial) o inocuo en combinación al cemento UGC, debido a que se simula la reacción álcali-sílice de una forma acelerada, proporcionando las condiciones para que esto suceda. Por ello es que se puede llegar a obtener resultados dudosos, máximo cuando se trata de la evaluación de una escoria de mata de níquel y no de áridos pétreos.

En contraste, con el método de barra de mortero (ASTM C 227), tal información se obtiene de una manera lenta, ya que se evaluó la reacción álcali-sílice de una forma fisicomecánica (a partir de la observación y medición de las expansiones de la barra de mortero a través del tiempo); por ello es más confiable que el método químico, ya que aquí se simula la reacción álcali-sílice de forma natural, como sucedería en la práctica.

Por esta razón, al método químico debe ser adicionado el método barra de mortero; también, combinado con el estudio petrográfico de los agregados si son de origen geológico o con una caracterización química en el caso de materiales residuales, para tener un mejor criterio si el material a emplearse como agregado fino en combinación al cemento UGC es inocuo con una seguridad razonable.

# 1. MARCO CONCEPTUAL

## 1.1. Antecedentes de la investigación

Realizadas con la investigación propuesta, existen investigaciones anteriores que sirvieron de base para diseñar este trabajo de investigación.

### 1.1.1. Caracterización fisicoquímica y planta, C. G. N.

Referente a la caracterización física y a la planta C. G. N. se tiene el trabajo de graduación *Evaluación de escoria de ferroníquel como agregado fino para morteros de albañilería y acabados* (Mariano Álvarez), en el cual se da una breve descripción del proceso de EXMIBAL en su primer año de operación; además, el trabajo da a conocer la definición de escoria y los distintos tipos de escoria que existen; también, menciona las viabilidades de la caracterización de la escoria de mata de níquel

Por otra parte, se presentan las propiedades de los morteros; se realiza una caracterización física y química preliminar de la escoria, utilizando normas de la ASTM (Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales).

Respecto a la caracterización física, se determinó la gravedad específica por el método ASTM C 128; se obtuvo la granulometría bajo el método ASTM C136; se determinó el peso unitario mediante el método ASTM C 29; se midió el porcentaje de absorción a través del método ASTM C 127; además, se verificó la presencia de materia orgánica mediante el método ASTM C 87 con el cual se

concluyó que la escoria estaba libre de materia orgánica; por último, se estableció el módulo de finura por medio del método ASTM C136.

Respecto a la caracterización química, el ensayo realizado fue la reacción potencial álcali-sílice por parte del Laboratorio Físicoquímico de Química Industrial del centro de investigaciones de la Facultad de Ingeniería, el cual fue hecho solo para una muestra aleatoria a través del método ASTM C 289; se concluye que la escoria de mata de níquel es un material inocuo, es decir, (según este trabajo de investigación) que no posee ningún material o sustancia que puede alterar la pasta de cemento. También, se realizó una caracterización química preliminar para una sola muestra aleatoria.

Por otra parte, se realizaron ensayos para morteros y prismas, por ejemplo, el ensayo de resistencia a compresión y tensión para morteros realizado con el método ASTM C 109.

### **1.1.2. Agregados finos**

Referente a agregados finos se tiene el trabajo de graduación *Evaluación de escoria de ferroníquel como agregado fino para concreto* (Mariano Álvarez). En este trabajo se realizaron pruebas semejantes a los estudios de morteros para albañilería y acabados, propios de los agregados finos. En este estudio se realizó la reactividad potencial álcali-sílice mediante el método químico acorde a la norma ASTM C 289, para la escoria de mata de níquel como agregado fino y el agregado grueso usado.

También, se realizaron ensayos fisicomecánicos propios del concreto, como los ensayos a compresión y pruebas a la abrasión.

### **1.1.3. Agregados para concreto**

Referente a los agregados para el concreto se tiene el trabajo de investigación *Estudios de calidad de agregados para concreto* (José Luna y Raúl Salguero), *aplicando las normas astm c 33, c 131, c 295 y c 289*, en el cual se analizó la calidad de los agregados que se utilizan para la fabricación de concreto utilizando las normas ASTM. Para determinar las propiedades físicas se aplicó la norma ASTM C 33, que indica los requisitos generales que debe llenar un agregado para fabricar concreto.

Las propiedades mecánicas se determinaron con la norma ASTM C 131, denominado ensayo por desgaste por la abrasión (lo cual se aplicó solo a agregados gruesos). Un tercer ensayo realizado es el de reactividad potencial a través de la norma ASTM C 289; por último, para conocer las características químicas y mineralógicas, se utilizó el examen petrográfico según la norma ASTM C 295.

Con los datos que proporcionaron los ensayos de laboratorio se determinó que los agregados de varios bancos no cumplen con los límites y requisitos que establecen las normas antes mencionadas; por lo cual, no es recomendable su utilización.

### **1.1.4. Estudios de barra de mortero**

Referente a estudios de barra de mortero se tiene el trabajo de investigación *Reevaluación de la norma de pruebas de barra de mortero y prismas de concreto para la reactividad álcali-agregado* (Grattan Bellew). Se presentan los ensayos de reactividad potencial realizados por el método barra de mortero y por el método prismas de concreto, para los cuales se tienen su

respectivas normas canadienses, en efecto estas son equivalentes a las normas ASTM C 227 & ASTM C 1293 respectivamente.

## **1.2. Justificación**

La investigación se hace necesaria ya que se pretende complementar los estudios efectuados de evaluación de escoria minera de mata de níquel proveniente de la planta de la Compañía Guatemalteca de Níquel (C. G. N.), como agregado fino para hormigón y mortero.

De tal forma que se quiere dar alcance con la contribución en el análisis, estructuración y divulgación de información que se encuentra existente en investigaciones anteriores para dar a conocer sucintamente a los diseñadores y encargados de proyectos, los motivos por los cuales se deben complementar los estudios de reactividad potencial álcali-sílice conseguidos por el método químico, con el método barra de mortero y evaluar paralelamente la resistencia a compresión mediante el ensayo de cubos de mortero.

De esta forma, se pueden mitigar daños que causarían las reacciones álcali-sílice en estructuras de hormigón o en morteros manufacturados con la escoria de mata de níquel y el impacto ambiental.

## **1.3. Determinación del problema**

### **1.3.1. Definición**

Se debe de tomar en cuenta que la escoria de mata de níquel no es un material proveniente de una fuente natural ya que se obtiene de un proceso de producción de níquel, por ello, la inclusión de este material como agregado fino



en concretos y morteros modifica sus características, dando campo a algunas consideraciones en los ensayos que comúnmente se hacen para la evaluación de las reacciones álcali-sílice y su elección.

El método químico de reactividad potencial álcali-sílice propicia de manera rápida, si un material a emplearse como agregado es deletéreo (perjudicial, agregado reactivo o nocivo) o inocuo al cemento Portland, ya que este reúne las apariencias de la reacción álcali-sílice de un modo acelerado que propicia las condiciones para que se de esta situación. Por tal motivo es que se pueden alcanzar resultados dudosos, y en mayor medida cuando se trata de la evaluación de una escoria de mata de níquel y no de agregados finos de origen geológico.

### **1.3.2. Delimitación**

Lo que se pretende resolver será única y exclusivamente para la escoria de mata de níquel proveniente del vertedero de la Compañía de Guatemalteca de Níquel (el Estor, Izabal, Guatemala, Centro América) y excluye a todas aquellas escorias de mata de níquel provenientes de otras plantas; también, a escorias que surgen de otros procesos de producción distintos al de níquel (por ejemplo, las escorias que se obtienen en el proceso de producción de oro o escorias siderúrgicas), porque no tienen la misma composición química en comparación a la escoria de mata de níquel que proviene de C. G. N.

En este caso, se pretende realizar una investigación de dicho material y evaluar la repuesta utilizando el método de barra de mortero para determinar reactividad potencial álcali-sílice y la resistencia a compresión mecánica mediante el ensayo de cubos de mortero. En las dos pruebas se elaborarán

barras y cubos de mortero a distintas concentraciones de escoria de mata de níquel.

En forma contraria al método químico (reactividad potencial álcali-sílice), el método barra de mortero provee información de una manera lenta si un material a usarse como agregado es deletéreo (perjudicial, agregado reactivo o nocivo) o inocuo al cemento UGC, ya que se evalúa la reacción álcali-sílice en forma fisicomecánica (en función de la observación y medición de las expansiones de la barra mortero respecto del tiempo); por ende, este método de barra de mortero es más fiable que el método químico. Esto se debe a que el método de barra de mortero representa la reacción álcali-sílice de modo natural como ocurriría en la práctica en función del tiempo.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Agregados

Estos deben estar en concordancia con la especificación ASTM C 33, que rige las normativas para dichos materiales. Esta especificación define los requerimientos de gradación (*grading*) y calidad de agregados finos y gruesos (que no sean agregados livianos o pesados) para utilizarse en concreto. Esta especificación es para el uso de un contratista, proveedor de concreto u otro comprador como parte del documento de compra que describe el material que se proporcione.

Esta especificación, también, se usa en especificaciones de proyectos para definir la calidad del agregado, la medida máxima nominal del agregado y otros requerimientos de clasificación específicos:

Aquellos responsables para seleccionar las proporciones para la mezcla de concreto deben tener la responsabilidad de determinar las proporciones de agregados finos y gruesos y la adición de mezclas de medidas de agregados si se requieren o se aprueban.

Los términos usados en esta norma aparecen definidos en la terminología ASTM C 125.

### 2.1.1. Agregado fino

El agregado fino consiste de arena natural, arena manufacturada o combinación de ambas, que al momento de realizar el análisis de tamices, pasa el tamiz de 9,5 mm, casi completamente el tamiz núm. 4 (4,75 mm) y es predominantemente retenido en el tamiz núm. 200 (0,075 mm), o sea que a través de este último tamiz casi no pasa. Esto se puede apreciar de una mejor manera consultando el apartado gradación (*grading*) para agregados finos de la norma ASTM C 33 o viendo la tabla I. También, se puede representar en forma gráfica mediante la curva granulométrica de agregado fino como se muestra en la figura 2.

Tabla I. Gradación de agregados finos

Tamiz (especificación ASTM E11)	Porcentaje que pasa
9,5 mm (3/8 in)	100
4,75 mm (Núm. 4)	95 a 100
2,36 mm (Núm. 8)	80 a 100
1,18 mm (Núm.16)	50 a 85
600 µm (Núm. 30)	25 a 60
300 µm (Núm. 50)	5 a 30
150 µm (Núm. 100)	0 a 10

Fuente: Incotec. *Especificaciones de los agregados para concreto*. p. 85.

La arena natural consistirá de arena de río, arena de mar o arena de tajo. La arena manufacturada consistirá de polvo de piedra en su condición natural o lavado que se ajusta a los requisitos de calidad especificados.

El agregado fino no debe pasar más que el 45 % en cualquier tamiz y retenido en el siguiente tamiz consecutivo de los que se muestran en la tabla I anteriormente descrita y su módulo de finura no debe ser menos que 2,3 ni más que 3,1.

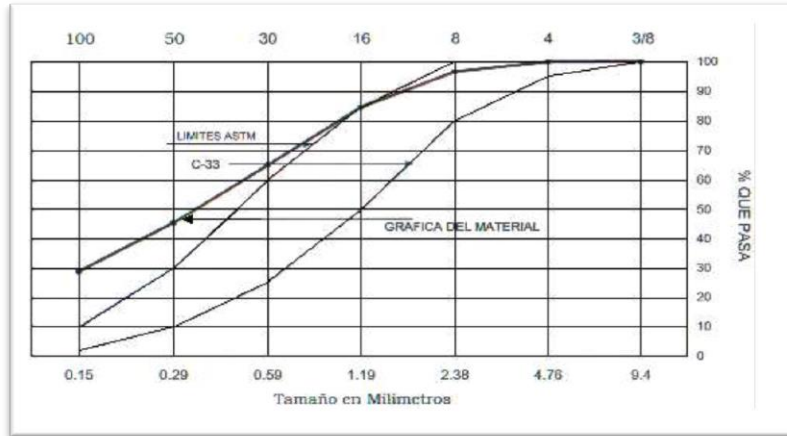
Agregados finos que no cumplan estos requerimientos de gradación (*grading*) deberán cumplir los requerimientos de esta sección siempre que el proveedor pueda demostrar al comprador o especificador que el concreto de la clase especificada, hecho con agregado fino bajo estudio, tendrá propiedades correspondientes al menos iguales a la de los hormigones elaborados con los mismos ingredientes, con excepción de que el agregado fino de referencia debe ser seleccionado de una fuente con un record de rendimiento aceptable en concreto de construcción similar.

Figura 1. **Agregado fino (árido de origen pétreo)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Curva granulométrica de agregado fino**



Fuente: *Estudios de calidad de agregado para concreto aplicando las normas astm c-33, c-131, c-295 y c-289 (presentación de casos).* p 85.

El agregado fino para el uso en el concreto que estará sujeto a la humedad, la exposición prolongada a la atmósfera húmeda o contacto con el suelo húmedo, no deberá contener ningún material perjudicialmente reactivo (deleteramente reactivo) con los álcalis en el cemento en una cantidad suficiente para causar expansión excesiva del concreto o del mortero, salvo que si estos materiales están presentes en cantidades perjudiciales; el uso del agregado fino no está prohibido cuando se utiliza un cemento que contenga menos de 0,60 % de álcalis calculados como óxido de sodio equivalente ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$ ) o con la adición de un material que se ha demostrado para prevenir expansión perjudicial debido a la reacción álcali-agregado.

### 2.1.2. **Agregado grueso**

El agregado grueso consistirá de grava, piedra o grava quebrada (triturada) escoria de alto horno refrigerado por aire o concreto de cemento

hidráulico triturado, o una mezcla de los materiales anteriores, conforme a los requerimientos de la especificación ASTM C 33. Este agregado es retenido casi en su totalidad en el tamiz núm. 4 (4,75 mm) al momento de realizar el análisis de tamices. Para una mejor apreciación de la clasificación del agregado grueso se puede ver la tabla 2 de la norma ASTM C 33 (o su homóloga, la norma técnica colombiana NTC 174) con nombre: *Requerimientos de Gradación para Agregados Gruesos (Grading Requirements for Coarse Aggregates)* (7).

Figura 3. **Agregado grueso (piedrín, árido, de origen pétreo)**



Fuente: elaboración propia.

Aunque el concreto de cemento hidráulico triturado se ha utilizado como un agregado con resultados satisfactorios reportados, su uso puede requerir de algunas precauciones adicionales. Prescripciones en mezclado de agua pueden



ser aumentadas debido dureza del agregado. Hormigón parcialmente deteriorado, utilizado como agregado, puede reducir la resistencia a congelación/descongelación, afectar las propiedades del vacío de aire o degradar durante la manipulación, mezcla o colocación.

Figura 4. **Agregado grueso (hormigón triturado, árido, de origen residual)**



Fuente: elaboración propia.

El hormigón triturado puede tener constituyentes que pueden ser susceptibles a la reactividad álcali-agregado o al ataque de sulfatos en el concreto nuevo o puede llevar sulfatos, cloruros o material orgánico al concreto nuevo en su estructura porosa.



La especificación del agregado debe designar la clase de agregado grueso que se utiliza en el trabajo basado en la gravedad del desgaste, abrasión y otros factores de exposición. Los límites de agregado grueso correspondientes a cada denominación de clase se esperan para garantizar rendimiento satisfactorio en el concreto para el tipo respectivo y la ubicación de la construcción.

Seleccionando una clase con límites excesivamente restrictivos puede dar lugar gastos innecesarios si los materiales que cumplan dichos requerimientos no están disponibles a nivel local. Seleccionando una clase con los límites de indulgencia puede resultar en un desempeño insatisfactorio y el deterioro prematuro del hormigón.

Mientras que en diferentes partes de una sola estructura puede que sean adecuadamente elaborados con diferentes clases de agregados gruesos; el diseñador (especificador) puede tomar la decisión de los áridos gruesos para todo el concreto, para ajustarse (conformarse) a la misma clase restrictiva para reducir la posibilidad de suministro de concreto con la clase incorrecta de árido, especialmente en proyectos más pequeños.

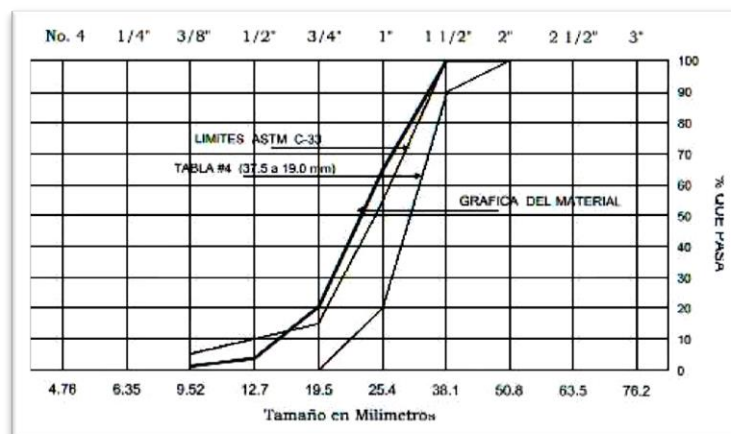
El agregado grueso para utilizarse en el concreto que estará sujeto a la humedad, exposición prolongada a la atmósfera húmeda o contacto con el suelo húmedo, no deberá contener ningún material que sea perjudicialmente reactivo (deletéreamente reactivo) con los álcalis en el cemento en una cantidad suficiente para provocar la expansión excesiva del concreto o del mortero, salvo que si tales materiales están presentes en cantidades perjudiciales, el agregado grueso no está prohibido cuando se utiliza con un cemento que contenga menos de 0,60 % de álcalis calculados como óxido de sodio equivalente ( $\text{Na}_2\text{O}$ )

+ 0,658 K<sub>2</sub>O) o con la adición de un material que ha sido demostrado para prevenir la expansión perjudicial debido a la reacción álcali-agregado.

### 2.1.3. Módulo de finura

El módulo de finura es un factor que se obtiene mediante la suma de los porcentajes totales de material en la muestra que es más grueso que cada uno de los siguientes tamices de retenido acumulados en los tamices (porcentajes acumulados retenidos): Números. 100, 50, 30, 16, 8, 4, 9, 5 mm, 19,0 mm, y 37,5 mm, y dividiendo la suma entre 100 y más grande incrementando en una proporción de 2 a 1. Esto se calcula acorde a la norma ASTM C 136. Tal norma cubre la determinación de la distribución del tamaño de partícula de agregados finos y gruesos por medio de tamizado. La distribución para agregado grueso se puede apreciar en forma gráfica mediante la curva granulométrica de agregado grueso, como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Curva granulométrica de agregado grueso



Fuente: *Estudios de calidad de agregado para concreto aplicando las normas astm c-33, c-131, c-295 y c-289 (presentación de casos)*. p 85.

#### **2.1.4. Otras consideraciones**

Las definiciones y la terminología de los demás términos utilizados en este apartado se encuentran en la norma ASTM C 125 (definiciones y términos referentes a concreto y agregados para concreto). También, existe una nomenclatura descriptiva para los constituyentes de agregados para concreto, esta se encuentra descrita en la norma ASTM C 294. Además, existe una normativa para muestrear agregados y esta es la práctica ASTM D 75. Otra norma que puede ayudar para el muestreo es la práctica ASTM C 702 & ASTM D 3665.

#### **2.1.5. Estudios de calidad para agregados del concreto**

La mayor parte de construcciones civiles en Guatemala usan el concreto como parte fundamental. Para producir un buen concreto estructural es necesario una buena calidad de agregados. Usualmente, se aplican las normas relacionadas con análisis físicos y mecánicos (ASTM C 33 y C 131), eventualmente, se aplica norma ASTM C 289 (reactividad potencial) y en muy pocas los exámenes petrográficos (ASTM C 295). Para ampliar más acerca de la especificación de los agregados ver norma *ASTM C 33 Especificación normalizada de agregados para concreto (Standard specification for concrete aggregates)*.

#### **2.2. Escoria de mata de níquel y proceso minero**

La escoria de mata de níquel es un producto residual impuro de desecho conformado por hierro, magnesio, silicio, aluminio y magnesio, que aparece en el proceso de producción de la combinación de hierro y níquel de tal manera

que al fundirse como metal se desecha una escoria granulada, en efecto, esta es la escoria de mata de níquel.

Figura 6. **Escoria de mata de níquel (después de la gradación)**



Fuente: elaboración propia.

La escoria de mata de níquel es un producto residual de mineral fundido para purificar metales. A temperaturas elevadas, las impurezas del metal se desligan del metal fundido y se remueve para conformar una mezcla de óxidos de metal. Las propiedades fisicoquímicas de la escoria de mata de níquel dependen de la mineralogía del mineral alimentado y del proceso de fundición.

Figura 7. **Escoria de mata de níquel (posterior a gradación)**



Fuente: elaboración propia.

Las fuentes de mineral que se encuentra en la planta de C. G. N. son de limonita y saprolita. En la siguiente tabla se muestra información considerable de la fuente de mineral con la que cuenta C. G. N. en la actualidad.

Tabla II. **Reclasificados históricos de los recursos minerales**

<b>Recursos</b>	<b>Millones de toneladas</b>	<b>% de níquel</b>
<i>Saprolita</i>		
Medido	14,3	1,91
Demostrado	<u>48,3</u>	<u>1,82</u>
Medido & Demostrado	62,6	1,84
Deducido	57,5	1,68
<i>Limonita</i>		
Deducido	29,4	1,31

Fuente: elaboración propia.

Sobre el proceso minero del cual proviene la escoria de mata de níquel, en este documento se hace un breve reseña y se hace referencia a la parte del proceso, donde se forma la escoria como producto residual final.

