

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ESTUDIO DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO DE ALTA  
RESISTENCIA INICIAL POR PUZOLANA DE CENIZA VOLCÁNICA  
EN EL DISEÑO DE HORMIGÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**ERIK PATRICIO CASTRO SOLANO**

erigo96@hotmail.com

**DIRECTOR ING. EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACÍS TRONCOSO**

mercedes.villacis@epn.edu.ec

**Quito, julio 2020**

## **CERTIFICACIÓN**

Como director del trabajo de titulación “Estudio de la sustitución parcial de cemento de alta resistencia inicial por puzolana de ceniza volcánica en el diseño de hormigón” desarrollado por Erik Patricio Castro Solano, estudiante de la carrera de ingeniería civil, habiendo supervisado la realización de este trabajo y realizado las correcciones correspondientes, doy por aprobada la redacción final del documento escrito para que prosiga con los trámites correspondientes a la sustentación de la Defensa oral.

---

**ING. EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACÍS TRONCOSO, MSc.**  
**DIRECTORA**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo, Erik Patricio Castro Solano, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**ERIK PATRICIO CASTRO SOLANO**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme fortaleza y valor para lograr cada meta que me he propuesto.

A mi madre Guadalupe, quien ha sido parte fundamental de mi vida y todo el proyecto que he construido. Por ser una mujer valiente, honesta, trabajadora y sobre todo por siempre estar presente con sus palabras y su cariño para sus hijos.

A mi hermanita Pao, quien siempre supo apoyarme y ayudarme a levantarme en cada dificultad, con sus palabras y su ánimo. Por brindarme su aliento, y sus ganas de verme alcanzar este sueño.

A mi tío Francisco y su familia, por acogerme, estar al pendiente de mi bienestar y apoyarme a cumplir este logro.

A mi papá Wilson, por brindarme su confianza y su apoyo en cada etapa de esta meta alcanzada.

A la Ing. Mercedes Villacís, quien me ha brindado sus conocimientos, ha brindado su apoyo y su disposición para culminar este proyecto.

A cada una de las personas que conforman el LEMSUR, Ing. Paúl, Ing. Lis, Kari, Francisco, Gabriel, David, Andreita y Don Fredy, quienes han apoyado este proyecto.

A Kari, la mejor amiga que pude conocer a lo largo de mi vida estudiantil.

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios, quien siempre ha estado presente para alcanzar  
cada una de mis metas.

A mi mamá Guadalupe Solano, quien me ha apoyado y me ha brindado su amor  
incondicional.

A mi hermana Pao, por acompañarme y brindarme su fortaleza.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN .....	II
DECLARACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
DEDICATORIA.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	VIII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XVI
RESUMEN .....	XVII
ABSTRACT .....	XVIII
CAPÍTULO I .....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. ANTECEDENTES.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL .....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4. ALCANCE .....	4
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	5
CAPÍTULO II .....	6
FUNDAMENTO TEÓRICO.....	6
2.1. MATERIALES QUE CONFORMAN EL HORMIGÓN.....	6
2.1.1. CEMENTO .....	7
2.1.2. AGREGADO GRUESO.....	9
2.1.3. AGREGADO FINO.....	12
2.1.4. AGUA.....	14

2.2. PUZOLANA.....	14
CAPÍTULO III .....	18
METODOLOGÍA DE PRUEBAS DE LABORATORIO.....	18
3.1. ENSAYOS DE LABORATORIO EN EL CEMENTO.....	18
3.2. ENSAYOS DE LABORATORIO DE AGREGADO GRUESO.....	26
3.3. ENSAYOS DE LABORATORIO DE AGREGADO FINO.....	39
CAPÍTULO IV .....	51
DISEÑO DE PATRONES DE ANÁLISIS.....	51
4.1. DISEÑO DE CONCRETO MÉTODO ACI.....	51
4.2. PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACIÓN.....	52
4.3. ENSAYOS DE LABORATORIO.....	64
CAPÍTULO V .....	87
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	87
5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.....	87
5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PASTA DE CEMENTO.....	87
5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PROBETAS DE HORMIGÓN.....	91
CAPÍTULO VI.....	102
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	102
6.1. CONCLUSIONES .....	102
6.2. RECOMENDACIONES.....	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	108
REFERENCIAS.....	108
ANEXOS .....	114

**ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS**

FOTOGRAFÍA 2.1.1 RIPIO (AG-01).....	11
FOTOGRAFÍA 2.1.2 CANTERA GUAYLLABAMBA .....	13
FOTOGRAFÍA 3.1.1 MEZCLADORA MECÁNICA PLANETARIA .....	23
FOTOGRAFÍA 3.2.1 PREPARACIÓN ESTADO S.S.S. DE RIPIO.....	28
FOTOGRAFÍA 3.2.2 PRUEBA DE DENSIDAD APARENTE DEL RIPIO .....	30
FOTOGRAFÍA 3.3.1 ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN EN ARENA (AF -01) .....	41
FOTOGRAFÍA 3.3.2 COMPARACIÓN DE AGREGADO FINO CON ESCALA DE GARDNER.....	47
FOTOGRAFÍA 4.2.1 CILÍNDROS EN LA CÁMARA DE CURADO.....	61
FOTOGRAFÍA 4.3.1 ENSAYO DE CILINDROS A COMPRESIÓN.....	68
FOTOGRAFÍA 4.3.2 ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD CON EXTENSÓMETROS .....	69

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 2.1.1 CEMENTO ARMADURO.....	8
ILUSTRACIÓN 2.2.1 ESQUEMA REACCIÓN PUZOLÁNICA.....	16
ILUSTRACIÓN 2.2.2 SECTOR UBICADO CERCA AL OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO TUNGURAHUA .....	17
ILUSTRACIÓN 4.3.1 ESQUEMA DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	66
ILUSTRACIÓN 4.3.2 CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN PARA DETERMINAR MÓDULO DE YOUNG POR EL CRITERIO DE LA SECANTE.....	70
ILUSTRACIÓN 5.2.1 ESQUEMA DE PARTÍCULAS DE PUZOLANA EN PASTA DE CEMENTO. ....	89

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 3.2.1 CURVA GRANULOMÉTRICA DE RIPIO PROVENIENTE DE GUAYLLABAMBA (AG-01).....	39
GRÁFICA 3.3.1 CURVA GRANULOMÉTRICA DE AGREGADO FINO PROVENIENTE DE CANTERA GUAYLLABAMBA (AF-01).....	49
GRÁFICA 4.3.1 CURVA DE RESISTENCIA-TIEMPO EN DOSIFICACIÓN PATRÓN DE 14 MPA.....	73
GRÁFICA 4.3.2 CURVA DE RESISTENCIA-TIEMPO EN DOSIFICACIÓN CON 5% DE PUZOLANA DE 14 MPA.....	74
GRÁFICA 4.3.3 CURVA DE RESISTENCIA-TIEMPO EN DOSIFICACIÓN CON 10% DE PUZOLANA DE 14 MPA.....	75
GRÁFICA 4.3.4 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO EN DOSIFICACIÓN CON 15% DE PUZOLANA DE 14 MPA.....	76
GRÁFICA 4.3.5 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO PARA DOSIFICACIÓN CON 20% DE PUZOLANA DE 14 MPA.....	77
GRÁFICA 4.3.6 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO PARA DOSIFICACIÓN PATRÓN DE 24 MPA.....	78
GRÁFICA 4.3.7 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO PARA DOSIFICACIÓN CON 5% DE PUZOLANA DE 24 MPA.....	79
GRÁFICA 4.3.8 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO PARA DOSIFICACIÓN CON 10% DE PUZOLANA DE 24 MPA.....	80
GRÁFICA 4.3.9 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO PARA DOSIFICACIÓN CON 15% DE PUZOLANA DE 24 MPA.....	81
GRÁFICA 4.3.10 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO PARA DOSIFICACIÓN CON 20% DE PUZOLANA DE 24 MPA.....	82
GRÁFICA 5.2.1 VARIACIÓN DE CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO CON REEMPLAZO DE PUZOLANA.....	88
GRÁFICA 5.2.2 TIEMPOS DE FRAGUADO DE CEMENTO CON INCLUSIÓN DE PUZOLANA .....	90