Tal proceso, en términos prácticos, se puede resumir en las siguientes etapas descritas a continuación; siempre resaltando que se refiere al proceso en el primer año de operación de la planta donde se originó la escoria de mata de níquel:

- Preparación del mineral
- Reducción del mineral
- Fundición del mineral
- Conversión de mata de níquel
- Granulación del producto

El término mata de níquel se refiere al producto final del proceso, el producto deseado para la venta; el término escoria (o escoria de mata de níquel) se refiere al producto residual del proceso.

### **2.2.1. Preparación del mineral**

En esta etapa el mineral proveniente de la cantera era triturado, apilado, secado, tamizado, mezclado y almacenado bajo techo.

### **2.2.2. Reducción del mineral**

En esta etapa, el mineral parcialmente seco se terminaba de secar, luego se reducía y se le agregaba azufre. Un cargador frontal extraía el mineral parcialmente seco del área de almacenamiento de mineral seco y se

descargaba sobre una tolva, luego por medio de una banda transportadora se llevaba hacia la tolva alimentadora del horno. De esta tolva, el material se extraía por un alimentador de banda por peso y se transportaba al horno rotativo por medio de un transportador de bandas. El alimentador por peso regulaba la alimentación al horno.

El mineral seco era tratado por un proceso que se conoce como proceso de reducción selectivo de lateritas.

Además del secado del mineral y de la reducción de óxidos de níquel y de hierro, el proceso del horno, también, sulfura el mineral.

### **2.2.3. Fundición del mineral**

En esta etapa del proceso el mineral caliente reducido y sulfurado se fundía en un fundidor eléctrico. La calcina del horno se descargaba a una tolva de alimentación reguladora. De la tolva reguladora, el mineral se descargaba a unos contenedores de transferencia, a los que a su vez se cargaban nueve tolvas de alimentación de fundidor que se ubicaban sobre el fundidor eléctrico.

Cada tolva de alimentación descargaba calcina por gravedad hacia tres tubos cargadores.

Los tubos cargadores ingresaban al fundidor eléctrico en el techo y se ubicaban en el horno para obtener una óptima distribución de la calcina. Los contenedores de transferencia eran trasladados por un carro de dos contenedores y un sistema de grúa para la calcina, entrelazado y operado automáticamente con características para operarse manualmente sustituyendo la función automática.

La calcina caliente se alimentaba por estrangulación a través de los tubos de carga al fundidor eléctrico. En el fundidor eléctrico, la calcina se fundía por contacto con la capa de escoria líquida en la cual se generaba calor entre los electrodos y la escoria al principio de la resistencia de calentamiento.

Luego, se producía la separación de fases entre la escoria derretida y la mata derretida. La mata derretida era una solución de hierro metálico y sulfuro de níquel, ambas sustancias se producían durante la reducción y la sulfuración en el horno reductor. El sulfuro de níquel es más soluble en el hierro fundido que en la escoria fundida. Como resultado, la mayoría del níquel se concentraba en la fase derretida de hierro.

Además de actuar como medio de transporte para níquel, el hierro derretido hacia la mata del horno es bastante densa en relación a la escoria derretida. Debido a esta gran diferencia en densidad se alcanza una buena separación de fases. La mata del horno se asentaba en el fondo del fundidor y la escoria flotaba hacia arriba.

Sobre la escoria se encontraba la capa de calcina alimentada por estrangulamiento. A medida que esta capa se fundía lentamente, se renovaba por calcina adicional. La capa de calcina sólida servía como una capa aisladora sobre la escoria derretida y mantenía las temperaturas del techo del fundidor a un mínimo.

Los electrodos operaban sumergidos en la capa de escoria derretida. El calor que se requería para la fundición se generaba entre los electrodos y la escoria en el principio de la resistencia de calentamiento.



El fundidor estaba provisto de dos agujeros en la salida a la altura del fogón que se utilizaba para la extracción de mata y dos agujeros de salida en un nivel más alto para la extracción de escoria. El escurrimiento de escoria era una operación casi continua y se evacuaban los óxidos de hierro, silicio y magnesio.

La escoria derretida se granulaba y se solidificaba mediante impacto con una corriente de agua. Los gránulos de escoria solían ser arrastrados por un flujo de agua a unas fosas grandes de filtración de escoria. En estas fosas, el agua se filtra separándose de la escoria granulada por medio de lechos de arena y grava. La mayor parte de agua filtrada se circulaba para una granulación adicional de escoria.

Para remover la escoria de las fosas y cargarla a los camiones para deposición, se utilizaba una cuchara almeja que se operaba desde una grúa aérea. La escoria se cargaba a camiones que la llevaban al depósito de escoria al oeste de la planta.

#### **2.2.4. Conversión de mata de níquel**

En la operación del primer proceso de la planta, para esta etapa, la conversión utilizada era un proceso tipo por lotes continuos, en el cual la mata del fundidor eléctrico se cargaba a intervalos. Entre intervalos de carga de mata, el hierro se oxidaba por medio de varios ciclos de soplado.

Después de un período de soplado de 20 minutos, el convertidor se rotaba y la escoria que se había formado se desnataba hacia un cucharón de escoria. El ciclo de soplado se repetía cuatro veces por cada carga de mata al fundidor. En la forma que el proceso seguía, la concentración de níquel de la

mata del convertidor se incrementaba a 75 % en peso. Con la eliminación de casi todo el hierro, la concentración de azufre se incrementa a 25 % en peso.

La escoria que se desnataba después de cada soplado, se descargaba ya sea hacia la fosa con escoria con baja concentración de níquel o la de alta concentración de níquel que se enfriaba en forma final con rocío de agua.

La escoria con alto contenido de níquel se formaba al final de la conversión de cada lote. Después del enfriamiento, la escoria se desgarraba (araba) y se cargaba en camiones. La escoria con bajo contenido de níquel se desechaba cerca del sitio de la planta y la escoria con alto contenido de níquel se trituraba para su reproceso en convertidores.

La adición de escoria con alto contenido de níquel a los convertidores además de incrementar la recuperación de níquel, también, contribuía a enfriar el lote el que incrementa la temperatura durante la oxidación del hierro debido al calor exotérmico de la conversión.

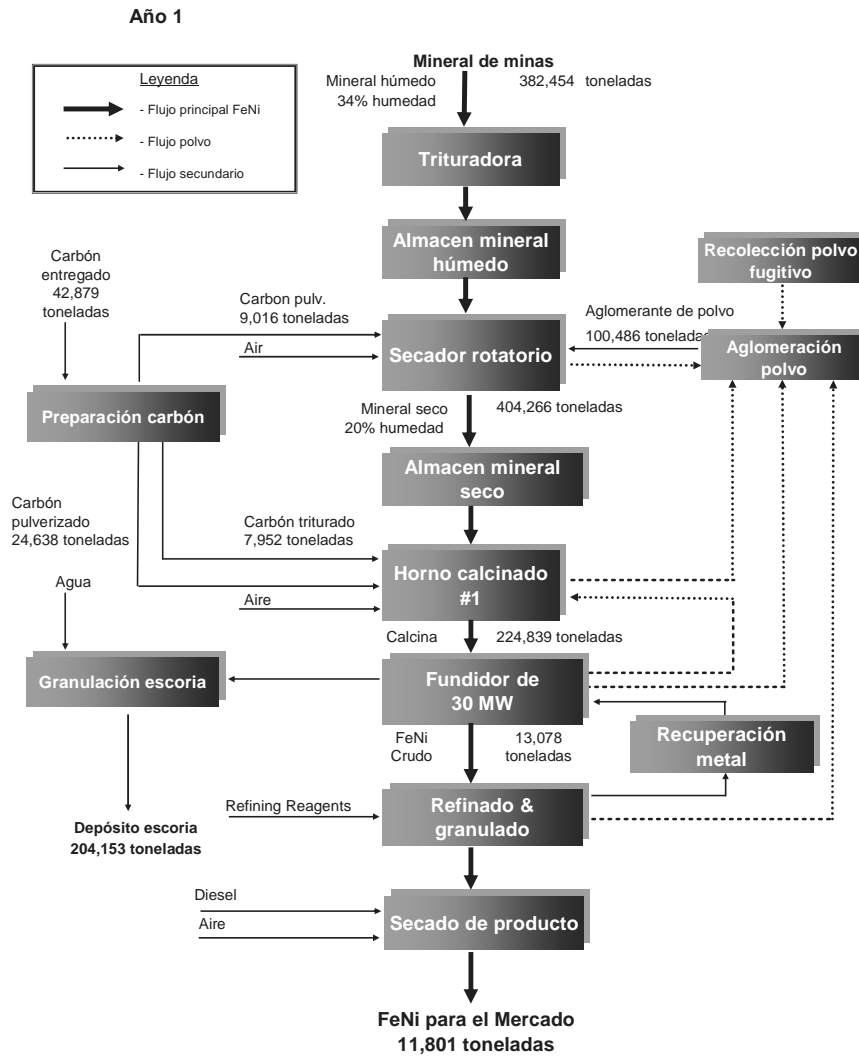
### **2.2.5. Granulación del producto**

En esta etapa del proceso, la mata fundida del convertidor se granulaba y se solidificaba, se secaba y se empacaba para transporte. La mata derretida del convertidor se transfería en cucharas a la plataforma basculante de cucharas operada hidráulicamente. Estos gránulos se separaban de la corriente de agua en un clasificador de espiral. Los gránulos del clasificador se transferían a la tolva de alimentación del secador utilizando un contenedor de transferencia y un montacargas. Los gránulos húmedos se evacuaban de la tolva por medio de un pequeño alimentador de peso el que descartaba hacia un secador concurrente rotatorio pequeño.

Ya en el secador, se eliminaba la humedad de proceso de granulación, dejando un producto de sulfuro de níquel que fluía relativamente libre, ya seco y granulado. Este producto de descarga del secador se trasportaba a un elevador tipo cubeta por medio de un alimentador vibratorio de donde se descargaba sobre una criba vibratoria de trampa. La criba separaba el producto en la malla diez. El producto que sobrepasaba el tamaño se regresaba al convertidor para reprocesarse. Las gotas de tamaño reducido del tamiz iban hacia la tolva almacenadora.

Los gránulos se transportaban desde la tolva almacenadora a un elevador de cubeta el cual descargaba hacia la tolva por lotes. El contenido de la tolva por lotes se transfería por medio de un trasportador replegable a un contenedor de barco cargado sobre un camión de plataforma plana. Los contenedores se trasportaban al puerto para su embarque. En la siguiente figura se puede esquematizar el proceso anteriormente descrito:

Figura 8. Diagrama de flujo del proceso para el primer año de operación



Fuente: SAMAYOA, Eber. *Evaluación de la escoria de ferróníquel para morteros de albañilería y acabados.* p. 120.

### 2.3. Examen petrográfico de los agregados

Los procedimientos que se siguen en el análisis petrográfico de agregados dependen del uso que se le quiera dar a dicho agregado. En ocasiones, la petrografía no basta para hacer el estudio y es necesario complementarlo con procedimientos como difracción de rayos X (entre otros).

Figura 9. **Equipo de fluorescencia de rayos X**



Fuente: elaboración propia.

Este permite clasificaciones más seguras de minerales poco comunes y arcillas. La determinación de constituyentes no es el fin último del análisis petrográfico, pero si permite efectuar muchas conclusiones importantes a nivel práctico.

Lo más importante es determinar si hay componentes que puedan efectuar el comportamiento de un agregado en una aplicación específica, por ejemplo, determinar y cuantificar los componentes reactivos potenciales de álcali sílice y álcali carbonato y recomendar ensayos que confirmen o no la reacción.

El examen petrográfico se hace acorde a la guía ASTM C 295, tal guía describe los procedimientos para los exámenes petrográficos de muestras representativas de materiales propuestos para utilizarse como agregados en mezclas de cemento o como materia prima para utilizarse en la producción de tales agregados.

Esta guía (ASTM C 295), también, describe el grado en que las técnicas petrográficas se deben utilizar, la selección de propiedades que se deben buscar y la manera en que estas técnicas pueden ser empleadas en el análisis de muestras de áridos para concreto.

Deben ser utilizados los nombres de rocas y minerales dados en la nomenclatura descriptiva ASTM C 294, en la medida en que se proceda, en los informes preparados de acuerdo con esta guía (ASTM C 295) (9).

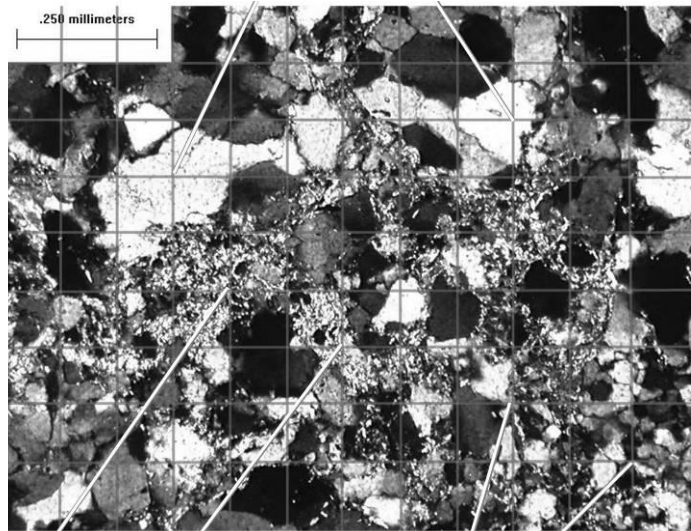
Los exámenes petrográficos se realizan para los siguientes propósitos:

- Determinar las características físicas y químicas de los materiales que se pueden observar por métodos petrográficos y que inciden en el rendimiento del material en su uso previsto.
- Describir y clasificar los constituyentes de la muestra.

- Determinar las cantidades relativas de los constituyentes de la muestra que son esenciales para una adecuada evaluación de la muestra cuando los constituyentes difieren significativamente en propiedades que tienen relación en el rendimiento del material en su empleo previsto.
- Comparar muestras de agregados de nuevas fuentes con muestras de agregados de una o más fuentes para que los datos de prueba o los registros de rendimiento estén disponibles.

También, se pueden utilizar para determinar las proporciones de partículas cúbicas, esféricas, elipsoidales, piramidales, tabulares, planas y alargadas en una muestra o muestras de agregados. Partículas planas, alargadas y delgadas como chip en áridos incrementan el agua de mezclado y, por lo tanto, disminuyen la resistencia del hormigón. Este examen debe identificar y llamar la atención sobre potenciales constituyentes reactivos álcali-sílice y álcali-carbonato y recomendar pruebas adicionales para confirmar o descartar la presencia de cantidades insignificantes de constituyentes de agregado, capaces de provocar una reacción álcali en el concreto.

Figura 10. **Examen petrográfico para la identificación de diferentes tipos de cuarzo (promotor de RAS)**



Fuente: VELASCO, Alejandro; GARCÍA, Manuel; SORIANO, Jorge. *Aplicación de técnicas microscópicas en el estudio de la reactividad potencial de los áridos*. p. 125.

Además, puede ser dirigido específicamente a la posible presencia de contaminantes en agregados: vidrio sintético, escorias, *clinker*, carbón o ceniza, óxido de magnesio, óxido de calcio, o ambos, yeso, tierra, hidrocarburos y productos químicos que puedan afectar el comportamiento del fraguado del concreto o propiedades del agregado, excremento de animales, plantas o vegetación podrida y cualquier otro contaminante que puede resultar indeseable en el concreto.

En resumen, los procedimientos específicos empleados en el examen petrográfico de cualquier muestra dependerán en gran medida en la finalidad del examen y la naturaleza de la muestra. En la mayoría de los casos, el examen requerirá la utilización de la microscopía óptica.



Los exámenes petrográficos completos para fines particulares y para investigar problemas particulares pueden requerir un examen de los agregados o de los constituyentes seleccionados por medio de procedimientos adicionales como análisis de difracción de rayos X (XRD), análisis térmico diferencial (DTA), espectroscopia de infrarrojo u otros análisis como microscopía electrónica de barrido (SEM) y energía dispersiva de rayos X (EDX). En algunas instancias, tales procedimientos son más rápidos y más definitivos que los métodos microscópicos.

La identificación de componentes de una muestra suele ser un paso necesario hacia el reconocimiento de las propiedades que se pueden esperar que influyan en el comportamiento del material en uso previsto, pero no es su fin en sí mismo. El valor de cualquier examen petrográfico dependerá en gran medida de la representatividad de muestras examinadas, la integridad y exactitud de la información proporcionada para el petrógrafo sobre el origen (fuente) y el uso propuesto del material y la capacidad del petrógrafo para correlacionar estos datos con los resultados del examen.

## **2.4. Reactividad potencial álcali-sílice**

### **2.4.1. Significado de RAS**

La reacción álcali-sílice (RAS) involucra reacciones químicas entre los áridos reactivos y los álcalis contenidos en el concreto que ocasionan un incremento de volumen e inducen a la fisuración temprana lo cual puede causar la pérdida de la prestación de servicio de las estructuras afectadas.

Figura 11. **Concreto fisurado debido a la reactividad potencial álcali-sílice (superficie)**



Fuente: KOSMATKA, Sergio; KERKHOFF, Bran; PANARESE Well. *Aggregates for Concrete Portland cement association. Design and Control of Concrete.* p. 100.

Figura 12. **Concreto fisurado debido a la reactividad potencial álcali-sílice (fondo)**



Fuente: KOSMATKA, Sergio; KERKHOFF, Bran; PANARESE Well. *Aggregates for Concrete Portland cement association. Design and Control of Concrete.* p. 100.

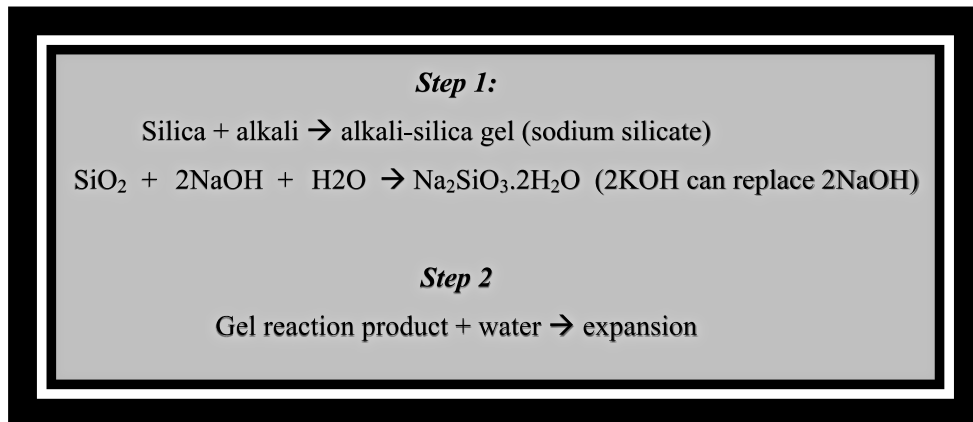
### 2.4.2. ¿Cómo se dan las RAS?

El concreto endurecido contiene una red de poros (capilares) con una solución alcalina (pH > 12,5) compuesta por hidróxidos de sodio y potasio derivados de los álcalis del cemento.

Cuando el sílice de los áridos es pobremente cristalino puede reaccionar con otros compuestos del concreto. Las probabilidades de combinación son mayores a mayor solubilidad del sílice y, al mismo tiempo, la solubilidad (capacidad de disolverse) incrementa a mayor pH de la solución de poros.

En general, la reacción álcali-sílice (RAS), puede ser vista como un proceso de dos pasos como se muestra en la siguiente figura:

Figura 13. **Proceso general de RAS**



Fuente: TOUMA, Wissam Elias. *Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*. Co-Supervisor. p. 135.

La reacción álcali-sílice se da entre los iones hidroxilos de los hidróxidos de sodio y potasio presentes en el cemento (a veces, a través del suelos o agua

que están en contacto) y los constituyentes silíceos reactivos de los áridos. Cuando se encuentran presentes iones hidroxilos, estos quiebran la estructura del sílice de los áridos, después, la diferencia de carga da lugar a la adsorción de los iones alcalinos, dando lugar a la formación de un gel de sílice alcalino, también, denominado gel de RAS (que tiene constitución semejante a la de los silicatos de sodio y potasio), expansivo al absorber agua en presencia de calcio

Este gel se puede encontrar en una pequeña o gran cantidad en áridos, vacíos, fisuras y en la superficie del concreto.

#### **2.4.2.1. La acción del sílice**

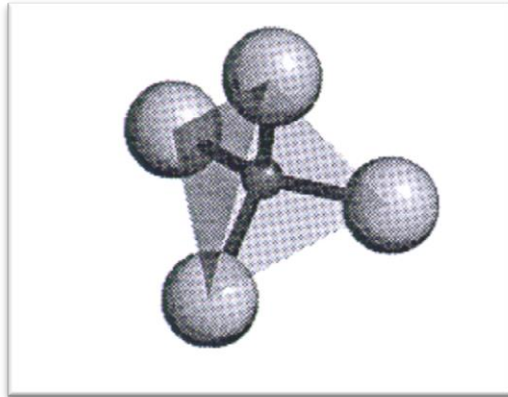
Varias formas de óxido de sílice o silicio tetraédrico se pueden encontrar en los agregados naturales.

El silicio tetraédrico se muestra en la figura 14, donde  $Si^{4+}$  ocupa el centro de la estructura y cuatro iones oxígeno ( $O^{2-}$ ), unidos a  $Si^{4+}$ , ocupando las esquinas.

Una estructura cristalina de silicato que se forma por la repetición del tetraedro de silicio orientado en un espacio tridimensional, es un ejemplo de sílice cristalina completamente donde están vinculados los diferentes tetraedros por iones de oxígeno.

Cada ion oxígeno está unido a dos silicios en orden para lograr neutralidad eléctrica.

Figura 14. **Silicio tetraédrico (sílice, SiO<sub>2</sub>)**

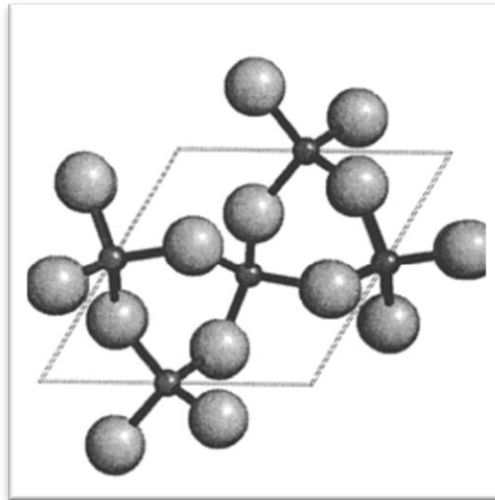


Fuente: TOUMA, Wissam Elias. *Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*. Co-Supervisor. p. 135.

En la figura 15 se muestra la estructura del cuarzo. Un tetraedro completo no puede formarse en la superficie de una estructura cristalina. Las uniones entre oxígeno y silicio que están rotas en la superficie resultan de cargas negativas que están insatisfechas.

Tales estructuras son química y mecánicamente estables, impermeables, y solo reaccionan en la superficie. Silicatos amorfos (no cristalinos), también, son formados por una combinación de sílice tetraédrico, con la excepción de que el tetraedro está arreglado en una red aleatoria tridimensional sin formar una estructura rectangular.

Figura 15. **Estructura del cuarzo (estructura cristalina, SiO<sub>2</sub>)**



Fuente: TOUMA, Wissam Elias. *Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*. Co-Supervisor. p. 135.

En consecuencia, el sílice amorfo es más poroso; tiene una gran área superficial, y como consecuencia, es muy reactivo. Entre más amorfo es el sílice, más reactivo se vuelve. Ciertos agregados volcánicos, por ejemplo, que contienen materiales vidriosos formados por el rápido enfriamiento de sílice derretido que les impide cristalizar y los hace muy reactivos.

En adición al grado de cristalización de sílice, la cantidad de energía almacenada en la estructura cristalina, también, afecta la reactividad de un agregado. Algunas estructuras pueden contener grandes cantidades de energía de deformación causada por calor y presión usualmente llamadas estructuras deformadas. Los agregados que contienen este tipo de sílice es probable que sean susceptibles a reacciones deletéreas álcali-sílice. Sin embargo, la velocidad de reacción es mucho más lenta que de los agregados que contienen

sílice amorfo. Agregados metamórficos que contienen cuarzo deformado son un ejemplo de tales agregados.

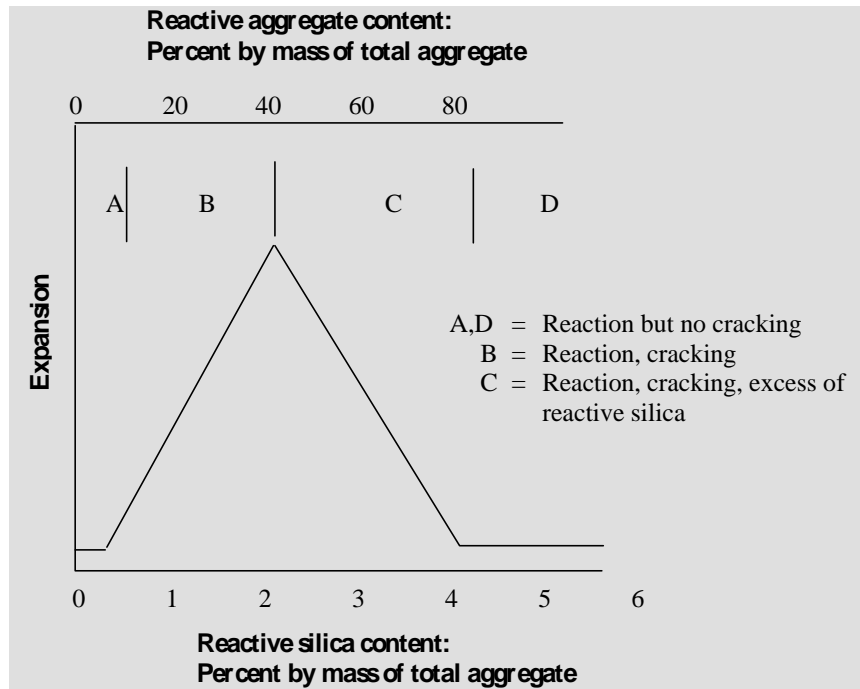
Algunos agregados contienen sílice cristalino formados por cristales muy finos con áreas superficiales muy grandes. Estos tipos de agregados, tal como sílex (pizarra, esquisto), son propensos a RAS. La cantidad de sílice contenida en los agregados, también, afecta su reactividad como se muestra en la figura 16. Hay una máxima cantidad de sílice más allá de la cual la reacción no tiene lugar. Esta es llamada el efecto pésimo. Agregados que contienen las cantidades siguientes de sílice son susceptibles a RAS (tabla III).

Tabla III. **Agregados que contienen cantidades de sílice susceptibles a RAS**

<b>Componente silíceo reactivo presente en agregado</b>	<b>Cantidad</b>
Ópalo	>5 %
Sílex y calcedonia	>3 %
Cuarzo deformado o microcristalino (por ejemplo: granitos, argelinas, filitas, limonitas, y arenas naturales y gravas)	>5 %
Vidrios volcánicos naturales	>5 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Efecto de contenido de sílice en RAS (efecto pésimo)



Fuente: TOUMA, Wissam Elias. *Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*. Co-Supervisor. p. 135.

#### 2.4.2.2. La acción del álcali

Dependiendo del tipo de contenido de sílice reactivo en agregados, la reacción Álcali-Sílice puede ser dividida en dos grupos.



**2.4.2.2.1. Grupo A: reacción álcali-sílice**  
**Ocurre con minerales de sílice amorfos (poco cristalinos) y vidrios volcánicos o artificiales**

Álcalis tales como el sodio ( $\text{Na}^+$ ) y el potasio ( $\text{K}^+$ ) presentes en la pasta de concreto romperán las uniones sílice-oxígeno, abriendo la estructura de cristal para álcalis y agua. El resultado es un silicato de sodio hidratado ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que es muy higroscópico (delicuescente), capaz de absorber grandes cantidades de agua, de esto resultan sucesivamente presiones de hinchamiento que, si son mayores que la resistencia a tensión del concreto, causarán fisuración.

Las fisuras (grietas, rajaduras) permitirán la penetración de agua adicional que causa que las presiones de hinchamiento incrementen. Este tipo de reacción es bastante rápido y puede causar agrietamiento dentro de unos pocos años.

**2.4.2.2.2. Grupo B: reacción álcali-sílice que ocurre con diversas variedades de cuarzo tales como cuarzo deformado y fracturado**

Los agregados en este grupo contienen moderadamente sílice reactivo o contienen una pequeña cantidad de sílice. Desde que la sílice reactiva de estos agregados es localizada en la superficie, el resultante producto gel es más estable debido a la presencia de grandes cantidades de hidróxido de calcio en

la interface entre el agregado y la pasta. Los agregados porosos son una excepción, porque los álcalis penetrarán los agregados causando un gel menos estable para formar lejos de la interface y el hidróxido de calcio.

Este proceso causará el reblandecimiento (debilitamiento) de los agregados. Los efectos perjudiciales de esta reacción en el concreto son un proceso lento y menos evidente que los efectos del grupo A (relativamente).

Cuanto mayor sea la concentración de álcalis sodio y potasio en el hormigón, mayor será la concentración de iones hidroxilo (a mayor pH), y a su vez, más pronto reaccionará el sílice con los iones hidroxilo. Si todos los ingredientes para esta reacción están presentes en concreto fresco, entonces, el gel puede a menudo ser detectado en la interface entre el agregado y la pasta de cemento.

Las grietas empezarán a propagarse desde las partículas de agregado. Sin embargo, si los álcalis son previstos desde una fuente exterior tal como sales de deshielo, agua de mar, y soluciones industriales que las reacciones propagarán desde las caras expuestas al interior del hormigón.

### **2.4.2.3. La acción del calcio**

El calcio no interviene al inicio de la reacción, pero su presencia es determinante para que el producto de la reacción sea o no expansivo. Una baja cantidad de hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) produce el gel de RAS alcalino pero no expansivo, pero cuando se encuentra suficiente cantidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  se forma un producto expansivo.

Por otra parte, da basicidad a la solución que se encuentra en los poros, por lo que incrementa la solubilidad del sílice. También, la concentración de calcio controla la rapidez de difusión del sílice; altas concentraciones de calcio cohiben la migración del sílice y esto da como resultado la expansión.

Además, cuando se encuentra presente el calcio cambia las propiedades del gel, como la viscosidad, en presencia de poca concentración de calcio (tal caso de los concretos con material puzolánico) se produce un gel más fluido, el cual circula por los poros sin generar elevada presión, evitando el incremento de volumen y los daños.

### **2.4.3. Clasificación de las RAS**

Dependiendo del estado y la forma en que esté presente el sílice reactivo (sílice disuelto) en el agregado, a partir de la cinética química se conocen dos velocidades de reacción álcali-sílice.

#### **2.4.3.1. RAS rápida**

Los áridos están conformados por minerales de sílice pobremente cristalizados: vidrio volcánico, ópalo y tridimita, los cuales si se encuentra presentes en un 1 o 2 % en peso, pueden ocasionar deterioros en el concreto en un período corto de tiempo, a menos de un año de construido.

#### **2.4.3.2. RAS lenta**

Los agregados están constituidos por formas de cuarzo microcristalino, tensionado o deformado, ya que sus cristales demasiado diminutos tienen una

reacción lenta o diferida con señales de deterioro externo en el concreto después de 8 a 25 años.

#### **2.4.4. Condiciones que intervienen en las RAS**

Para que ocurra una reacción álcali-sílice deben darse un conjunto de condiciones desencadenantes y favorables para tal reacción:

- Tiempo.
- Contenido de álcalis del cemento.
- Fineza del cemento.
- Reactividad de los agregados.
- Agentes externos: alta humedad, periódica o permanente; temperatura.
- Factores relacionados al concreto: dosificación, permeabilidad, pH, efecto de las armaduras y relación agua/cemento (a/c).

#### **2.4.5. Proceso de las RAS en función del tiempo**

Se conocen tres períodos de tiempo relevantes, para la evolución o desarrollo de las RAS.

##### **2.4.5.1. Período de inducción**

En este se mueven los iones en la solución de poros hasta el momento en el cual se da el inicio del ataque a los áridos reactivos.

#### **2.4.5.2. Período de reacción franca**

Se da lugar a la reacción entre los constituyentes activos los cuales poseen alta rapidez de incremento de volumen.

#### **2.4.5.3. Período de amortiguamiento**

La relevancia de este período se debe a una reducción de la velocidad de reacción provocada por el agotamiento de algunos reactivos influyentes hasta desaparecer.

#### **2.4.6. ¿Cómo se manifiestan las RAS?**

Las manifestaciones superficiales que tienen las estructuras afectadas por las RAS son fisuras y grietas, las cuales presentan en veces una coloración más oscura y expulsión de un material de color ámbar que cuando se seca se torna de color blanco. En los pavimentos se observa ondulación en las losas y rotura debido a la presión de hinchamiento y saltaduras del concreto. Cuando la estructura tiene armaduras las fisuras son paralelas a estas.

La abertura de las fisuras puede variar desde décimas de milímetros a 3 cm. En testigos extraídos se observa que el fenómeno se produce en toda la masa del concreto, comúnmente, tienen aureolas alrededor de los áridos como manifestación del deterioro de la interface pasta agregado.

También, se observa variación en el color de los áridos o del mortero y las fisuras y poros se rellenan con los productos de la reacción. Además, se puede dar lugar a efectos de corrosión sobre la armadura y otros ataques

externos con una deterioración creciente del concreto a causa de que las grietas dan entrada desde la superficie.

Figura 17. **Reacción perjudicial álcali-sílice en pavimento de Nebraska**



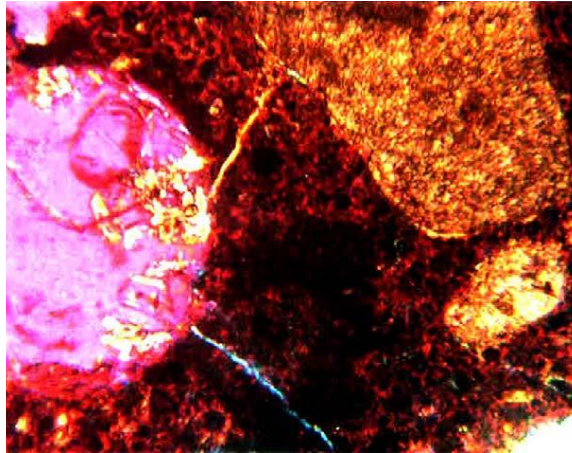
Fuente: TOUMA, Wissam Elias. *Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*. Co-Supervisor. p. 135.

Figura 18. **Una pieza de agregado (muestra el agrietamiento interno y un borde negro muy delgado alrededor de las afueras del agregado)**



Fuente: TOUMA, Wissam Elias. *Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*. Co-Supervisor. p. 135.

Figura 19. **Grietas en la pasta (propagadas lejos de una partícula de agregado)**



Fuente: TOUMA, Wissam Elias. *Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*. Co-Supervisor. p. 135.

## **2.5. Método químico para determinar la reactividad potencial álcali-sílice de los agregados (norma ASTM C 289)**

Esto se realiza mediante el método ASTM C 289 que cubre la determinación química de la reactividad potencial de un agregado con los álcalis, en concreto de cemento Portland, de acuerdo con la cantidad de la reacción que ocurre durante 24 horas a 80 °C, entre una solución de hidróxido de sodio 1 N y un agregado que ha sido triturado y tamizado, de forma que pase por una malla # 50 y quede retenido en una malla # 100 referentes a la especificación ASTM E 11 (alcance del método).

Figura 20. Malla # 50 & #100 (referentes a la especificación ASTM E 11)



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Reactores (norma ASTM C 289)



Fuente: elaboración propia.



Los reactores que se muestran en la figura contienen una reacción que se da entre hidróxido de sodio (1 N) y un agregado que ha sido triturado y tamizado, estos reactores se colocan en un horno a 80°C durante 24 horas para que se lleve a cabo la reacción.

Cuando este método de prueba se utiliza para evaluar la reactividad potencial de los componentes silíceos de los agregados con los álcalis en el concreto de cemento hidráulico, debe de ser utilizado en combinación con otros métodos. Los métodos de ensayo deben de ser seleccionados en base a las características mineralógicas de los agregados. Se recomienda que estas propiedades sean determinadas con un examen petrográfico de acuerdo con las disposiciones de la guía ASTM C 295 (significancia u uso) (1).

No se debe utilizar los resultados de las pruebas realizadas por este método de prueba (ASTM C 289) como la única base para la aceptación o el rechazo de las fuentes con respecto a la reactividad álcali-sílice (RAS), debido a que los resultados de este método de ensayo se pueden obtener rápidamente; aunque no son del todo fiables en todos los casos, pueden proporcionar datos útiles que pueden mostrar la necesidad de obtener información adicional a través de los métodos descritos en las normas ASTM C 227 & C 295 (significancia y uso) (13).

Las reacciones entre solución de hidróxido de sodio (NaOH) y constituyentes de sílice en el agregado se han demostrado por la correlación con el rendimiento de algunos agregados en estructuras de concreto (significancia u uso).

Este método puede ser empleado como una herramienta de control de calidad comprobar periódicamente muestras de una fuente existente con un historial de servicio aceptable.

En resumen, el método describe una selección y preparación de la muestras para ensayo, después menciona un procedimiento de reacción entre el agregado previamente tamizado y el hidróxido de sodio (NaOH); luego se establecen dos procedimientos que se deben realizar paralelamente para llegar al resultado final. Estos procedimientos son la reducción de alcalinidad y la determinación gravimétrica de sílice disuelta.

#### **2.5.1. Determinación gravimétrica del sílice disuelto ( $S_c$ )**

La sílice disuelta se determina de forma gravimétrica pero antes debe realizarse otra pequeña preparación a través de digestiones ácidas. En tal preparación se dan las etapas de descomposición de las muestras de sílice y silicatos, la separación, la calcinación y la determinación de sílice corregido. A partir del sílice corregido se puede calcular el sílice disuelto.

En la etapa de descomposición de las muestras de sílice y silicatos, el sílice es resistente al ataque químico por todos los ácidos minerales, a excepción del ácido fluorhídrico. Cuando el silicio es un componente secundario, así como es el caso de muchos minerales, la muestra se ataca con ácido clorhídrico (HCl) como lo sugiere el método ASTM C 289 también, se puede utilizar ácido perclórico ( $HClO_4$ ) como lo sugiere la norma japonesa JIS A 5308, quedando el sílice insoluble.

En la etapa de separación, el ácido silícico (sílice hidratada) es uno de los ácidos inorgánicos de mayor debilidad y cuando se forma por metátesis es

uno de los coloides inorgánicos más hidrofílicos. Para separar el sílice, se evapora a sequedad la disolución clorhídrica que contiene el sílice hidratado coloidal y el residuo se calienta entre 105 y 110 °C durante una hora, con lo que se obtiene un producto granular representado aproximadamente por la fórmula:  $\text{SiO}_2 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$  que se separa bien por filtración como lo dicta la norma ASTM C 289. También, puede deshidratarse el sílice por evaporación de la disolución con ácidos sulfúrico o perclórico hasta humos blancos como se regula en el método JIS A 5308.

Algo de sílice pasa siempre con el filtrado y para recogerla es necesaria otra evaporación tal como lo describen las normas ASTM C 289 & JIS A 5308.

Figura 22. **Ataques ácidos en campana y aparato de filtración**



Fuente: elaboración propia.

En la etapa de la calcinación, se quema el papel y finamente se calcina el sílice a temperatura máxima de la flama, esto se puede conseguir con un mechero de *Meker*, también se puede calcinar en una mufla. El residuo calcinado está constituido rara vez por sílice pura; su peso representa sílice e insolubles o también llamado sílice sin corregir.

Para determinar el sílice corregido, el residuo silicio se evapora con ácidos fluorhídrico (HF) como lo dicta la norma ASTM C 289 o la combinación de HF y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) como lo dicta la norma JIS A 5308, en crisol de platino con objeto de volatilizar el silicio en forma de tetrafluoruro de silicio.

Figura 23. **Evaporaciones con ácido fluorhídrico (HF)**



Fuente: elaboración propia.

La impureza de hierro queda después en la misma forma,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , que en el residuo original, y la pérdida de peso representa  $\text{SiO}_2$ , el sílice corregido, pues a partir de este sílice corregido se determina el sílice disuelto que se presenta en el agregado.

Debido a que en la muestra pueden encontrarse presentes fluoruros, se produce una pérdida de silicio en forma de tetrafluoruro de silicio en el tratamiento de ácido preliminar de la muestra y en la evaporación para la separación del sílice.

En consecuencia, debe emplearse material de platino para la descomposición de la muestra y se puede evitar prácticamente la pérdida del silicio cubriendo la cápsula de ataque con una tapa de platino, con objeto de mantener saturada el vapor de agua la atmósfera de la cápsula; con esto tiene lugar la hidrólisis del fluoruro de silicio.

Volatilizándose el fluoruro de hidrógeno por calefacción en presencia de ácido perclórico hasta humos abundantes.

El boro que puede estar presente en la muestra siempre queda arrastrado en forma de ácido bórico por el sílice hidratado. El óxido bórico que se forma en la calcinación se volatiliza, también, con el tratamiento con ácido fluorhídrico.

Y esta pérdida de peso podría quedar asignada al sílice. La separación del boro del sílice puede realizarse antes de la deshidratación por tratamiento del residuo casi seco con metanol, con lo que se volatiliza el trimetilborato.

### 2.5.2. Reducción de la alcalinidad ( $R_c$ )

La reducción de la alcalinidad se determina a través de una volumetría ácido base, en la cual comúnmente se utiliza una alícuota de 20 mL de la solución que se hace después del procedimiento de reacción entre hidróxido de sodio (NaOH) y agregado después de 24 horas; a esta solución se le agregan dos gotas de fenolftaleína, se titula con ácido clorhídrico (HCl) 0,05 N (normal).

Figura 24. Reducción de la alcalinidad ( $R_c$ )



Fuente: elaboración propia.



## 2.6. Método de barra de mortero para la determinación de reactividad potencial álcali-sílice (norma ASTM C 227)

Se realiza mediante el método ASTM C 227, el cual tiene como alcance determinar la susceptibilidad de las combinaciones cemento-agregado a reacciones expansivas que involucren iones hidroxilo asociados con los álcalis (sodio y potasio), mediante la medición del aumento (o reducción) en la longitud de barras de mortero que contengan la combinación, durante el almacenamiento bajo condiciones prescritas en la prueba.

Figura 25. **Barras de mortero curadas durante 24 horas en un cuarto de humedad, inmediatamente después de haber sido formadas (norma ASTM C 227)**



Fuente: TOUMA, Wissam Elias. *Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*. Co-Supervisor. p. 135.

Los álcalis participantes en las reacciones de expansión son aportados usualmente por el cemento; en algunas circunstancias pueden provenir de otros componentes del hormigón o de fuentes externas.