GRÁFICA 5.3.1 CURVA DENSIDAD VS PORCENTAJE DE PUZOLANA REEMPLAZADA EN DOSIFICACIONES DE 14 Y 24 MPA.....	92
GRÁFICA 6.1.1 VALORES DE F'C MÁXIMA ALCANZADA A LOS 28 DÍAS PARA DOSIFICACIONES DE 14 Y 24 MPA .....	104

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1.1 PROPIEDADES EVALUADAS EN LA PASTA DE CEMENTO Y HORMIGÓN .....	6
TABLA 3.1.1 PROPIEDADES DE CEMENTO ARMADURO.....	25
TABLA 3.1.2 PROPIEDADES DE CEMENTO CON REEMPLAZO DE PUZOLANA .....	26
TABLA 3.2.1 MUESTREO DEL AGREGADO GRUESO (RIPIO).....	32
TABLA 3.2.2 TABLA DE GRADACIÓN RECOMENDADA PARA AGREGADOS GRUESOS.....	33
TABLA 3.2.3 GRADACIÓN DE LA MUESTRA PARA PARTÍCULAS MENORES A 37.5MM .....	36
TABLA 3.2.4 PROPIEDADES DEL RIPIO ENSAYADO (AG-01).....	38
TABLA 3.3.1 VALORES ESCALA DE GARDNER .....	48
TABLA 3.3.2 PROPIEDADES DE LA ARENA EMPLEADA (AF-01).....	48
TABLA 3.3.3 GRADACIÓN RECOMENDABLE PARA AGREGADO FINO .....	50
TABLA 4.2.1 CONSISTENCIAS ESPERADAS EN HORMIGÓN FRESCO .....	52
TABLA 4.2.2 ASENTAMIENTOS RECOMENDADOS DE ACUERDO A LOS ELEMENTOS DISEÑADOS.....	53
TABLA 4.2.3 TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO DE ACUERDO A LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES .....	54
TABLA 4.2.4 CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO POR METRO CÚBICO REQUERIDA ACORDE AL TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO GRUESO Y ASENTAMIENTO DESEADO.....	55
TABLA 4.2.5 VALORES DE RELACIÓN AGUA-CEMENTO PARA DISEÑO EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA .....	56
TABLA 4.2.6 ESTIMACIÓN DE VOLUMEN APARENTE DEL ÁRIDO GRUESO (RIPIO) PARA 1 M <sup>3</sup> DE CONCRETO .....	58
TABLA 4.2.7 VALORES UTILIZADOS EN DOSIFICACIÓN DE 14 MPA.....	61

TABLA 4.2.8 CANTIDAD DE MATERIAL PARA 1 M <sup>3</sup> DE HORMIGÓN DE 14 MPA.....	62
TABLA 4.2.9 VALORES UTILIZADOS EN DOSIFICACIÓN DE 24 MPA.....	62
TABLA 4.2.10 CANTIDAD DE MATERIAL PARA 1 M <sup>3</sup> DE HORMIGÓN DE 24 MPA.....	63
TABLA 4.2.11 DOSIFICACIÓN PARA 1 M <sup>3</sup> CON REEMPLAZO DE PUZOLANA .....	63
TABLA 4.3.1 FORMAS DE FALLAS CARACTERÍSTICAS DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE HORMIGÓN ENSAYADOS A COMPRESIÓN SIMPLE.....	66
TABLA 4.3.2 VALORES PROMEDIO (20 CILINDROS) DE DENSIDADES PARA CILINDROS DE 14 MPA.....	72
TABLA 4.3.3 VALORES PROMEDIO (20 CILINDROS) DE DENSIDADES PARA CILINDROS DE 24 MPA.....	72
TABLA 4.3.4 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN PATRÓN DE 14 MPA.....	73
TABLA 4.3.5 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 5% DE PUZOLANA DE 14 MPA.....	74
TABLA 4.3.6 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 10% DE PUZOLANA DE 14 MPA.....	75
TABLA 4.3.7 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 15% DE PUZOLANA DE 14 MPA.....	76
TABLA 4.3.8 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 20% DE PUZOLANA DE 14 MPA.....	77
TABLA 4.3.9 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN PATRÓN DE 24 MPA.....	78
TABLA 4.3.10 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 5% DE PUZOLANA DE 24 MPA.....	79
TABLA 4.3.11 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 10% DE PUZOLANA DE 24 MPA.....	80