### **2.6.1. Significancia**

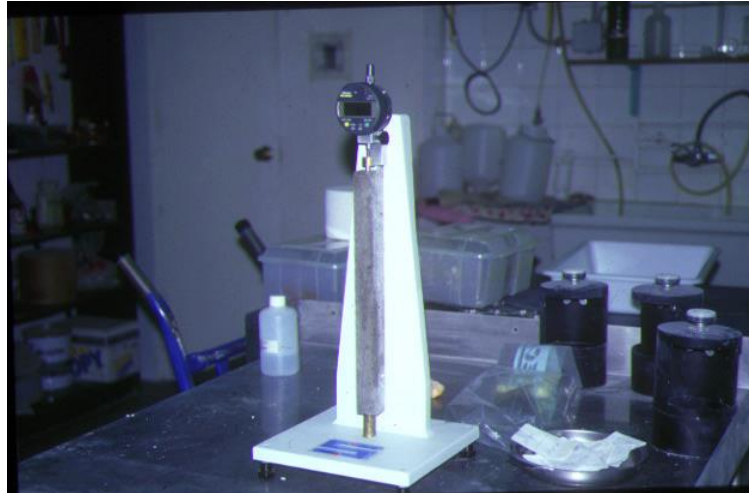
La correlación de los datos de los resultados de los ensayos efectuados mediante este método con el comportamiento de las combinaciones cemento-agregado en hormigones en servicio, los resultados de la evaluación petrográfica de los agregados (norma ASTM C 295); y los resultados de los ensayos para determinar la reactividad potencial de los agregados mediante métodos químicos, ha sido publicada en la norma ASTM C 289, y debe ser consultada junto con los resultados de los ensayos efectuados, usando esta norma (ASTM C 227) como base para las conclusiones y recomendaciones concernientes al uso de las combinaciones cemento-agregado en hormigón.

Los resultados de los ensayos efectuados usando esta norma proporcionan información sobre la posibilidad de que una combinación cemento-agregado, que tenga una reactividad potencial álcali-sílice perjudicial, cause una consecuente expansión del hormigón. Los criterios para determinar esta reactividad se encuentran en el apéndice de la norma ASTM C 33.

En caso de utilizar otro tipo de cemento como cemento mezclado hidráulico UGC, también llamado acorde a las normas ASTM, cemento mezclado hidráulico tipo GU, los criterios para determinar esta reactividad se encuentran en la norma ASTM C 1157.



Figura 26. **Medición de expansión en laboratorio (norma ASTM C 227)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Cemento UGC (tipo GU, norma ASTM C 1157)**



Fuente: elaboración propia.

Puede resultar una expansión insignificante cuando estén presentes rocas de sílice potencialmente reactivas en una proporción comparativamente alta, aun cuando se use cemento con alto álcali, probablemente porque los productos de la reacción álcali-sílice se caracterizan por una proporción álcali a sílice tan baja como para minimizar la filtración del agua y el abultamiento.

Los agregados dolomíticos (cuando se hayan empleado como agregado grueso en el hormigón), que son afectados perjudicialmente por la reacción álcali-carbonato, no pueden producir una expansión notable en este método de ensayo.

También puede ocurrir, eventualmente, una expansión significativa en el ensayo por razones diferentes a la reacción álcali-agregado, particularmente, por la presencia de sulfatos en el agregado, los cuales producen un ataque de sulfato sobre la pasta de cemento, sulfuros ferrosos (pirita, marcasita o pyrrhotita) que se oxidan e hidratan con el escape o pérdida de sulfato y materiales como la cal libre (CaO) o magnesio libre (MgO) en el cemento o agregado que progresivamente se hidratan y carbonatan.

Cuando los resultados de los ensayos descritos en esta norma presenten expansiones que excedan las determinadas en el apéndice de norma ASTM C 33, o en su defecto de la norma ASTM C 1157 si se usa cemento UGC (tipo GU), es recomendable desarrollar información suplementaria para confirmar que la expansión real se debe a la reactividad a los álcalis.

Figura 28. **Lavado de agregado encima de malla # 100 (ASTM C 227)**



Fuente: TOUMA, Wissam Elias. *Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*. Co-Supervisor. p. 135.

Las fuentes para esta información suplementaria incluyen: evaluación petrográfica del agregado para determinar si los componentes reactivos conocidos están presentes; evaluación de los especímenes después de los ensayos para identificar los productos de la reactividad al álcali y ensayos de los agregados para determinar la reactividad potencial por métodos químicos (norma ASTM C 289).

Figura 29. **Medidas de malla requeridas para ensayos ASTM C 227 & ASTM C 1260 (métodos de barra de mortero)**



Fuente: TOUMA, Wissam Elias. *Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*. Co-Supervisor. p. 135.

Cuando se haya concluido, (partiendo de los resultados de los ensayos descritos en esta norma y de la información suplementaria), que una combinación cemento-agregado puede ser considerada con una reactividad potencial perjudicial, se pueden realizar estudios adicionales para desarrollar información sobre la reactividad potencial de otras combinaciones que contengan el mismo cemento con otros agregados, el mismo agregado con otros cementos o la misma combinación cemento-agregado con un aditivo mineral.

## **2.7. Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 2 in o 50 mm de lado (norma ASTM C 109)**

El alcance de esta norma es establecer el método para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico utilizando cubos de 2 in o 50 mm de lado. El método de ensayo de la norma ASTM C 349 suministra un método alternativo (16).

En combinación con la escoria de mata de níquel se usará arena gradada normalizada para distintos diseños de mezcla; debe ser arena natural de sílice y debe cumplir con los requisitos de la norma (ASTM C 778).

### **2.7.1. Sumario**

Las proporciones en masa para formar el mortero usado están compuestas de una parte de cemento y 2,75 partes de arena. Los cementos Portland o los cementos Portland con incorporadores de aire son mezclados con una relación agua/cemento especificada. Para los demás cementos la cantidad de agua de amasado debe ser aquella que produzca una fluidez de  $110 \pm 5$  en 25 golpes con la mesa de flujo. Los cubos de ensayo de 2 in o 50 mm se apisonan en dos capas. Los cubos son curados un día en los moldes, luego se desmoldan y se sumergen en agua con cal hasta el momento del ensayo.

Figura 30. **Fundición y aplastamiento de cubos de mortero por resistencia (norma ASTM C 109)**



Fuente: FERREIRA, Rui Miguel. *Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão*. p. 205.

### **2.7.2. Significancia**

Este método de ensayo proporciona un medio para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cementos hidráulicos y otros morteros. Los resultados pueden emplearse para determinar la conformidad con las especificaciones y métodos de ensayo. Deben tomarse con especial cuidado estos resultados al usarlos para estimar resistencias en el hormigón.

Figura 31. **Prensa hidráulica (máquina universal, norma ASTM C 109)**



Fuente: MENPHIS, Reyes. *Aplicación del diseño experimental en el desarrollo de las prácticas internas, en el área de operaciones unitarias.* p. 110.





### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Variables

La definición operacional de las variables se divide en dos: variables de medición y de cálculo, para lo cual se realizó una adaptación del cuadro de variables que aparece en la siguiente figura.

Figura 32. Cuadro de variables

Descripción de variables involucradas		!"#\$%&'(%\$)*#+, '-)'		!"#\$%&)'	
*23'	4"&+"1,)'	-.)*. +%*"'	-.)/%'	() &\$0&1"-%&)'	-9'
		#256785796'	48:;8<=96'	#257:2=8<=96'	:>;?2'
<b>Análisis de Equipo</b>					
@'	('J8K2:' )57:8?8'	(.+'	Y'	'	'
A'	+579:L8M<;8?2:'	'	'	Y'	'
B'	\$3')3'N=>;?2'L2:808'	U'#'	Y'	'	'
C'	\$3'.3'N=>;?2'L2:808'	U'#'	'	Y'	'
D'	\$3')3'N=>;?2'7<26'	U'#'	Y'	'	'
E'	\$3'.3'N=>;?2'7<26'	U'#'	'	Y'	'
F'	!=>P2'MQ6'?9'8R>8'	VRW6'	'	Y'	'
<b>Análisis de Ambiente externo:</b>					
G'	\$9MK9:87>:8'8M<3'	U'#'	'	'	Y'
H'	('87M26NS:;L8'	87M'	'	'	Y'
@I'	T>M9?8?'	X'	'	'	(.+'
.)Z'.;5'M8[2:;'5N=>95L;8'95'=8'9\K9:;M9578L;]5'2<P97;J23'					
<b>Descripción de variables a manipular</b>					
*23'	4"&+"1,)'	-.)*. +%*"'	&85R2'-9'48:;8L;]5'		
@'	*23'?9';579:L8M<;8?2:'-3'#3'	'	@D^'@B^'@^'@I'['@E'?9N=9L73'		
A'	!=>P2'MQ6;L2'?9'8R>8'	VRW6'	I3B'_I3C''		

Fuente MÉNDEZ ÁLVAREZ, Carlos Eduardo. *Proceso de investigación: desarrollo*. p. 229.

Tal adaptación se puede apreciar en los siguientes cuadros de variables inherentes a esta investigación.

Tabla IV. Descripción de variables involucradas (de medición)

No.	Variable	Unidad	Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
			Constante	Variable	Controlables	De ruido
<i>Ensayo de especímenes</i>						
1	Gradación	N/A		ESP		
2	Concentración	% & partes		X		
3	Diseño de mezcla	N/A		X		
4	Longitud efectiva del calibre	mm	X			
5	Longitud base	mm		X		
6	Longitud a la edad determinada	mm		X		
7	Máxima carga total	kg		X		
8	Área de la superficie cargada	mm <sup>2</sup>	X			
9	edad	días		X		
10	volumen	mL	X			
<i>Análisis del Ambiente de ensayo y almacenamiento</i>						
11	Temperatura	°C			X	
12	Presión Barométrica	mmHg				SIE
13	Humedad	%			X	
SIE: sin mayor influencia en la experimentación objetivo						
ESP: especificación por método						
N/A: no Aplica						

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. Descripción de variables involucradas (de cálculo)

No.	Variable	Unidad	Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
			Constante	Variable	Controlables	De Ruido
1	<i>Ensayo de especímenes</i> Porcentaje de expansión	%		X		
2	Resistencia mecánica a compresión	MPa		X		
3	<i>Trabajabilidad</i> Relación agua/cemento	N/A	X			

SIE: sin mayor influencia en la experimentación objetivo  
 ESP: especificación por método  
 N/A: no Aplica

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. Descripción de variables a manipular

Núm.	Variable	Unidad	Rango de Variación
1	Gradación	N/A	-Dos gradaciones, especificadas para cada uno de los ensayos (ASTM C 227 & ASTM C 109), -En función del agregado fino: de 0 % a 100 % de escoria de mata de níquel en combinación de 100 % a 0 % de arena estándar, respetando las proporciones de 1 parte de cemento y 2,25 partes de agregado fino para el ensayo ASTM C 227, y 1 parte de cemento y 2,75 partes de agregado fino para el ensayo ASTM C 109.
2	Concentración	Partes & %	-10 diseños de mezcla, 5 para el ensayo ASTM C 227 y 5 para el ensayo ASTM C 109, los dos incluyen testigo.
3	Diseño de mezcla	N/A	-De 0 a 56 días, siendo estos 1, 7, 14, 28, 56 días específicamente.
4	Edad	días	

Fuente: elaboración propia.

### **3.1.1. Variables de medición**

#### **3.1.1.1. Gradación (*grading*)**

Es una clasificación en función de límites que un agregado tiene que cumplir. Tales límites están definidos en función de tamizar a través de diferentes mallas de distintos tamaños (núm. Malla acorde a la especificación ASTM E 11), medida de la abertura de la malla en submúltiplos de metro tales como mm,  $\mu\text{m}$ , pm, entre otros) especificados el agregado, y verificar que el porcentaje que pasa (% en masa) cumpla con la especificación.

En efecto para los ensayos ASTM C 227 & ASTM C 109 existe una especificación de la gradación que el agregado tiene que cumplir. Por consiguiente, para tales ensayos existen recomendaciones de que se deben hacer en caso de que el agregado no cumpla con las especificaciones dadas en los ensayos.

Para tales efectos se puede introducir la operación de molienda o trituración y se debe registrar todo los recursos que se utilizaron para cumplir con la gradación especificada en las normas ASTM C 227 & ASTM C 109 o si existen excepciones.

#### **3.1.1.2. Concentración (o proporción)**

Es la magnitud que da a conocer técnicamente la conformación de constituyentes de una totalidad expresada en porcentaje en masa (%) o en su defecto en partes (en masa).

En este caso las concentraciones o proporciones corresponden a qué cantidad se ha de combinar de cemento UGC, arena sílica y escoria de mata de níquel para formar los especímenes (morteros).

### **3.1.1.3. Diseño de mezcla**

El diseño de mezcla es el conjunto de concentraciones de los constituyentes de las barras y cubos de mortero (cemento UGC, arena sílica, escoria de mata de níquel), expresados en partes y en porcentajes en masa (%), también, en cantidades de material a usar (masa en gramos), para que se dé la realización de los ensayos ASTM C 227 & ASTM C 109. En efecto, la arena sílica y la escoria de mata de níquel constituirán la parte de agregado fino, que en combinación con la parte de cemento UGC, conforman la elaboración del mortero.

Según las normas ASTM C 227 y ASTM C 109, para cada ensayo existen proporciones en masa para formar el mortero a usar. Las proporciones en masa para el ensayo ASTM C 227 están compuestas de una parte de cemento y 2,25 partes de agregado fino. A diferencia de que las proporciones en masa para el ensayo ASTM C 109 están compuestas de una parte de cemento y 2,75 partes de agregado fino.

Para efectos prácticos del diseño experimental, se decidió agrupar las concentraciones en grupos llamados diseños de mezcla; de forma que para cada diseño de mezcla se optó identificarlo con un número entero, ya que no resulta práctico manejar 3 variables de concentración, y una cuarta llamada relación agua/cemento, ya esto solo provocaría que aumentasen las variables y que se dificulte el análisis estadístico de varianza (ANOVA).

#### **3.1.1.4. Longitud efectiva del calibre (ASTM C 227)**

La longitud efectiva del calibre ( $G$ ) es la longitud de calibre nominal, de una barra de referencia, que es de 250 milímetros (mm) cuando se utiliza el aparato que hace uso del sistema internacional de unidades, y de 10 pulgadas (in) cuando se utiliza el aparato que hace uso del sistema inglés de unidades.

#### **3.1.1.5. Longitud base (ASTM C 227)**

La longitud base ( $L_i$ ) es la lectura inicial del comparador del espécimen menos la lectura del comparador de la barra de referencia a ese mismo tiempo, en milímetros (mm) cuando se utiliza el aparato que hace uso del sistema internacional de unidades y en pulgadas (in) cuando se utiliza el aparato que hace uso del sistema inglés de unidades.

#### **3.1.1.6. Longitud a la edad determinada (ASTM C 227)**

La longitud a edad determinada ( $L_x$ ) es la lectura del comparador del espécimen a edad "x" menos la lectura del comparador de la barra de referencia; en milímetros (mm) cuando se utiliza el aparato que hace uso del sistema internacional de unidades, y en pulgadas (in) cuando se utiliza el aparato que hace uso del sistema inglés de unidades.

#### **3.1.1.7. Máxima carga total (ASTM C 109)**

La máxima carga total ( $P$ ) es el esfuerzo total aplicado por la máquina universal (prensa o compactador), a modo de llegar a la ruptura del cubo de mortero; tal carga máxima se ha de expresar en Newtons (N) o en libras de

fuerza (lb<sub>f</sub>). La carga máxima total que reporta la máquina universal del Laboratorio de Concretos del Centro de Investigaciones de Ingeniería está expresada en kilogramos de fuerza (kg<sub>f</sub>); para este caso se pueden aplicar factores de conversión.

#### **3.1.1.8. Área de la superficie cargada (ASTM C 109)**

El área de la superficie cargada (A) es el área a la cual se somete a esfuerzo mecánico, la cual predice la presión a la cual fue sometida. Esta área deberá estar expresada en milímetros cuadrados (mm<sup>2</sup>) o en pulgadas cuadradas (in<sup>2</sup>). En el Laboratorio de Concretos del Centro de Investigaciones de Ingeniería, por lo general, se utiliza centímetros cuadrados (cm<sup>2</sup>), para este caso se puede aplicar las unidades concernientes a la norma.

#### **3.1.1.9. Edad**

La edad (t) es el tiempo expresado en semanas o en días, para el cual se ha de llevar a cabo la medición de los especímenes (morteros) a través del comparador de medidas (norma ASTM C 227) y la medición a partir de la máquina universal (norma ASTM C 109).

#### **3.1.1.10. Volumen (de agua)**

Es el volumen en mililitros (mL) de agua que se utilizará para amasar los constituyentes del mortero, al momento de la elaboración del diseño de mezcla. Tal volumen deberá convertirse a masa a través de la densidad del agua.

#### **3.1.1.11. Temperatura**

La temperatura (T) es una magnitud referida a las nociones comunes de caliente, tibio, frío que puede ser medida, específicamente, con un termómetro.

En este caso la temperatura (T) será una variable de control expresada en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) o en grados Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ), para llevar a cabo el almacenaje y los ensayos de los especímenes (morteros) a través de las normas ASTM C 227 & ASTM C 109. Tales temperaturas aparecen especificadas en las mismas.

#### **3.1.1.12. Humedad**

La humedad (H) o humedad relativa (grado de humedad) es la cantidad de agua (vapor de agua) presente en aire, expresada en forma relativa de acuerdo con tal definición; la humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a una temperatura idéntica; tal cantidad está expresada en forma de porcentaje (%).

En este caso, la humedad será una variable de control, para llevar a cabo el almacenaje y los ensayos de los especímenes (morteros) a través de las normas ASTM C 227 & ASTM C 109. Tales humedades aparecen especificadas en las mismas.



### **3.1.1.13. Presión barométrica**

Es la presión de la atmósfera en una localización específica. Puede estar expresada en bares (bar), pascales (Pa), milímetros de mercurio (mmHg), pulgadas de mercurio (inHg), libras por pulgada cuadrada (psi), entre otras.

## **3.1.2. Variables de cálculo**

### **3.1.2.1. Porcentaje de Expansión (ASTM C 227)**

El porcentaje o tasa de expansión (L) es el cambio en longitud de la barra de mortero (espécimen) a edad “x”, expresada en (%).

### **3.1.2.2. Resistencia mecánica a compresión (ASTM C 109)**

Resistencia a la compresión ( $f_m$ ) es la capacidad de un material o estructura para soportar fuerzas dirigidas de empuje en una unidad de área específica. Esta variable se mide a distintas edades de desarrollo de resistencia. La resistencia a compresión ( $f_m$ ) realizada a través del método ASTM C 109 puede ser expresada en (MPa o PSI) o ambas unidades de medida.

### **3.1.2.3. Relación agua/cemento**

La relación agua/cemento (a/c), también conocida como razón agua/cemento, es uno de los parámetros más importantes ya que influye en gran medida en su resistencia final. Esta cantidad expresa la íntima relación que existe entre el peso del agua utilizada en la mezcla y el peso del cemento.

Dado que el peso del agua siempre es menor que el peso del cemento, el resultado de la división (el cociente) es menor que la unidad. Una relación a/c baja, conduce a un mortero o a un hormigón de mayor resistencia que una relación a/c alta. Pero entre más alta es la relación, el concreto se vuelve más trabajable. En las normas ASTM C 227 & ASTM C 109 se establece que relaciones a/c deben ser utilizadas para los distintos ensayos.

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

El estudio se llevará a cabo para la escoria de mata de níquel proveniente del vertedero de la Compañía de Níquel de Guatemala (El Estor, Izabal, Guatemala, Centro América) exclusivamente.

El tipo de investigación que se realizará en este estudio es de tipo descriptivo, pues ya se cuenta con cierta información, o sea otras investigaciones de tipo exploratorio, dentro de la cuales se hallan medidas ciertas variables; en esta investigación se agregarán y estudiarán otras con otro enfoque (desde el punto de vista de durabilidad) con lo cual se pretenderá describir y resolver el problema de investigación.

La selección y el tamaño de la muestra se harán análogamente al muestreo de agregados del cemento ya que esta es la aplicación que se le dio en investigaciones anteriores. Toda la investigación que se realizará dentro de las competencias que corresponden a la ingeniería química.

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

- Investigador: Br. Daniel Estuardo Matías Pérez
- Asesor: Ing. Qco. César Alfonso García Guerra
- Asesor: Ing. Qco. Adrián Antonio Soberanis

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

#### **3.4.1. Localización**

La parte experimental de la investigación se llevará a cabo en:

- Laboratorio Físicoquímico de la Sección de Química Industrial, del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Laboratorio de la Sección de Agregados, Concretos y Morteros, del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

#### **3.4.2. Equipo**

Los ensayos de compresión mecánica se realizarán en una máquina universal. Se utilizará equipo para tamizar y moler la escoria de mata de níquel.

#### **3.4.3. Cristalería**

Se utilizarán probetas, vasos de precipitados, varillas de agitación, picnómetros, termómetros.

#### **3.4.4. Reactivos**

Se usará cemento UGC (tipo GU) acorde a la norma ASTM C 1157, arena sílica (arena de sílice) acorde a la norma ASTM C 778, escoria de mata de níquel, agua, aceite ATF.

#### **3.4.5. Equipo de laboratorio**

Se utilizarán espátulas, hornos eléctricos, balanzas, deformómetro (comparador de medidas).

#### **3.4.6. Otros instrumentos**

Se usarán palas, piochas, espátulas, azadones, carretas, moldes, llaves de cola, cangrejos.

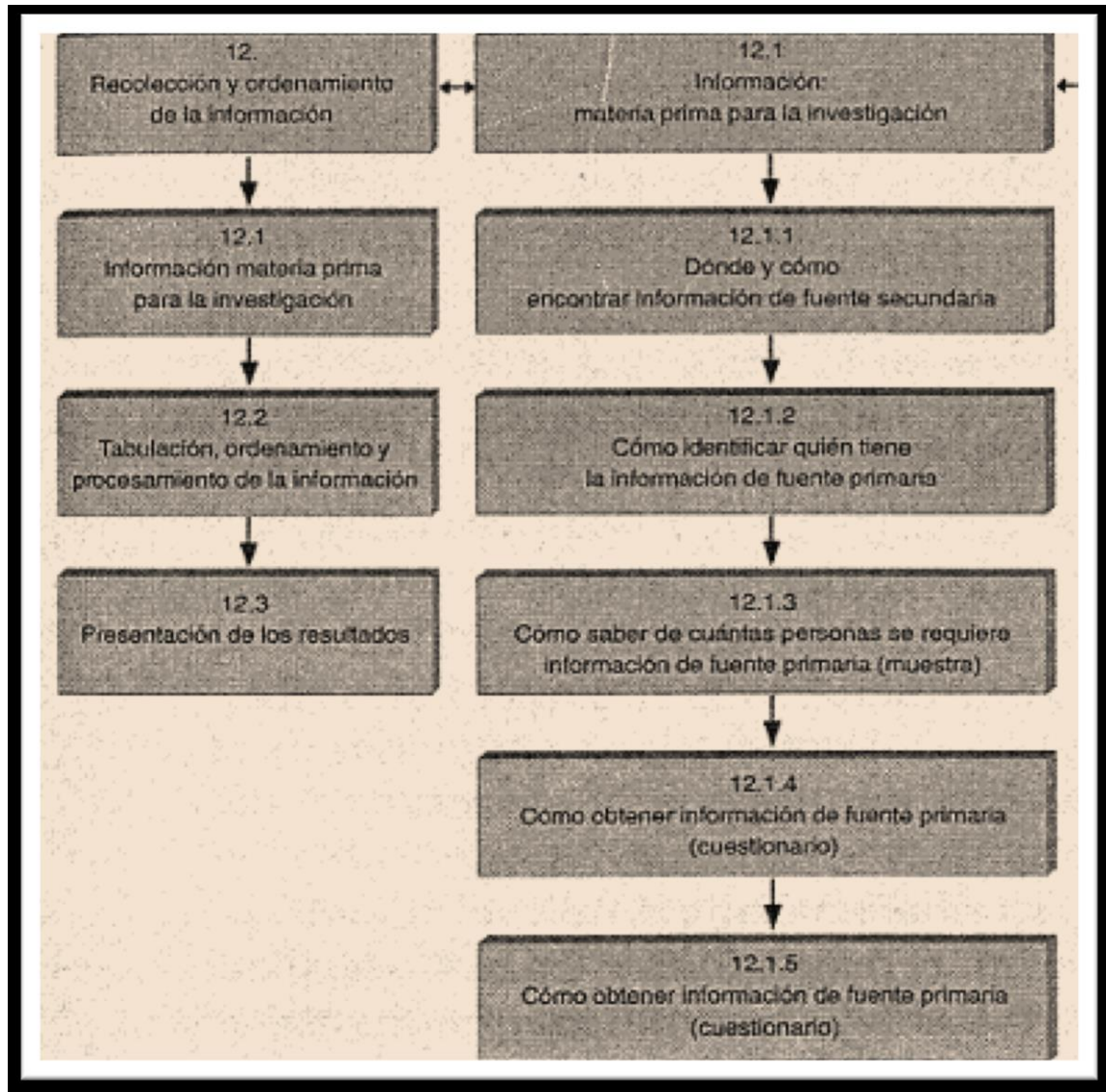
### **3.5. Técnicas cuantitativas**

- Método de comparación de medidas (longitud)
- Método de máquina universal (resistencia a compresión)

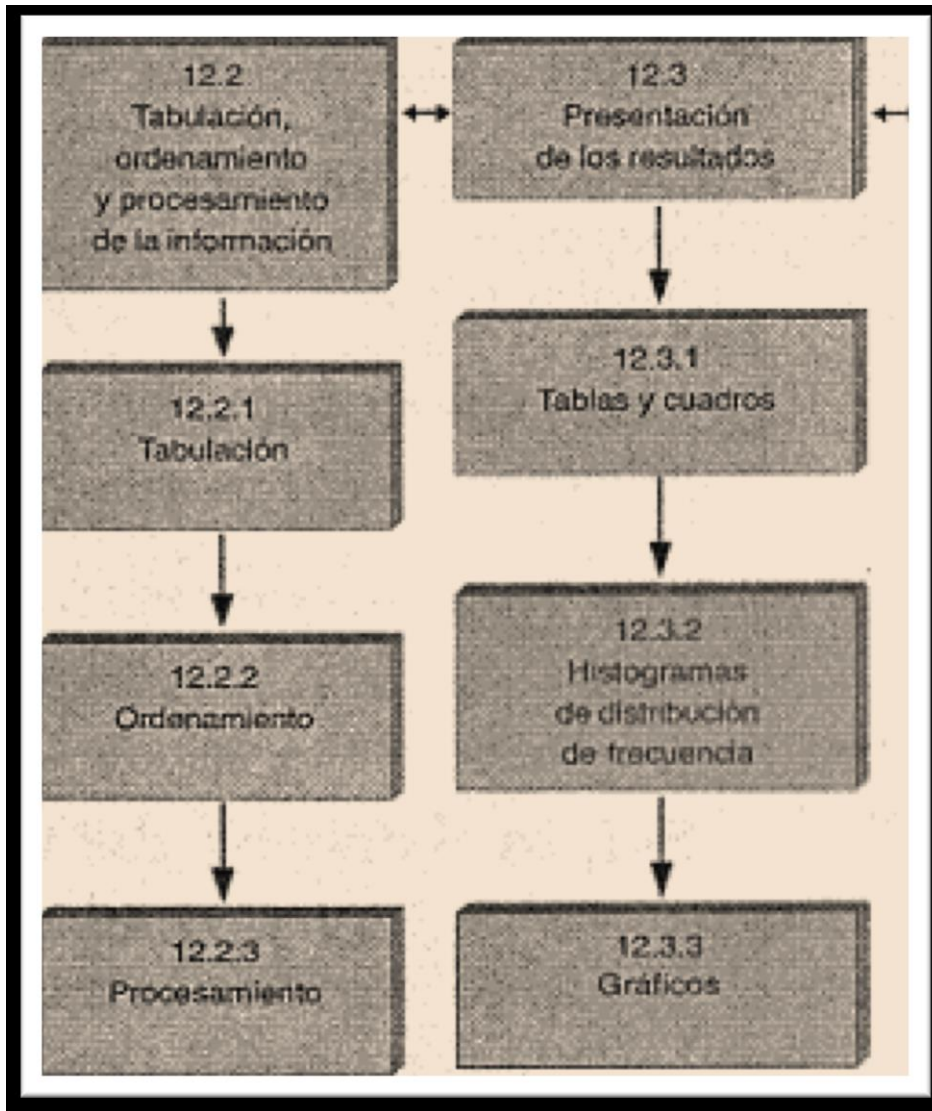
### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

En las siguientes figuras se ejemplifica como se llevará a cabo el desarrollo de la investigación.

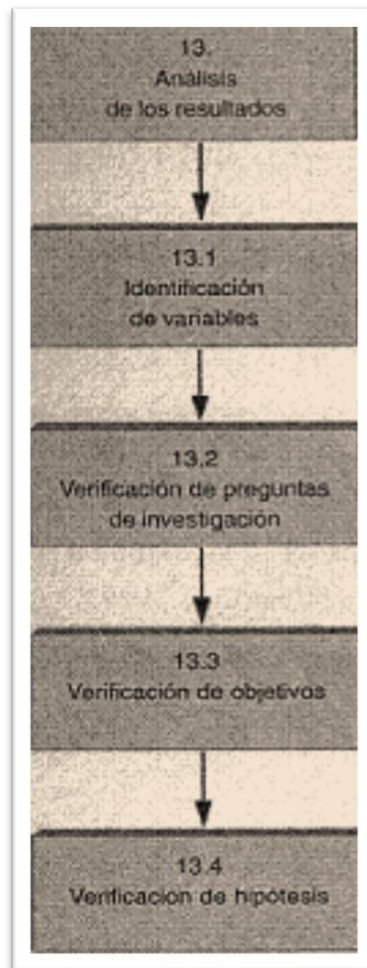
Figura 33. Proceso de investigación: desarrollo



Continuación de la figura 33.



Continuación de la figura 33.

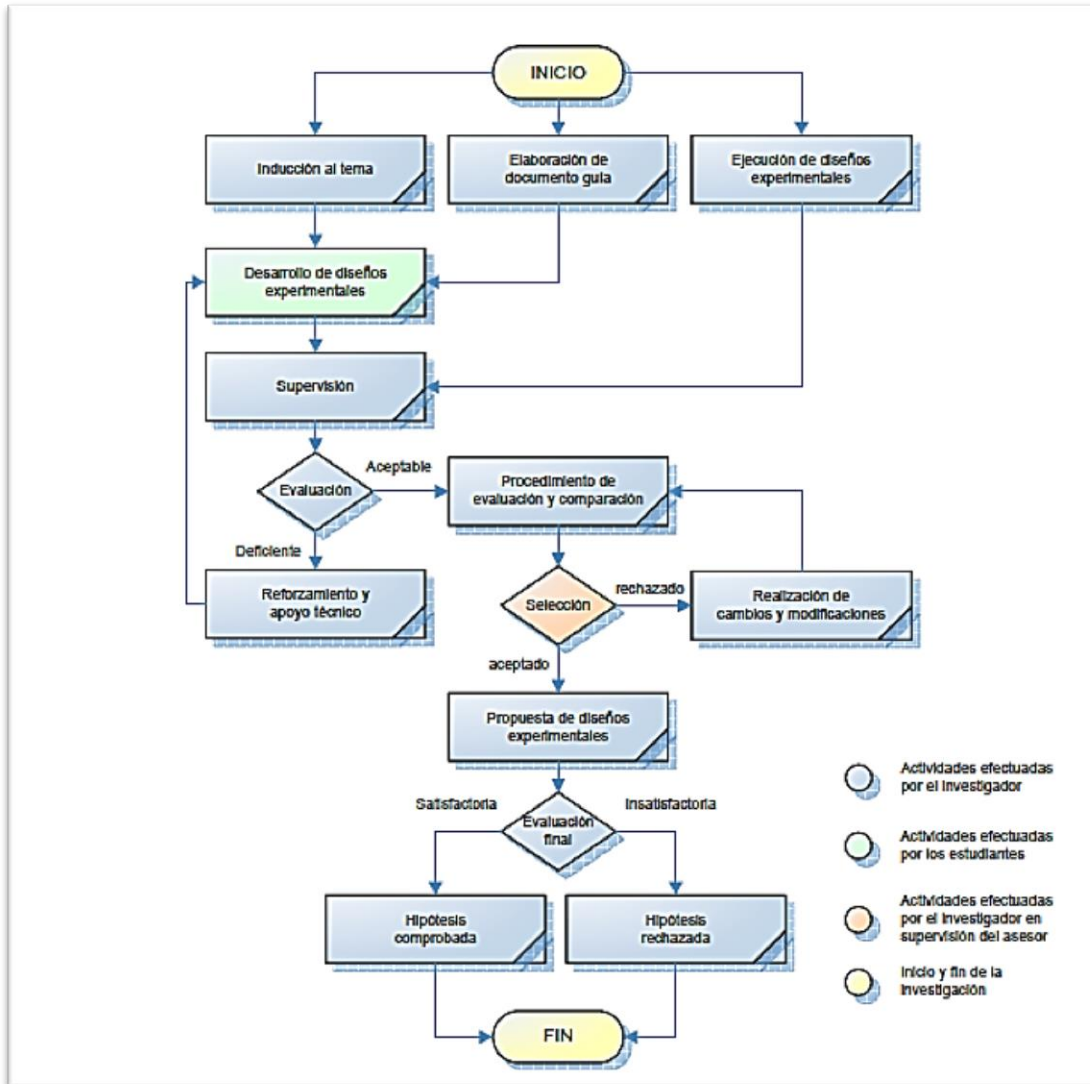


Fuente: JATURAPITAKKUL; Chai, KIATTIKOMOL; Kraiwood y SONGPIRIYAKIJ; Seksun. A *Study of Strength Activity Index of Ground Coarse Fly Ash with Portland*. <ftp://ftp.ecn.purdue.edu>.

Consulta: 30 de noviembre de 2016.

El siguiente flujograma propone un ejemplo de cómo llevar a cabo el desarrollo de la investigación.

Figura 34. Flujograma del desarrollo de la investigación



Fuente: MÉNDEZ ÁLVAREZ, Carlos Eduardo. *Proceso de investigación: desarrollo*. p. 229.



### **3.6.1. Muestreo**

En este caso la Compañía Guatemalteca de Níquel (C. G. N.) hará el muestreo análogamente al muestreo de los agregados del cemento Portland ya que esta será la aplicación que se pretenderá comprobar. La técnica de muestreo y el tamaño de la muestra se establecerán conforme a las normativas ASTM D 75, ASTM D 3665 & ASTM C 702.

### **3.6.2. Recolección de datos**

Esta se realizará a través de *test* (pruebas o ensayos) que pretenden medir las variables que se establecen para esta investigación.

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

Después de que se haya realizado el muestreo, comienza la recolección de datos para lo cual se procede a realizar esta etapa.

### **3.7.1. Tabulación y ordenamiento**

Respecto a la tabulación, la recolección de datos realizará una codificación en función del sistema decimal (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0). De esta manera se realizará para las corridas o réplicas de las variables que se pretenden medir. En efecto, para codificar los diseños de mezclas (combinación de materiales) también se hará de esta manera. La información estará agrupadas en tablas agrupadas por variables y dentro de las tablas aparecerán ítems relacionados con las variables que se medirán; en todos los casos se han de registrar los factores perturbadores como observación en los reportes de los ensayos.

Respecto al ordenamiento, se dan a conocer las formas diferentes de consignar los datos obtenidos en tablas; se hace referencia a la forma o técnica de recolección de datos, en este caso fue a través de test (pruebas o ensayos). De tal forma, que se puede construir una tabla para cada uno de los test; lo relevante es que la información quede registrada de manera clara y confiable una vez concluida su tabulación, ordenamiento y procesamiento. Estratégicamente, los datos estarán ordenados en forma de tablas de análisis de varianza (ANOVA), para que al momento de procesar los datos se haga de una forma rápida y práctica.

#### **3.7.1.1. Gradación (*grading*)**

Se deberá tamizar, separar, lavar y secar el agregado fino, para obtener el máximo contenido de los porcentajes que se necesitan para los requerimientos de gradación de los ensayos ASTM C 227 & ASTM C 109; estos porcentajes se han de almacenar separados en un contenedor limpio y seco provisto con una tapa que ajuste exactamente, a modo que se espere el momento en que se combinen para la elaboración de los especímenes (barras y cubos de mortero).

Para cada caso si no se obtuviese la cantidad necesaria en uno de los tamices, se deberá obtener a través de molienda o trituración, hasta que se haya producido el material requerido.

En el caso de agregados con cantidades insuficientes de uno o más tamaños de los que se especifican en las gradaciones de los ensayos ASTM C 227 & ASTM C 109; y si no hay material de mayor tamaño para la molienda o el triturado, el primer tamaño donde haya suficiente material disponible, debe contener el porcentaje acumulativo del material anterior a ese, en tamaño, tal

como se determina partiendo de la gradaciones especificadas en los ensayos ASTM C 227 & ASTM C 109. Cuando se requieran tales procedimientos, se debe hacer una anotación especial de este hecho en el informe de ensayo.

En las siguientes tablas se puede recolectar la información a partir de la gradación de los agregados finos:

**Tabla VII. Material a combinar para conformar la arena sílica que se usará acorde a la gradación especificada en el ensayo ASTM C 227**

Tamaño del tamiz (especificación ASTM C 227)			Agregado fino	
Pasante	Retenido	% masa	Arena sílica (%)	Arena sílica (g)
4, 75 mm (núm. 4)	2,36 mm (núm. 8)	10	10	1 000
2,36 mm (núm. 8)	1,18 mm (núm. 16)	25	25	2 500
1,18 mm (núm. 16)	600 µm (núm. 30)	25	25	2 500
600 µm (núm. 30)	300 µm (núm. 50)	25	25	2 500
300 µm (núm. 50)	150 µm (núm. 100)	15	15	1 500

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Material a combinar para conformar la escoria de mata de níquel que se usará acorde a la gradación especificada en el ensayo ASTM C 227**

Tamaño del tamiz (especificación ASTM C 227)			Agregado fino	
Pasante	Retenido	% masa	Escoria de mata de níquel (%)	Escoria de mata de níquel (g)
4,75 mm (núm. 4)	2,36 mm (núm. 8)	10	10	1 000
2,36 mm (núm. 8)	1,18 mm (núm. 16)	25	25	2 500
1,18 mm (núm. 16)	600 µm (núm. 30)	25	25	2 500
600 µm (núm. 30)	300 µm (núm. 50)	25	25	2 500
300 µm (núm. 50)	150 µm (núm. 100)	15	15	1 500

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Material a combinar para conformar la arena sílica que se usará acorde a la gradación especificada en el ensayo ASTM C 109**

Tamaño del tamiz (especificación ASTM C 778)		Agregado fino	
malla	% masa que pasa	Arena sílica (%)	Arena sílica (g)
1,18 mm (núm. 16)	100	0	0
600 µm (núm. 30)	96 a 100	2	240
425 µm (núm. 40)	65 a 75	28	3 360
300 µm (núm. 50)	20 a 30	45	5 400
150 µm (núm. 100)	0 a 4	23	2 760
Fondo	0	2	240

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Material a combinar para conformar la escoria de mata de níquel que se usará acorde a la gradación especificada en el ensayo ASTM C 109**

Tamaño del tamiz (especificación ASTM C 778)		Agregado fino	
malla	% masa que pasa	Escoria de mata de níquel (%)	Escoria de mata de níquel (g)
1,18 mm (núm. 16)	100	0	0
600 µm (núm. 30)	96 a 100	2	240
425 µm (núm. 40)	65 a 75	28	3 360
300 µm (núm. 50)	20 a 30	45	5 400
150 µm (núm. 100)	0 a 4	23	2 760
Fondo	0	2	240

Fuente: elaboración propia.

### 3.7.1.2. Diseño de mezcla

Existe una proporción en masa que se debe de respetar para cada ensayo ASTM C 227 & ASTM C 109, tal proporción aparece especificada tales normas. Para la investigación propuesta se tienen 10 diseños de mezcla, 5 para el ensayo ASTM C 227 y 5 para el ensayo ASTM C 109. Para cada uno de los dos ensayos se incorporó un diseño de mezcla testigo, que será el tratamiento de comparación adicional, que se conforma como referencia de los ensayos y que servirá para la comparación de los tratamientos en prueba.

La incorporación del testigo se debe a que en un conjunto de ensayos se debe conservar un nivel de precaución y observación, que prevenga la introducción de desviaciones debidas a influencias o procesos del entorno natural sobre la unidad de ensayo. Es decir, se debe introducir controles a las situaciones de prueba *in situ*, que hacen uso de testigos (o también llamados blancos de campo o laboratorio) y control de comparaciones.

A continuación, se presentan los distintos diseños de mezcla que se usarán en la presente investigación:

Tabla XI. **Diseño de mezcla: concentraciones para agregado fino**

Diseño	Concentración para agregado fino (%)		observación
	Arena	Escoria	
1	100	0	Arena sílica
2	75	25	Descartada
3	50	50	Descartada
4	25	75	Descartada
5	0	100	Escoria

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Diseño de mezcla: ensayo ASTM C 227 – NTC 3828 (concentraciones para barras de mortero)**

Diseño	Concentración (partes)			Agregado arena+escoria (partes)	observación
	Cemento	Arena	Escoria		
1	1	2,25	0,00	2,25	Arena sílica
5	1	0,00	2,25	2,25	escoria

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Diseño de mezcla: ensayo ASTM C 109 – NTC 220  
(concentraciones para cubos de mortero)**

Diseño	Concentración (partes)			Agregado arena+escoria (partes)	observación
	Cemento	Arena	Escoria		
1	1	2,75	0,00	2,75	Arena sílica
5	1	0,00	2,75	2,75	Escoria

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Diseño de Mezcla: Ensayo ASTM C 227 – NTC 3828 (masas  
para 1 barra de mortero)**

Diseño	masa (g)/barra			Agregado arena+escoria (g)	Volume n (mL)	observación
	Cemento	Arena	Escoria			
1	300	675,00	0.00	675	165	Arena Sílica
5	300	0.00	675,00	675	141	Escoria

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Diseño de mezcla: ensayo ASTM C 109 – NTC 220 (masas  
para 6 cubos de mortero)**

Diseño	masa (g)/ 6 cubos			Agregado arena+escoria (g)	Volume n (mL)	observación
	Cemento	Arena	Escoria			
1	500	1375,00	0,00	1 375	355	Arena sílica
5	500	0,00	1375,00	1 375	304	Escoria

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Diseño de mezcla: ensayo ASTM C 109 – NTC 220 (masas para 9 cubos de mortero)**

Diseño	masa (g)/ 9 cubos			Agregado arena+escoria (g)	Volumen (mL)	observación
	Cemento	Arena	Escoria			
1	740	2035,00	0,00	2 035	525,4	Arena sílica
5	740	0,00	2035,00	2 035	449,9	Escoria

Fuente: elaboración propia.

### 3.7.1.3. Mediciones de longitud (ensayo ASTM C 227)

Tabla XVII. **Longitud (mm) a 1 día, según el ensayo ASTM C 227**

réplicas	Tratamientos	
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5
1	2 845	4 518
2	2 832	3 994
3	2 840	4 436

Fuente: elaboración propia.

También se medirán las longitudes para 3, 7, 14, 28 & 56 días.



#### 3.7.1.4. Mediciones de carga máxima total (ensayo ASTM C 109)

Tabla XVIII. Máxima carga total (kg<sub>f</sub>) a 1 día, según el ensayo ASTM C 109

réplicas	Tratamientos	
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5
1	850	1 555
2	975	1 670
3	900	1 660

Fuente: elaboración propia.

También, se medirán las máximas cargas totales para 3, 7, 14, 28 & 56 días.

#### 3.7.2. Procesamiento

Se realizarán los cálculos concernientes a las normas ASTM C 227 & ASTM C 109 siguiendo el mismo orden establecido, de tal forma que se presentarán en tablas de ANOVA, a modo de facilitar el análisis estadístico y la elaboración de gráficas. Tales gráficas se realizarán con las variables que se estarán manipulando y las que se pretende calcular (los mensurados).

Se utilizarán medidas estadísticas: medias aritméticas, desviaciones estándar, grados de libertad, valores de la distribución f, probabilidades, límites de confianza y otras, a fin de que conformen técnicas estadísticas como las pruebas de hipótesis. Tales pruebas de hipótesis a su vez conforman análisis

estadísticos de asociación o relación como el análisis de varianza (ANOVA), ya que se hará inferencia (que se deduce algo de) estadística sobre la población (campo de estudio: escoria mata de níquel de planta C. G. N.), debido a que se empleará la información muestral.

### 3.7.2.1. Relación agua/cemento

La relación agua cemento es uno de los parámetros más importantes ya que este puede afectar en el desarrollo de resistencia. Además, se debe trabajar con consistencia entre tratamientos en función de la relación a/c, porque no se puede hacer réplicas con distinta relación a/c, ni se pueden hacer en este caso diseños de mezcla con distintas relaciones a/c, ya que no se está manipulando esta variable para ver su efecto en el desarrollo de resistencia; por tal motivo, debe tratarse de mantener constante y se deberá procurar en la medida de lo posible, respetar la especificación de la relación a/c concerniente a los ensayos ASTM C 227 & ASTM C 109.

Tabla XIX. **Relación a/c de las barras de mortero (norma ASTM C 227)**

Diseño de mezcla	Volumen de agua (mL)	a/c	observación
1	495	0,55	Arena Sílica
5	420	0,47	Escoria

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Relación a/c de los barras de mortero (norma ASTM C 109)**

Diseño de mezcla	Volumen de agua (mL)	a/c	observación
1	1050	0,71	Arena sílica
5	900	0,608	Escoria

Fuente: elaboración propia.

### 3.7.2.2. Ensayo de reactividad potencial álcali-sílice

Para el ensayo de reactividad potencial álcali-sílice realizado a través del método de barra de mortero (norma ASTM C 227), se habrá de calcular el porcentaje de expansión de las barras de mortero para cada diseño de mezcla. La ecuación que se utilizará está descrita en la norma ASTM C 490. En la norma ASTM C 227 & ASTM C 490 aparece la especificación de con que precisión se tienen que realizar las mediciones, los cálculos y presentar los resultados.

Tabla XXI. **Porcentaje de expansión (%) a 3 días según la norma ASTM C 227**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	0,006	-0,008	-0,001
2	-0,002	-0,021	-0,012
3	0,002	-0,075	-0,037
<b>media</b>	0,002	-0,035	-0,016

Fuente: elaboración propia.

Se harán tablas de un factor similares a la anterior para procesar información para 3, 7, 14, 28 & 56 días, para los mismos diseños de mezcla, para la misma cantidad de réplicas.

Lo anterior se realizó con el objeto de determinar estadísticos concernientes al análisis de varianza para diseños experimentales de un factor.

Luego que se haya procesado la información en tablas de ANOVA de un factor, se procederá a combinar esa misma información para que se obtenga un diseño final experimental de dos factores.

Para tal diseño experimental se hará la tabla de dos factores como la que se muestra a continuación:

Tabla XXII. **Porcentaje de expansión según la norma ASTM C 227**

edad (días)	Diseño de mezcla		Media
	1	5	
1	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	
	0,000	0,000	
3	0,006	-0,008	-0,016
	-0,002	-0,021	
	0,002	-0,075	
7	-0,035	-0,080	-0,050
	-0,056	-0,016	
	-0,037	-0,075	
14	-0,038	-0,078	-0,062
	-0,064	-0,063	
	-0,037	-0,094	

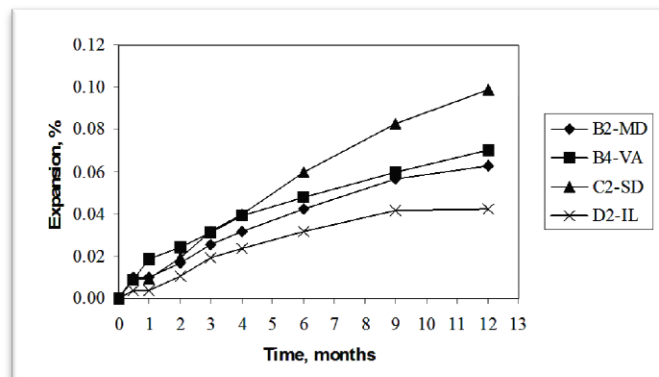
Continuación de la tabla XXII.

<b>28</b>	-0,074	-0,062	-0,073
	-0,095	-0,060	
	-0,086	-0,058	
<b>56</b>	-0,075	-0,050	-0,065
	-0,074	-0,054	
	-0,077	-0,057	
<b>Media</b>	-0,041	-0,047	-0,044

Fuente: elaboración propia.

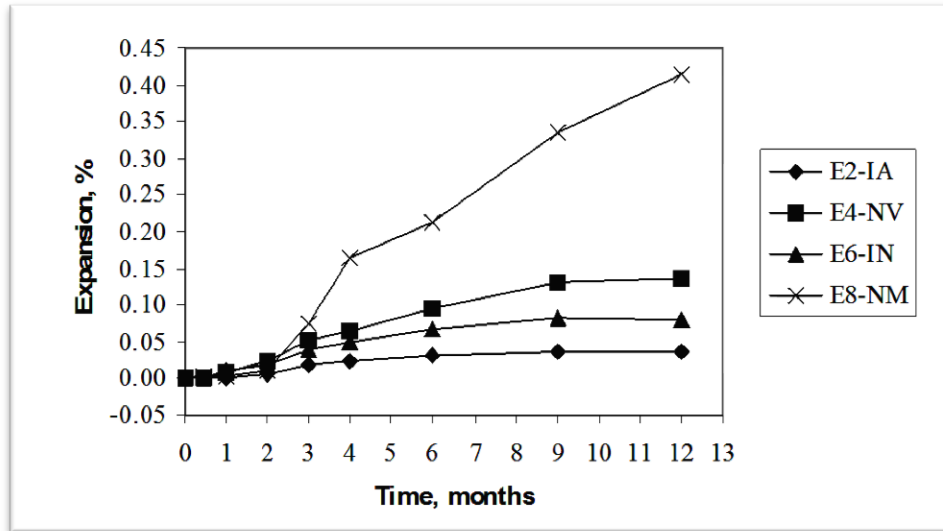
A partir de estos datos se obtienen gráficas semejantes como las que se muestran a continuación:

Figura 35. **Resultados de ensayo ASTM C 227 de categorías B, C & D de agregados**



Fuente: TOUMA, Wissam Elias. *Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*. Co-Supervisor. p. 135.

Figura 36. **Resultados de ensayo ASTM C 227 de categorías E de agregados**



Fuente: TOUMA, Wissam Elias. *Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*. Co-Supervisor. p. 135.

### 3.7.2.3. **Ensayo de resistencia a compresión mecánica**

Para el ensayo de resistencia a compresión mecánica realizado a través del método de cubos de mortero (norma ASTM C 109), se habrá de calcular la resistencia a compresión de los cubos de mortero para cada diseño de mezcla. La ecuación que se utilizará está descrita en la norma ASTM C 109. En la norma ASTM C 109 aparece la especificación de con que precisión se tienen que realizar las mediciones, los cálculos y presentar los resultados.

Tabla XXIII. **Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 3 días según la norma ASTM C 109**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	6,98	10,56	8,77
2	7,40	11,25	9,33
3	7,33	10,66	9,00
media	7,24	10,82	9,03

Fuente: elaboración propia.

Se harán tablas de un factor similares a la anterior para recolectar información para 3, 7, 14, 28 y 56 días, para los mismos diseños de mezcla, para la misma cantidad de réplicas.

Luego, se hará la tabla de dos factores como la que se muestra a continuación:

Tabla XXIV. **Resistencia a compresión mecánica (MPa) según la norma ASTM C 109**

edad (días)	Diseño de mezcla		Media
	1	5	
1	3,22	5,97	4 759
	3,68	5,94	
	3,45	6,30	
3	6,98	10,56	9 030
	7,40	11,25	
	7,33	10,66	

Continuación de la tabla XXIV.

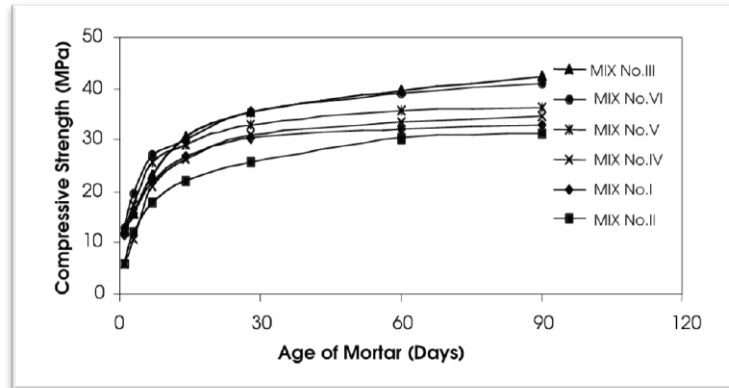
<b>7</b>	9,38	17,73	13 675
	9,80	17,56	
	8,72	18,85	
<b>14</b>	11,36	22,53	18 145
	12,77	24,85	
	11,45	25,91	
<b>28</b>	13,12	28,35	21 501
	15,86	28,58	
	14,96	28,12	
<b>56</b>	16,62	29,18	22 845
	16,83	30,32	
	16,97	27,17	
<b>Media</b>	10,550	19,435	14 993

Fuente: elaboración propia.

A partir de estos datos se obtienen gráficas semejantes como las que se muestran a continuación:

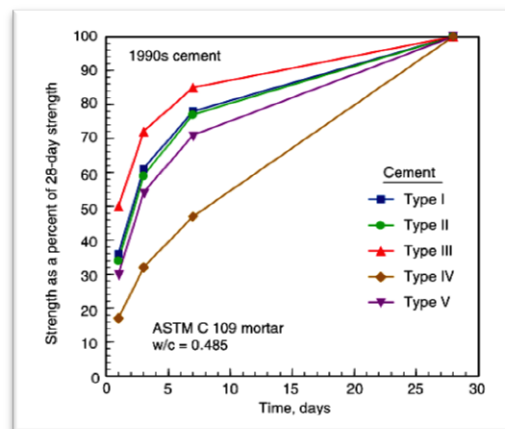


Figura 37. **Relación entre resistencia a compresión y edad del mortero (norma ASTM C 109)**



Fuente: WALPOLE; Ross, y MYERS; Seksun. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. p. 752.

Figura 38. **Desarrollo de resistencia relativa de cubos de mortero de cemento Portland como un porcentaje de la resistencia del día 28**



Fuente: WALPOLE; Ross, y MYERS; Seksun. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. p. 752.

### 3.7.2.4. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico y control de calidad de los datos se utilizará el análisis de varianza (ANOVA), en el cual se estandarizará a un 95 % de confiabilidad en los cálculos del mismo análisis; en efecto esto quiere decir que se utilizará en los cálculos un 5 % de significancia.

Para obtener este análisis de varianza se utilizarán diseños de uno y de dos factores para las variables involucradas.

En la siguiente figura se muestra cómo será empleado el formato para presentar los resultados del análisis de varianza.

Figura 39. **Tabla de ANOVA para diseño experimental de un factor**

*Tabla 13.3 Análisis de varianza para la clasificación unilateral*

Fuente de la variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	$f$ 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	$SST$	$nk - 1$		

Fuente: MORETTI; Ludwin y FOURNIER, Bran. *A evolução e desenvolvimento dos ensayos laboratoriais na prevenção e avaliação da reação álcali-agregado*. p.120.

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

En este apartado se describe cómo se realizará el análisis detallado de los de la información después de que se haya tabulado, ordenado y procesado.

#### **3.8.1. Métodos y modelos de datos según tipo de variables**

##### **3.8.1.1. Identificación de variables**

La identificación de variables se hace a partir de la información que se obtiene después de que haya sido tabulada, ordenada y procesada; de tal forma que se analiza cada resultado con criterios establecidos en el marco teórico.

En efecto, se le llama reacción alcalina de agregados al conjunto de fenómenos de degradación del concreto ocasionados por la reacción química entre algunos minerales obtenidos en los agregados y las sustancias alcalinas del concreto, cuyo producto absorbe agua y genera expansión.

Se considera un problema la reacción que ocurre entre minerales silíceos y la alcalinidad del concreto, que se denomina reacción álcali-sílice (RAS). Hay que tener claro que en este caso, los álcalis son de sodio y potasio y no de hidróxido de calcio, que se forma con la hidratación del cemento.

La reactividad potencial en función de la norma ASTM C 227 pretende, a través de fabricar barras de morteros con los áridos, conocer la reactividad potencial de los agregados midiendo su tasa de expansión; en contraste el método químico que pretende identificar la reactividad potencial de los áridos de una forma rápida mediante el análisis químico (norma ASTM C 289).

Debido a que se utilizará cemento UGC (o tipo GU), la norma ASTM 1157 suministra las tasas de expansión máximas que se deben cumplir para el ensayo ASTM C 227, siendo estas 0,020 % & 0,060 %, para 14 & 56, días respectivamente.

En caso de que se cumplan las condiciones anteriores se considerará que el material (escoria de mata de níquel) es inocuo o apto para su uso; en caso de no cumplirse los parámetros anteriores, el material se considerará nocivo o perjudicial (agregado reactivo o deletéreo respectivamente). Estos dos casos serán considerados como dictamen de reactividad potencial álcali-sílice.

Por otra parte, la resistencia a compresión puede ser definida como la medida de resistencia máxima a carga axial de un espécimen de mortero o concreto.

Debido a que se utilizará cemento UGC (o tipo GU), la norma ASTM 1157 suministra como debe ser el desarrollo de resistencia permitido a edad determinada ensayado a través del método ASTM C 109.

En caso de que se cumplan las condiciones anteriores se considerará que el material (escoria de mata de níquel) es inocuo o apto para su uso; en caso de no cumplirse los parámetros mencionados en la norma ASTM C 1157, el material se considerará no apto para su uso. Estos dos casos serán considerados como dictamen de resistencia a compresión.

Después de hacer las gráficas a partir de las curvas que se obtendrán al momento de haber tabulado, ordenado y procesado la información, se realizarán comparaciones entre estas curvas y gráficas; en términos prácticos se realizará un análisis gráfico de todas las formas de especímenes (morteros)

que se obtienen al combinar escoria de mata de níquel con arena sílica y cemento UGC; en este análisis se discutirá el porqué de los valores comportamientos obtenidos, y se les dará una interpretación.

#### **3.8.1.2. Verificación de preguntas de investigación**

Estas se pretenden resolver con la información que se consigue después que haya sido tabulada, ordenada y procesada. Tales preguntas que se quieren resolver son:

- ¿la escoria de mata de níquel se puede establecer como agregado fino en función de la reactividad potencial álcali-sílice? Se hará en comparación de todas las combinaciones de materiales para elaborar barras de mortero y el ensayo ASTM C 227.
- ¿A partir de la combinación de cemento hidráulico mezclado y escoria de mata de níquel se obtiene una resistencia mecánica aceptable? Se hará en comparación de todas las combinaciones de materiales para elaborar cubos de mortero y el ensayo ASTM C 109.

#### **3.8.1.3. Verificación de los objetivos**

Después de que toda la información haya sido tabulada, ordenada y procesada, habrá que verificar el cumplimiento de los objetivos. Si estos no se cumplen en su totalidad, se deberá replantear el diseño de investigación y cambiar su enfoque a partir de la nueva información que se obtiene luego de que se haya tabulado, ordenado y procesado, a manera de que se cumplan todos los objetivos.

Para ello se recomienda seguir paso a paso cada metodología descrita en las normas ASTM C 227 & ASTM C 109, y seguir recomendaciones de los asesores al momento de realizar la etapa experimental.

#### **3.8.1.4. Verificación de hipótesis**

Después de que se haya dado la etapa de tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información, se hace la interpretación de la hipótesis de investigación para concluir a partir de esta, y se hacen las interpretaciones de las hipótesis estadísticas a partir de las pruebas de hipótesis implícitas en los diseños experimentales que se usarán en esta investigación, para los cuales se realiza un análisis de varianza (ANOVA de uno y de dos factores) donde se establecen hipótesis estadísticas y pruebas de hipótesis; a partir de estas se elaboran más conclusiones.

Tales conclusiones pueden derivarse a partir de que si existe o no existe similitud entre cada espécimen (con su respectivo diseño de mezcla) en función de las normas ASTM C 227 & ASTM C 109.

También, se puede evaluar la buena respuesta (inocuidad del agregado) de cada espécimen (con su respectivo diseño de mezcla), en función de las normas ASTM C 227 & ASTM C 109.

#### **3.8.2. Programas a utilizar para el análisis de datos**

Las aplicaciones que se utilizarán para el análisis de datos son los siguientes: Excel, Cell Sheet, Statistics with List Editor, R, Máxima, FreeMat & Sage. En cualquiera de estos programas también se puede hacer análisis gráfico.

## 4. RESULTADOS

Tabla XXV. **Porcentaje de expansión (%) a 1 día según la norma ASTM C 227**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000
<b>media</b>	0,000	0,000	0,000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Porcentaje de expansión (%) a 3 días según la norma ASTM C 227**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	0,006	-0,008	-0,001
2	-0,002	-0,021	-0,012
3	0,002	-0,075	-0,037
<b>media</b>	0,002	-0,035	-0,016

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Porcentaje de expansión (%) a 7 días según la norma ASTM C 227**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	-0,035	-0,080	-0,057
2	-0,056	-0,016	-0,036
3	-0,037	-0,075	-0,056
<b>media</b>	-0,043	-0,057	-0,050

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Porcentaje de expansión (%) a 14 días según la norma ASTM C 227**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	-0,038	-0,078	-0,058
2	-0,064	-0,063	-0,064
3	-0,037	-0,094	-0,065
<b>media</b>	-0,046	-0,078	-0,062

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Porcentaje de expansión (%) a 28 días según la norma ASTM C 227**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	-0,074	-0,062	-0,068
2	-0,095	-0,060	-0,078
3	-0,086	-0,058	-0,072
<b>media</b>	-0,085	-0,060	-0,073

Fuente: elaboración propia.



Tabla XXX. **Porcentaje de expansión (%) a 56 días según la norma ASTM C 227**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	-0,075	-0,050	-0,063
2	-0,074	-0,054	-0,064
3	-0,077	-0,057	-0,067
<b>media</b>	-0,075	-0,054	-0,065

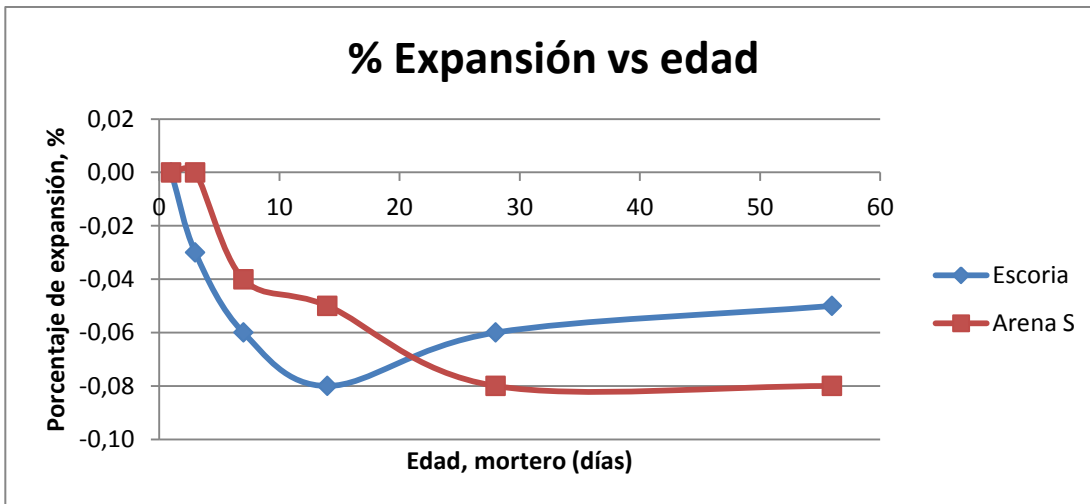
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Porcentaje de expansión según la norma ASTM C 227**

edad (días)	Diseño de mezcla		Media
	1	5	
1	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	
	0,000	0,000	
3	0,006	-0,008	-0,016
	-0,002	-0,021	
	0,002	-0,075	
7	-0,035	-0,080	-0,050
	-0,056	-0,016	
	-0,037	-0,075	
14	-0,038	-0,078	-0,062
	-0,064	-0,063	
	-0,037	-0,094	
28	-0,074	-0,062	-0,073
	-0,095	-0,060	
	-0,086	-0,058	
56	-0,075	-0,050	-0,065
	-0,074	-0,054	
	-0,077	-0,057	
<b>Media</b>	-0,041	-0,047	-0,044

Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Resultados de ensayo ASTM C 227 de categorías: escoria de mata de níquel y arena sílica**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 1 día según la norma ASTM C 109**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	3,22	5,97	4,59
2	3,68	5,94	4,81
3	3,45	6,30	4,88
media	3,45	6,07	4,76

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 3 días según la norma ASTM C 109**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	6,98	10,56	8,77
2	7,40	11,25	9,33
3	7,33	10,66	9,00
media	7,24	10,82	9,03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 7 días según la norma ASTM C 109**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	9,38	17,73	13,56
2	9,80	17,56	13,68
3	8,72	18,85	13,79
media	9,30	18,05	13,68

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 14 días según la norma ASTM C 109**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	11,36	22,53	16,94
2	12,77	24,85	18,81
3	11,45	25,91	18,68
media	11,86	24,43	18,14

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 28 días según la norma ASTM C 109**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	13,12	28,35	20,74
2	15,86	28,58	22,22
3	14,96	28,12	21,54
media	14,65	28,35	21,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Resistencia a compresión mecánica (MPa) a 56 días según la norma ASTM C 109**

réplicas	Tratamientos		media
	Diseño de mezcla 1	Diseño de mezcla 5	
1	16,62	29,18	22,90
2	16,83	30,32	23,57
3	16,97	27,17	22,07
media	16,80	28,89	22,85

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Resistencia a compresión según la norma ASTM C 109**

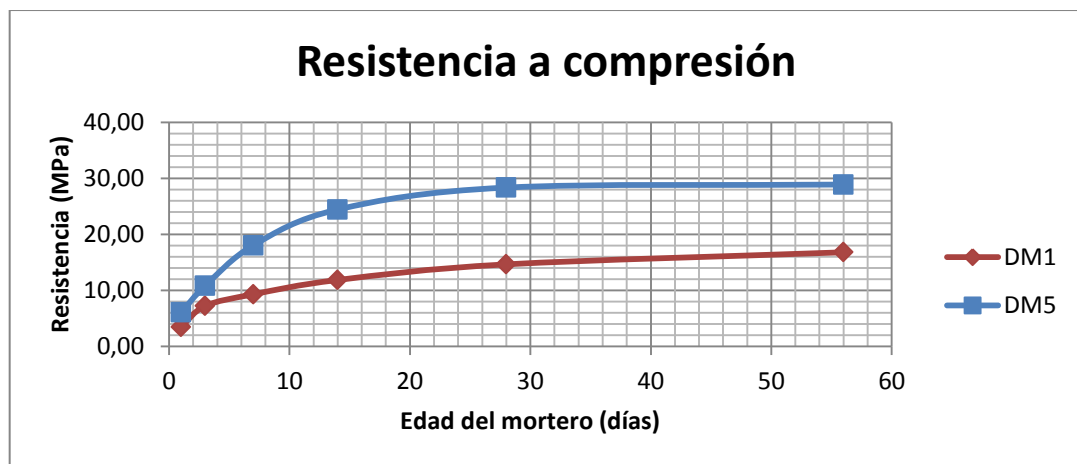
edad (días)	Diseño de mezcla		Media
	1	5	
1	3,22	5,97	4 759
	3,68	5,94	
	3,45	6,30	
3	6,98	10,56	9 030
	7,40	11,25	
	7,33	10,66	

Continuación de la tabla XXXVIII.

<b>7</b>	9,38	17,73	13 675
	9,80	17,56	
	8,72	18,85	
<b>14</b>	11,36	22,53	18 145
	12,77	24,85	
	11,45	25,91	
<b>28</b>	13,12	28,35	21 501
	15,86	28,58	
	14,96	28,12	
<b>56</b>	16,62	29,18	22 845
	16,83	30,32	
	16,97	27,17	
<b>Media</b>	10,550	19,435	14 993

Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Relación entre resistencia a compresión y edad del mortero para arena sílica y escoria de mata de níquel (norma ASTM C 109)**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **ANOVA 1 factor, porcentaje de expansión (%) a 1 día según norma ASTM C 227**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f	
<b>Tratamientos</b>	SSA 0,00E+00	1,00	0,00E+00	Calculada	0,0000
<b>Error</b>	SSE 1,33E-38	4,00	3,33E-39	Tabla	7,7086
<b>Total</b>	SST 1,33E-38	5,00			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **ANOVA 1 factor, porcentaje de expansión (%) a 3 días según norma ASTM C 227**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f	
<b>Tratamientos</b>	SSA 1,99E-03	1,00	1,99E-03	Calculada	3,0793
<b>Error</b>	SSE 2,58E-03	4,00	6,45E-04	Tabla	7,7086
<b>Total</b>	SST 4,57E-03	5,00			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **ANOVA 1 factor, porcentaje de expansión (%) a 7 días según norma ASTM C 227**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f	
<b>Tratamientos</b>	SSA 3,17E-04	1,00	3,17E-04	Calculada	0,4502
<b>Error</b>	SSE 2,82E-03	4,00	7,04E-04	Tabla	7,7086
<b>Total</b>	SST 3,13E-03	5,00			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **ANOVA 1 factor, porcentaje de expansión (%) a 14 días según norma ASTM C 227**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f	
<b>Tratamientos</b>	SSA 1,52E-03	1,00	1,52E-03	Calculada	6,5169
<b>Error</b>	SSE 9,35E-04	4,00	2,34E-04	Tabla	7,7086
<b>Total</b>	SST 2,46E-03	5,00			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **ANOVA 1 factor, porcentaje de expansión (%) a 28 días según norma ASTM C 227**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f	
<b>Tratamientos</b>	SSA 9,13E-04	1,00	9,13E-04	Calculada	15,6350
<b>Error</b>	SSE 2,33E-04	4,00	5,84E-05	Tabla	7,7086
<b>Total</b>	SST 1,15E-03	5,00			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **ANOVA 1 factor, porcentaje de expansión (%) a 56 días según norma ASTM C 227**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f	
<b>Tratamientos</b>	SSA 6,91E-04	1,00	6,91E-04	Calculada	114,1894
<b>Error</b>	SSE 2,42E-05	4,00	6,05E-06	Tabla	7,7086
<b>Total</b>	SST 7,15E-04	5,00			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **ANOVA 2 factores, porcentaje de expansión (%) según norma ASTM C 227**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f	
<b>Efecto principal</b>					
Edad	SSA 2,58E-02	5	5,16E-03	Calculada 18,80	Tabla 2,62
Diseño de mezcla	SSB 3,36E-04	1	3,36E-04	Calculada 1,22	Tabla 4,26
Interacciones de dos factores					
(Edad)(diseño de M.)	SS(AB) 5,10E-03	5	1,02E-03	Calculada 3,71	Tabla 2,62
Error	SSE 6,59E-03	24	2,75E-04		
Total	SST 3,78E-02	35			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. **ANOVA 1 factor, resistencia a compresión mecánica (MPa) a 1 día según norma ASTM C 109**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f	
<b>Tratamientos</b>	SSA 10,25	1,00	10,2539	Calculada 217,93	
<b>Error</b>	SSE 0,19	4,00	0,0471	Tabla 7,71	
<b>Total</b>	SST 10,44	5,00			

Fuente: elaboración propia.



Tabla XLVII. **ANOVA 1 factor, resistencia a compresión mecánica (MPa)  
a 3 días según norma ASTM C 109**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
<b>Tratamientos</b>	SSA 19,32	1,00	19,3150	Calculada 199,04
<b>Error</b>	SSE 0,39	4,00	0,0970	Tabla 7,71
<b>Total</b>	SST 19,70	5,00		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **ANOVA 1 factor, resistencia a compresión mecánica (MPa)  
a 7 días según norma ASTM C 109**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
<b>Tratamientos</b>	SSA 114,75	1,00	114,7508	Calculada 291,53
<b>Error</b>	SSE 1,57	4,00	0,3936	Tabla 7,71
<b>Total</b>	SST 116,33	5,00		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **ANOVA 1 factor, resistencia a compresión mecánica (MPa)  
a 14 días según norma ASTM C 109**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
<b>Tratamientos</b>	SSA 237,21	1,00	237,2088	Calculada 131,30
<b>Error</b>	SSE 7,23	4,00	1,8066	Tabla 7,71
<b>Total</b>	SST 244,44	5,00		

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **ANOVA 1 factor, resistencia a compresión mecánica (MPa) a 28 días según norma ASTM C 109**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
<b>Tratamientos</b>	SSA 281,67	1,00	281 6678	Calculada 280,01
<b>Error</b>	SSE 4,02	4,00	1 0059	Tabla 7,71
<b>Total</b>	SST 285,69	5,00		

Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **ANOVA 1 factor, resistencia a compresión mecánica (MPa) a 56 días según norma ASTM C 109**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
<b>Tratamientos</b>	SSA 219,12	1,00	219,1195	Calculada 170,03
<b>Error</b>	SSE 5,15	4,00	1,2887	Tabla 7,71
<b>Total</b>	SST 224,27	5,00		

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **ANOVA 2 factores, resistencia a compresión mecánica (MPa) según norma ASTM C 109**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
<b>Efecto principal</b>				
Edad	SSA 1,54E+03	5	3,07E+02	Calculada 397,28 Tabla 2,62

Continuación de la tabla LII.

Diseño de mezcla	SSB	7,11E+02	1	7,11E+02	Calculada	919,10
					Tabla	4,26
Interacciones de dos factores						
(Edad)(Diseño de M.)	SS(AB)	1,72E+02	5	3,43E+01	Calculada	44,42
					Tabla	2,62
Error	SSE	1,86E+01	24	7,73E-01		
Total	SST	2,44E+03	35			

Fuente: elaboración propia.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En esta evaluación, se realizaron con auge los ensayos reactividad potencial álcali-sílice (ASTM C 227) y resistencia a compresión mecánica (ASTM C 109), para barras y cubos de mortero respectivamente, elaborados con escoria de mata de níquel para un diseño de mezcla y para otro diseño de mezcla elaborados con arena de sílice.

Para ello se realizó el proceso de gradación mecánica, en el cual, se usó un molino manual para granos, obteniéndose los tamaños de granos adecuados, mediante la gradación a través de tamices conforme a la norma ASTM E 11, para efectuar las pruebas ASTM C 109 & ASTM C 227, dado que cada norma refiere cual debe de ser la distribución granulométrica para efectuar los mismos.

En la tabla XXXI aparece la información en forma condensada de las Tablas XXV a la XXX, en tal tabla se puede apreciar que las expansiones a edades tempranas (14 días, 0,020 %, expansión o contracción; a 1, 3, 7 días no se indica el requerimiento físico por la norma ASTM C 1157) del diseño de mezcla elaborado con la escoria de mata de níquel, no se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la norma ASTM C 1157.

En contraste, a edades avanzadas (56 días, 0,060 %, expansión o contracción; 28 días no aparece el requerimiento físico por la norma ASTM C 1157) del diseño de mezcla elaborado con la escoria de mata de níquel, si se encuentran dentro de los parámetros establecidos en la norma ASTM C 1157, por lo cual se puede dictaminar que a edades avanzadas el material escoria

mata de níquel si se puede utilizar como agregado fino en combinación del cemento UGC.

No fue el caso para la arena de sílice (que en este caso funcionó como testigo de material deletéreo), que para edades tempranas y avanzadas (14 y 56 días, a otras edades no se presenta el requerimiento físico por la norma ASTM C 1157) rebasan el límite de expansión (o contracción); por lo tanto, se puede dictaminar que el material arena de sílice es deletéreo en función de la reactividad potencial Álcali-Sílice (norma ASTM C 227) para usarse como agregado fino en combinación con el cemento UGC.

Para efectos de los mismos se pretendía evaluar combinaciones de los mismos agregados finos, pero resultó ser que la arena de sílice presentó un comportamiento perjudicial, en los dos ensayos, por lo cual de los 5 diseños de mezcla planificados al inicio, solo se optó trabajar con los 2, que se mencionaron anteriormente.

En la figura 42 se puede ver el comportamiento descrito por la tabla XXXI, los puntos que se presentan en la gráfica son los promedios de las réplicas por cada tratamiento realizado, aquí se aprecia al inicio que a edades tempranas los dos tienen una contracción alta respecto a lo que se establece en la norma ASTM C 1157, inclusive el diseño de mezcla que está elaborado con escoria de mata de níquel presenta aún una mayor contracción respecto de la del diseño de mezcla elaborado con arena de sílice.

Esto pudo deberse a que en el período de inducción de la RAS se pudo dar un alto movimiento de iones en la solución de poros hasta el instante en el cual se dio el comienzo del ataque a los agregados reactivos. También, se pudo deber a que en el período de reacción franca de las RAS, se dio lugar a la

reacción entre los componentes activos, los cuales tuvieron alta rapidez en el decremento de volumen.

Pero a edades avanzadas se puede apreciar que el diseño de mezcla realizado con escoria de mata de níquel va alcanzando un porcentaje de contracción que ya es permisible por la norma; este se alcanza a los 28 días y mejora el comportamiento aún a los 56 días, en contraste del diseño realizado con arena de sílice que se mantiene aún en una región no permisible, lo anterior respecto a lo que se acuerda en la norma ASTM C 1157.

Esto pudo deberse (para el caso del diseño de mezcla realizado con escoria de mata de níquel) que en el período de amortiguamiento de las RAS se dio una reducción en la velocidad de reacción provocada por el agotamiento de algunos reactivos influyentes hasta que se consumieron, lo que provocó que la contracción cesara y las fuerzas intermoleculares que mantenían el mortero en contracción también terminaran; por lo que este sistema al perder tales fuerzas intermoleculares, alcanza un nuevo equilibrio, dejando de contraerse y e incrementando el volumen hasta un nivel no perjudicial.

En general este comportamiento es análogo al que se presenta en forma idealizada en la figura 16, en la cual se observa que la expansión tiene un comienzo en función de los constituyentes reactivos, hasta que alcanza un máximo de expansión, luego de alcanzar la expansión máxima el material regresa a un volumen donde no existe riesgo de agrietamiento, pero en este caso ha de hacerse analogía a la contracción que se dio para los casos estudiados.

En la tabla XXXVIII se presenta la información obtenida en forma condensada de las tablas XXXII a la XXXVII; en tal tabla se puede observar las

resistencias a compresión mecánica a edades tempranas (3 y 7 días, 10 y 17 MPa respectivamente; para 1 y 14 días no se indica el requerimiento físico por la norma ASTM C 1157) del diseño de mezcla elaborado con la escoria de mata de níquel, son mayores a los parámetros establecidos por la norma ASTM C 1157.

En la misma forma, a edades avanzadas (28 días, 28 MPa; 56 días no aparece el requerimiento físico por la norma ASTM C 1157, pero se entiende que este deberá ser mayor o igual a la resistencia a compresión mecánica establecida en la norma para 28 días) del diseño de mezcla elaborado con la escoria de mata de níquel, también son mayores a los parámetros establecidos en la norma ASTM C 1157; por lo cual se puede dictaminar que a edades tempranas y avanzadas, el material escoria mata de níquel si se puede utilizar como agregado fino en combinación del cemento UGC, en función de la resistencia a compresión mecánica (norma ASTM C 109).

No siendo el caso para los cubos de mortero elaborados con arena de sílice (que en este caso funcionó como testigo de material deletéreo), que para edades tempranas y avanzadas (3, 7 y 28 días, a otras edades no se presenta el requerimiento físico por la norma ASTM C 1157) no superan el mínimo permisible por lo cual se puede dictaminar que el material arena de sílice es perjudicial en función de la resistencia a compresión mecánica (norma ASTM C 109) para usarse como agregado fino en combinación con el cemento UGC.

En la figura 43 puede observarse el comportamiento del desarrollo de resistencia a compresión mecánica de los cubos de mortero realizados con arena de sílice, la cual en ninguna de las edades cumple los requisitos establecidos en la norma ASTM C 1157; esto puede deberse a que la reactividad potencial tiene una contracción fuera de los límites permisibles por



la misma norma, lo cual deja lugar a que por parte del mortero y la prensa hidráulica se promueva el agrietamiento, y ceda a esto con compresiones mecánicas inferiores a las permisibles.

También en la figura 43 puede observarse el comportamiento del desarrollo de resistencia a compresión mecánica de los cubos de mortero realizados con escoria de mata de níquel, la cual en todas las edades cumple con los requisitos establecidos en la norma ASTM C 1157; además, la curva a simple vista parece ser homogénea en su comportamiento al momento de desarrollar resistencia a compresión mecánica, basándose en comportamientos idóneos presentados en la literatura.

A pesar de que la reactividad potencial álcali-sílice, en función de la contracción que se da a edades tempranas para las barras de mortero realizadas con escoria de mata de níquel, es alta, no influye en forma directa en la compresión mecánica a edades tempranas para los cubos de mortero realizados con el mismo material, por lo que se puede ver que no afecta en forma directa al desarrollo de resistencia, pero puede afectar otras propiedades del mortero y se sugiere que se estudien en investigaciones posteriores a esta, porque la escoria de mata de níquel es un material de origen residual.

Los resultados describen que la escoria de mata de níquel apta para usarse en combinación con el cemento UGC. En efecto, se pudo determinar que la escoria de mata de níquel es apta para su uso como agregado fino en combinación con el cemento UGC, respetando los parámetros de gradación, en la elaboración de morteros de albañilería y acabados; se hace la observación que ha de tenerse todas las precauciones y consideraciones necesarias debido a que la escoria de mata de níquel es de origen residual y no de origen pétreo.

En la tabla XLV se presenta el análisis de varianza respecto a dos factores, con una confiabilidad del 95 %. En este caso se analiza la similitud entre las expansiones (contracciones) entre distintas edades y distintos diseños de mezcla para los cuales se obtuvo que para distintas edades las expansiones (contracciones), no son similares debido al valor obtenido de  $f$ , y compararlo con el valor obtenido de  $f$  evaluado a partir de los grados de libertad y la tabla, ya que el primer valor es mayor que el segundo, se rechaza la hipótesis nula.

También, en la misma tabla, se obtiene que existe similitud entre las expansiones (contracciones) entre distintos diseños de mezcla, debido al valor de  $f$  obtenido, y compararlo con el valor obtenido de  $f$  evaluada a partir de los grados de libertad y la tabla, ya que en el primer es menor que el segundo, se acepta la hipótesis nula.

Al realizar la misma comparación de los valores de  $f$ , se establece que la interacción no es significativa. En este caso, dado que la interacción no es significativa, hay en realidad evidencia de que las pruebas sobre los efectos principales son interpretables, para el experimento de dos factores.

Pero ocurre entre las edades, las expansiones (contracciones) era un comportamiento esperado, que no fueran similares, pero en el caso de los diseños de mezcla no era esperado que la información brindada por el experimento de dos factores resultase que las expansiones (contracciones) son similares, caso que se contradice en forma parcial a partir de los experimentos de un factor que se presentan en las tablas XXXIX a la XLIV, con una confiabilidad del 95 %.

En estas se presentan que para las edades 1, 3, 7 y 14, que con anterioridad se les ha llamado edades tempranas, haciendo la misma

comparación de valores de  $f$ , se establece que ha de aceptarse la hipótesis nula para las cuatro edades, por lo que se establece que existe similitud en las expansiones (contracciones) para los dos diseños de mezcla propuestos.

Pero en el caso de las edades 14 y 56 días, que con anterioridad de se les ha llamado edades avanzadas, haciendo la misma comparación de valores  $f$ , se establece que ha de rechazarse que la hipótesis nula para las dos edades, por lo que se establece que no existe similitud en las expansiones (contracciones) para los dos diseños de mezcla propuestos.

Por lo anterior se puede establecer que a partir del experimento de dos factores no existe evidencia suficiente para afirmar que todas las expansiones (contracciones) son similares, ya que existe una contraparte en forma parcial a partir de los experimentos de un factor. Pudiese ser que en forma general si sean similares pero quizá el experimento de dos factores no tenga la potencia suficiente para analizar en forma particular la similitud entre expansiones para los dos diseños de mezcla, respecto a cada edad propuesta.

En la tabla LII se presenta el análisis de varianza respecto a dos factores, con una confiabilidad del 95 %. En este caso se analiza la similitud entre las resistencia a compresión mecánica entre distintas edades y distintos diseños de mezcla para los cuales se obtuvo que para distintas edades las resistencias a compresión mecánica, no son similares debido al valor obtenido de  $f$ , y compararlo con el valor obtenido de  $f$  evaluado a partir de los grados de libertad y la tabla, ya que el primer valor es mayor que el segundo, se rechaza la hipótesis nula.

También, en la misma tabla, se obtiene que no existe similitud entre las resistencias a compresión mecánica entre distintos diseños de mezcla, debido a

al valor de  $f$  obtenido, y compararlo con el valor obtenido de  $f$  evaluado a partir de los grados de libertad y la tabla, ya que en el primero es mayor que el segundo, se rechaza la hipótesis nula.

Realizando la misma comparación de los valores de  $f$ , se establece que la interacción no es significativa. En este caso, dado que la interacción no es significativa, hay en realidad evidencia de que las pruebas sobre los efectos principales son interpretables, para el experimento de dos factores.

A partir de los experimentos de un factor que se presentan en las tablas XLVI a la LI, con una confiabilidad del 95 %, En el caso de las edades 1, 3, 7, 14 y 56 días, haciendo la misma comparación de valores  $f$ , se establece que ha de rechazarse que la hipótesis nula para todas las edades, por lo que se establece que no existe similitud en las resistencias a compresión mecánica para los dos diseños de mezcla propuestos.

## CONCLUSIONES

1. Se realizó con éxito la evaluación de la reactividad potencial álcali-sílice y la resistencia a compresión mecánica de la escoria de mata de níquel, proveniente de la Compañía de Níquel de Guatemala (C. G. N.), mediante los métodos de barra y cubos de mortero respectivamente, en su empleo como agregado fino en combinación con el cemento UGC.
2. Se pudo realizar el proceso de gradación mecánica utilizando un molino manual para granos lográndose rendir los tamaños adecuados de partículas para realizar los ensayos ASTM C 109 & ASTM C 227.
3. El diseño de componente puro para la escoria de mata de níquel rindió adecuadamente en porcentaje de expansión en barra en cumplimiento de la norma ASTM C 227.
4. El diseño de componente puro para la arena sílica rindió inadecuadamente en porcentaje de expansión en barra en cumplimiento de la norma ASTM C 227, resultando ser deletéreo, por lo que las mezclas escoria mata de níquel-arena sílica, resultaron descartadas.
5. El diseño de componente puro para la escoria de mata de níquel rindió adecuadamente en resistencia a compresión en cubo en cumplimiento de la norma ASTM C 109.

6. El diseño de componente puro para la arena sílica rindió inadecuadamente en resistencia a compresión mecánica en cubo en cumplimiento de la norma ASTM C 109, resultando ser no inocuo, por lo que las mezclas escoria mata de níquel-arena sílica, resultaron descartadas.
7. Se dictaminó que la escoria de mata de níquel pura es inocua en su empleo como agregado fino en función de la reactividad potencial álcali-sílice según la norma ASTM C 227.
8. Se dictaminó que la escoria de mata de níquel pura es inocua en su empleo como agregado fino en función de la resistencia a compresión mecánica según la norma ASTM C 109.
9. Se establece que la escoria de mata de níquel es apta para su uso como agregado fino en combinación con el cemento UGC, en cumplimiento de las normas ASTM C 227 & ASTM C 109, en la elaboración de morteros de albañilería y acabados.
10. Con base en el diseño estadístico de dos factores, para una confiabilidad del 95 %, existe diferencia significativa en los porcentajes de expansión, analizados para diversas edades en barras de mortero según la norma ASTM C 227.
11. Con base en el diseño estadístico de dos factores, para una confiabilidad del 95 %, existe diferencia significativa en las resistencias a compresión mecánica, analizados para diversas edades en cubos de mortero según la norma ASTM C 109.

## RECOMENDACIONES

1. Al momento de utilizar la escoria de mata de níquel en combinación con el cemento UGC, ha de realizarse las moliendas necesarias de la misma para que se cumplan los requisitos de gradación.
2. Considerar que la escoria de mata de níquel no es un material pétreo o que provea la naturaleza, sino que es de carácter residual, por lo que se deberán realizar más estudios y determinar su posible uso en concretos y armaduras.
3. Realizar los estudios de reactividad potencial álcali-sílice con caracterizaciones similares a los análisis petrográficos y establecer el porqué de las expansiones fuera de especificación a edades tempranas (1, 3, 7 y 14 días), para las para las barras de mortero.
4. Realizar los estudios de resistencia a compresión mecánica con caracterizaciones similares a los análisis petrográficos y establecer por qué la reactividad álcali-sílice no influye a las resistencias a compresión mecánica evaluadas a edades tempranas (1, 3, 7 y 14 días), para los cubos de mortero.
5. Procurar el mejoramiento de la mezcla de cemento UGC y escoria de mata de níquel, con aditivaciones o adiciones para mejorar las expansiones a edades tempranas (1, 3, 7 y 14 días) sin afectar, las mismas, para edades avanzadas (28 y 56 días).





## BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ, Mariano. *Evaluación de la escoria de ferroníquel como agregado fino para concreto*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 150 p.
2. ASTM. *Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete*. USA: ASTM International, 2003. 155 p.
3. \_\_\_\_\_. *Standard specification for concrete aggregates. ASTM C 33-03*. Edition. 03. USA: ASTM International, 2003. 195 p.
4. \_\_\_\_\_. *Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method). ASTM C 289-03. Edition 03*. USA: ASTM International, 2003. 225 p.
5. \_\_\_\_\_. *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. Or [50-mm] Cube Specimens). ASTM C 109/C 109M-02. Edition 02*. USA: ASTM International, 2002. 135 p.
6. \_\_\_\_\_. *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. ASTM C 1157-03. Ed. 03*. USA: ASTM International, 2003. 115 p.

7. FERREIRA, Rui Miguel. *Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão. Tesis de maestro. [Dissertação]*. Universidad do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães, Braga, Portugal, 2000. 205 p.
8. Incotec cementos. *Arena normalizada para ensayos de cemento hidráulico. NTC 3937*. Bogotá, Colombia: INCOTEC, 2007. 89 p.
9. \_\_\_\_\_. *Especificaciones de los agregados para concreto. NTC 174. Quinta actualización*. Bogotá, Colombia: INCOTEC, 2000. 85 p.
10. \_\_\_\_\_. *Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. NTC 77. 2a ed.* Bogotá, Colombia: INCOTEC, 2007. 130 p.
11. \_\_\_\_\_. *Incotec determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm. NTC 220. 4a ed.* Bogotá, Colombia: INCOTEC, 2004. 115 p.
12. \_\_\_\_\_. *Incotec método de ensayo para la determinación de la reactividad potencial a los álcalis de las mezclas de cemento-agregado (método de la barra de mortero). NTC 3828*. Bogotá, Colombia: INCOTEC, 2009. 130 p.
13. JATURAPITAKKUL, Chai; KIATTIKOMOL, Kraiwood; SONGPIRIYAKIJ, Seksun. *A Study of Sthength Activity Index of Ground Coarse Fly Ash with Portland*. [En línea]. <ftp://ftp.ecn.purdue.ed>. [Consulta: 30 de noviembre de 2016].

14. LUNA; José; SALGUERO, Raúl. *Estudios de calidad de agregado para concreto aplicando las normas astm c-33, c-131, c-295 y c-289 (presentación de casos)*. Guatemala: Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004. 90 p.
15. MÉNDEZ ÁLVAREZ, Carlos Eduardo. *proceso de investigación: desarrollo*. 3a ed. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, 2001. 229 p.
16. MORETTI; Ludwin, FOURNIER, Bran. *A evolução e desenvolvimento dos ensayos laboratoriais na prevenção e avaliação da reação álcali-agregado*. Brasil: 52 Congreso Brasileño de Concreto, 2010. 120 p.
17. MENPHIS, Reyes. *Aplicación del diseño experimental en el desarrollo de las prácticas internas, en el área de operaciones unitarias*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 110 p.
18. PALAZZI, Suren; ANAYA, David. *Pautas para la utilización de agregados reactivos a la reacción álcali-sílice en estructuras de hormigón*. Universidad Nacional de Tucumán. 1998. 4 p.
19. SAMAYOA, Eber. *Evaluación de la escoria de ferroníquel para morteros de albañilería y acabados*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 120 p.

20. STRUBLE, Leslie. *Hydraulic Cements – Physical Properties*. New Jersey, United States of America: 2006. 448 p.
21. TOUMA, Wissam Elias. *Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*. Co-Supervisor. *Doctoral Tesis. [Dissertation]*. Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin. 2000. p.
22. WALPOLE; Ross; MYERS; Seksun. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana S. A., 1999. 752 p.

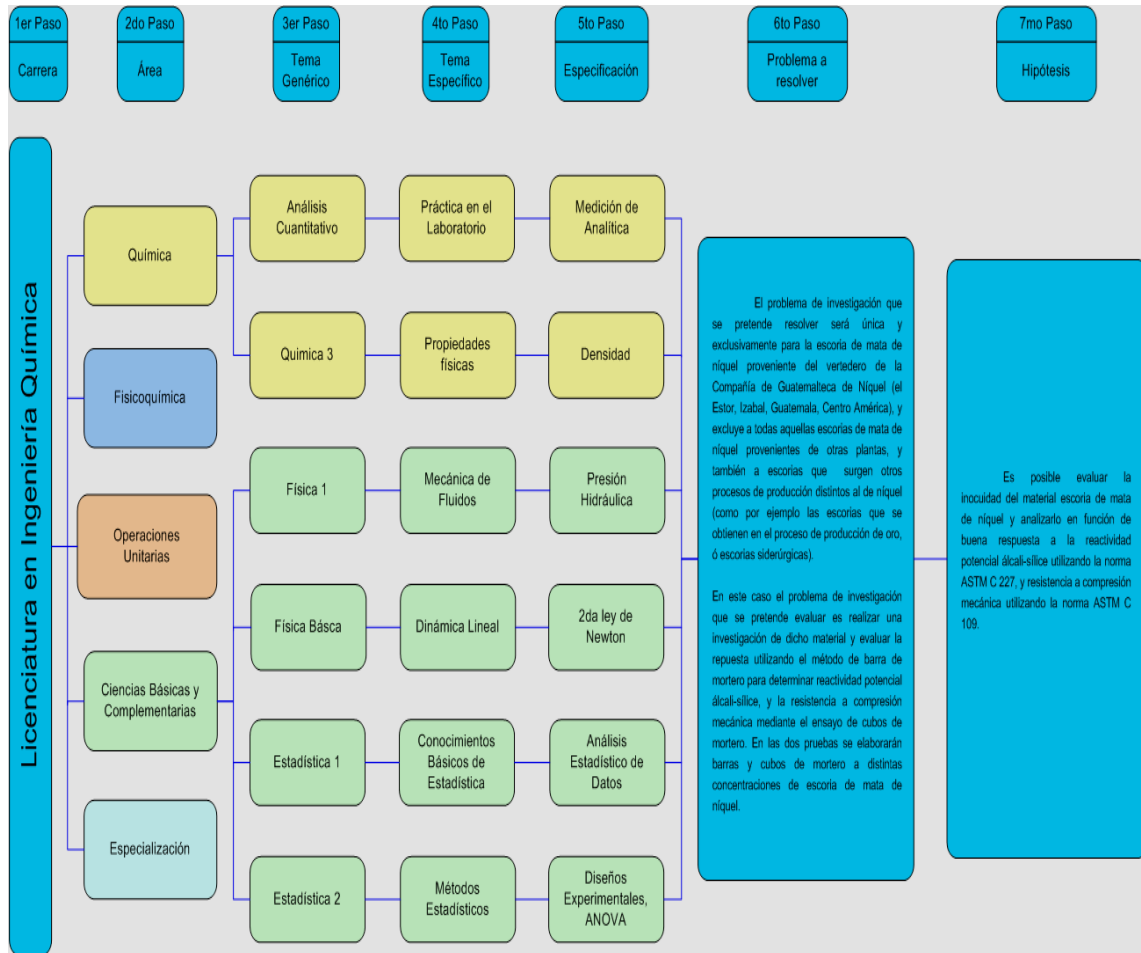
## APÉNDICES

- Apéndice 1. **Calculadora voyage 200, dispositivo para recolectar información en tiempo real**



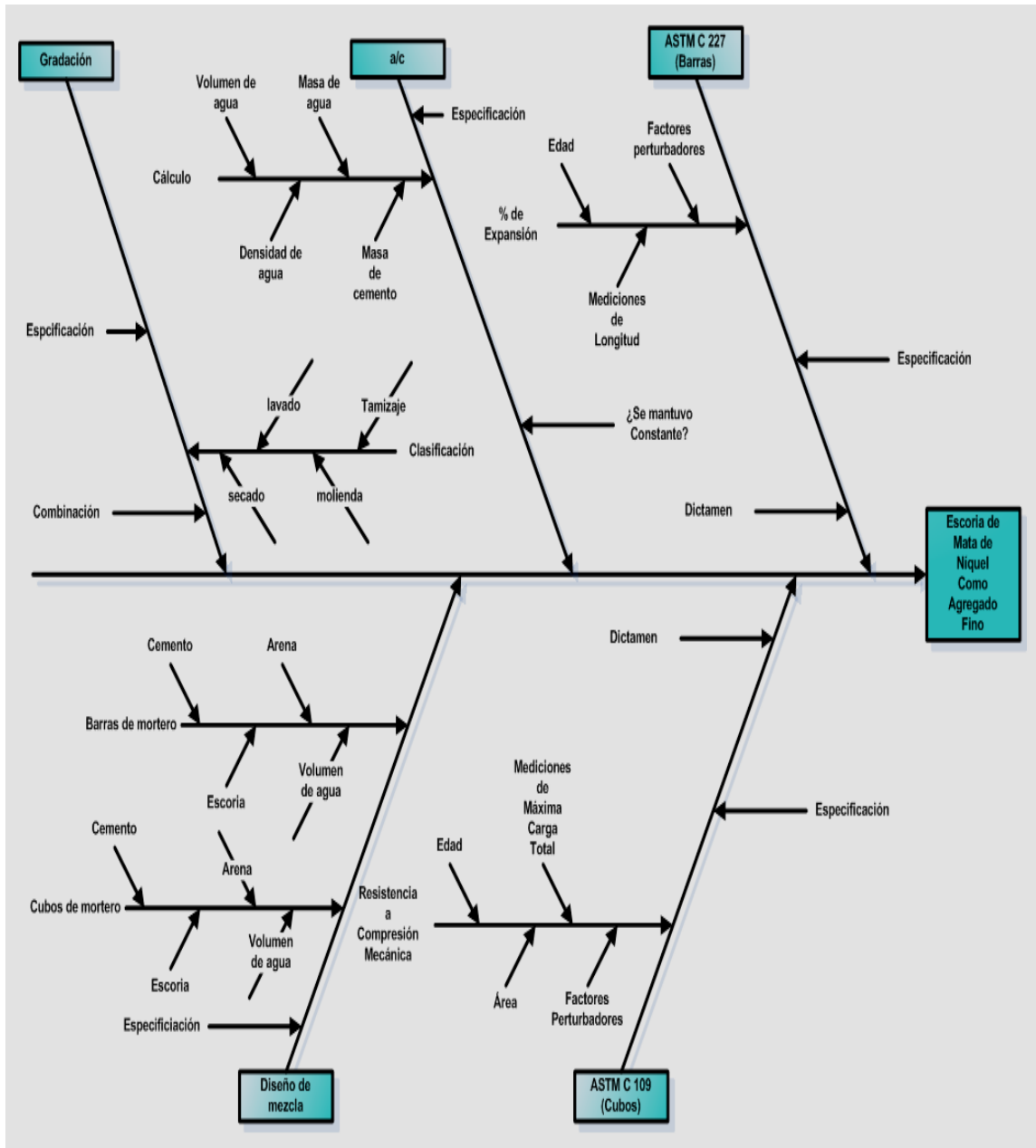
Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Tabla de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.





# ANEXOS

## Anexo 1. Certificado 1



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



**MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA REACTIVIDAD POTENCIAL  
ALCALINA DE COMBINACIONES DE CEMENTO Y AGREGADOS  
(MÉTODO BARRA DE MORTERO)**

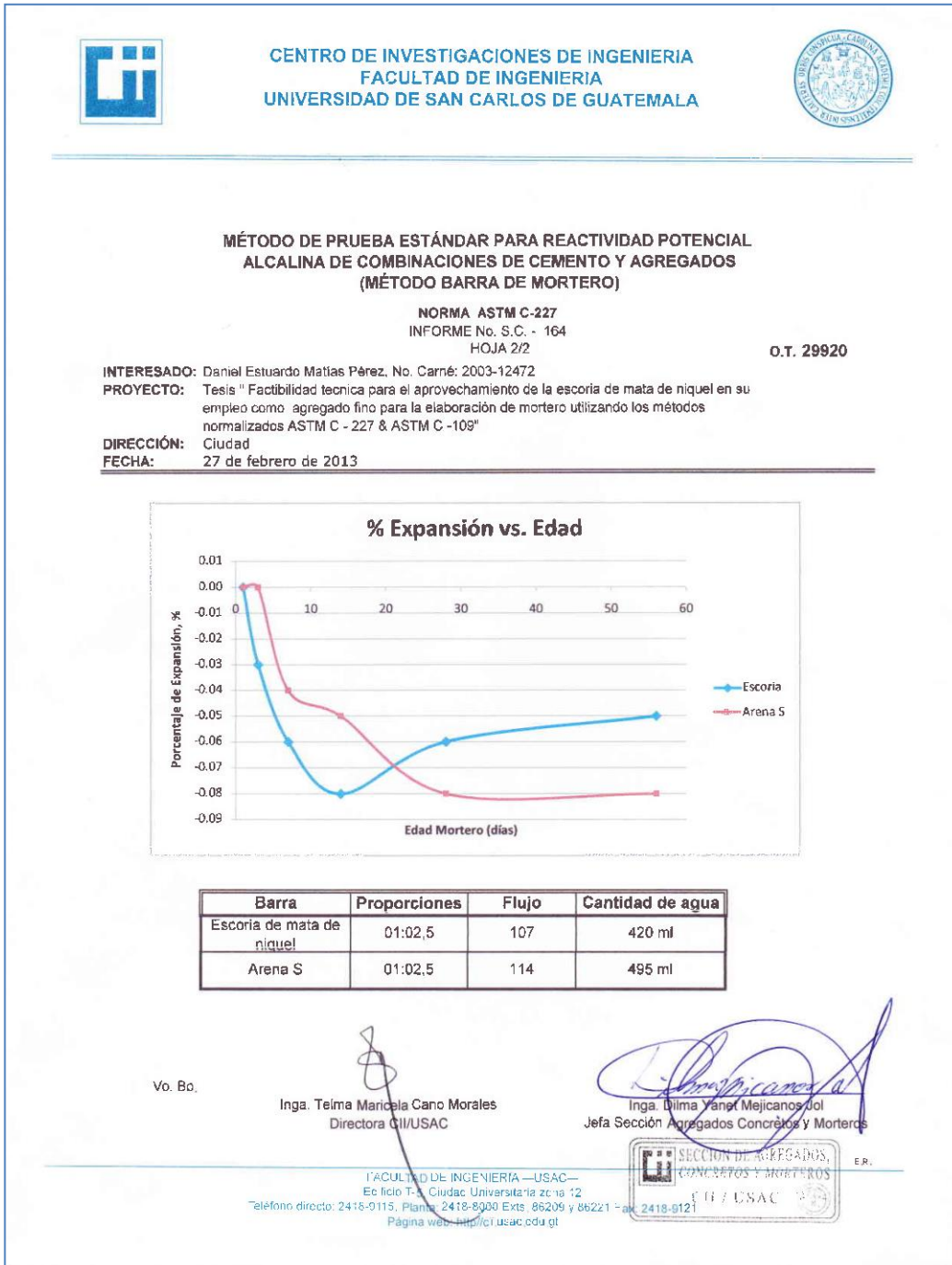
NORMA ASTM C-227  
INFORME No. S.C. - 164  
HOJA 1/2

O.T. 29920

**INTERESADO:** Daniel Estuardo Matias Pérez, No. Carné: 2003-12472  
**PROYECTO:** Tesis " Factibilidad tecnica para el aprovechamiento de la escoria de mata de níquel en su empleo como agregado fino para la elaboración de mortero utilizando los métodos normalizados ASTM C - 227 & ASTM C -109"  
**DIRECCIÓN:** Ciudad  
**FECHA:** 27 de febrero de 2013

MEZCLA EN ESTUDIO					MEZCLA PATRON				
t	Lxo	Lxi	%	media %	t	Lxo	Lxi	%	media %
1	4,518	4,518	0,000	0,00	1	2,845	2,845	0,000	0,00
	3,994	3,994	0,000			2,832	2,832	0,000	
	4,436	4,436	0,000			2,840	2,840	0,000	
3	4,518	4,498	-0,008	-0,03	3	2,845	2,860	0,006	0,00
	3,994	3,942	-0,021			2,832	2,826	-0,002	
	4,436	4,248	-0,075			2,840	2,844	0,002	
7	4,518	4,318	-0,080	-0,06	7	2,845	2,758	-0,035	-0,04
	3,994	3,954	-0,016			2,832	2,692	-0,056	
	4,436	4,248	-0,075			2,840	2,748	-0,037	
14	4,518	4,324	-0,078	-0,08	14	2,845	2,750	-0,038	-0,05
	3,994	3,836	-0,063			2,832	2,672	-0,064	
	4,436	4,202	-0,094			2,840	2,748	-0,037	
28	4,518	4,362	-0,062	-0,06	28	2,845	2,660	-0,074	-0,08
	3,994	3,844	-0,060			2,832	2,594	-0,095	
	4,436	4,290	-0,058			2,840	2,626	-0,086	
56	4,518	4,392	-0,050	-0,05	56	2,845	2,658	-0,075	-0,08
	3,994	3,858	-0,054			2,832	2,646	-0,074	
	4,436	4,294	-0,057			2,840	2,648	-0,077	

Continuación del anexo1.



Fuente: Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, USAC.

## Anexo 2. Certificado 2



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



### DISEÑO DE MEZCLAS Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTERO

**NORMA ASTM C-109**  
INFORME No. S.C. - 490  
HOJA 1/1

O.T. No. 29917

**INTERESADO:** Daniel Estuardo Matías Pérez; Carné 200312472

**PROYECTO:** Tesis "Factibilidad Técnica para el aprovechamiento de la Escoria de Mata de Niquel en su empleo como Agregado Fino para la Elaboración de Mortero utilizando los métodos Normalizados ASTM C-227 & ASTM C-109"

**DIRECCIÓN:** Ciudad

**FECHA:** 09 de Julio de 2013

**RESULTADO:**

ENSAYO	RESULTADOS
Proporción (Cemento : Escoria)	1 : 2.75
Flujo	106
Relación A/C	0,608
Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )(PSI)	1 día (35,20) (500,62)
	3 días (73,79) (1049,51)
	7 días (94,85) (1349,15)
	14 días (120,91) (1719,70)
	28 días (149,38) (2124,64)
	56 días (171,34) (2436,96)

**OBSERVACIONES:**

- Muestra identificada como : Arena de Silice DMI
- Ensayos realizados por el estudiante y supervisado por el laboratorista encargado.

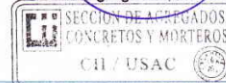
ATENTAMENTE,

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: 2418-8620 Fxs. 86206 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: fti/cii.usac.edu.gt

Fuente: Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, USAC.

## Apéndice 5. Certificado 3



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



---

**DISEÑO DE MEZCLAS Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTERO**  
**NORMA ASTM C-109**  
INFORME No. S.C. - 005  
**HOJA 1/1** O.T. No. **29918**

**INTERESADO:** Daniel Estuardo Matías Pérez, Carné 200312472

**PROYECTO:** Tesis "Factibilidad Técnica para el aprovechamiento de la Escoria de Mata de Níquel en su empleo como Agregado Fino para a Elaboración de Mortero utilizando los métodos Normalizados ASTM C-227 & ASTM C-109"

**DIRECCIÓN:** Ciudad

**FECHA:** 16 de enero de 2013

---

**RESULTADO:**

ENSAYO		RESULTADOS	
Proporción (Cemento : Escoria)		1 : 2.75	
Flujo		106	
Relación A/C		0.608	
Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )(PSI)	1 día	(61.86)	(879.91)
	3 días	(110.38)	(1569.95)
	7 días	(184.04)	(2617.69)
	14 días	(249.14)	(3543.56)
	28 días	(289.11)	(4112.09)
	56 días	(294.58)	(4189.89)

**OBSERVACIONES:**

a) Muestra identificada como : Escoria de mata de Níquel DM5  
b) Ensayos realizados por el estudiante y supervisado por el laboratorista encargado.

ATENTAMENTE,

Vo.Bo.



Inga. Telma Maricela Cano Morales  
Directora CII/USAC



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



EMG

---

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: Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, USAC.