TABLA 4.3.12 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 15% DE PUZOLANA DE 24 MPA.....	81
TABLA 4.3.13 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 20% DE PUZOLANA DE 24 MPA.....	82
TABLA 4.3.14 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN PATRÓN DE 14 MPA. ....	83
TABLA 4.3.15 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 14 MPA CON 5% DE PUZOLANA.....	83
TABLA 4.3.16 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 14 MPA CON 10% DE PUZOLANA.....	83
TABLA 4.3.17 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 14 MPA CON 15% DE PUZOLANA.....	84
TABLA 4.3.18 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 14 MPA CON 20% DE PUZOLANA.....	84
TABLA 4.3.19 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN PATRÓN DE 24 MPA. ....	84
TABLA 4.3.20 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 24 MPA CON 5% DE PUZOLANA.....	85
TABLA 4.3.21 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 24 MPA CON 10% DE PUZOLANA.....	85

TABLA 4.3.22 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 24 MPA CON 15% DE PUZOLANA.....	85
TABLA 4.3.23 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 24 MPA CON 20% DE PUZOLANA.....	86
TABLA 4.3.24 MÓDULOS DE ELASTICIDAD POR MÉTODO DEL ACI .....	86
TABLA 5.2.1 VALORES DE CONSISTENCIA NORMAL DE CEMENTO CON INCLUSIÓN DE PUZOLANA.....	87
TABLA 5.3.1 RESUMEN DE DENSIDADES DE HORMIGÓN PROMEDIO (20 CILÍNDROS).....	91
TABLA 5.3.2 CUADRO DE RESUMEN DE RESISTENCIAS PROMEDIO PARA DOSIFICACIÓN DE 14 MPA.....	93
TABLA 5.3.3 RESUMEN DE RESISTENCIAS PROMEDIO PARA DOSIFICACIÓN DE 24 MPA.....	96
TABLA 5.3.4 RESUMEN DE MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA DOSIFICACIÓN DE 14 MPA.....	99
TABLA 5.3.5 RESUMEN DE MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA DOSIFICACIÓN DE 24 MPA.....	100
TABLA 6.1.1 PORCENTAJE DE RESISTENCIAS ALCANZADAS A LOS 28 DÍAS PARA DOSIFICACIONES DE 14 Y 24 MPA.....	103

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I . RESULTADOS DE ENSAYOS DE DENSIDAD REAL Y APARENTE DEL CEMENTO ARMADURO EJECUTADOS EN EL LEMSUR.....	115
ANEXO II . RESULTADOS DE ENSAYOS DE CONSISTENCIA NORMAL Y TIEMPOS DE FRAGUADO DEL CEMENTO ARMADURO EJECUTADOS EN EL LEMSUR. ....	116
ANEXO III . RESULTADOS DE ENSAYOS DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE ARENA (AF-01) EJECUTADOS EN EL LEMSUR.....	118
ANEXO IV . RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA ARENA (AF-01) EJECUTADOS EN EL LEMSUR. ....	119
ANEXO V . RESULTADOS DE ENSAYOS DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL RIPIO (AG-01) EJECUTADOS EN EL LEMSUR.....	120
ANEXO VI . RESULTADO DE ENSAYO DE COLORIMETRÍA (CONTENIDO ORGÁNICO) DEL RIPIO (AG-01) EJECUTADO EN EL LEMSUR.....	121
ANEXO VII . RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN DEL RIPIO (AG-01) EJECUTADO EN EL LEMSUR. ....	122
ANEXO VIII . RESULTADOS DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN EJECUTADOS EN EL LEMSUR. ....	123
ANEXO IX . RESULTADOS DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN MONOAXIAL DE HORMIGÓN EJECUTADOS EN EL LEMSUR. ....	134

## RESUMEN

El propósito del presente proyecto de investigación es realizar la evaluación del comportamiento de hormigón diseñado con reemplazo de puzolana de origen volcánico por cemento con propiedades de alta resistencia inicial, para determinar parámetros del desarrollo del proceso de fraguado en el hormigón.

El proyecto de investigación permite obtener una base de información, acerca del comportamiento que tiene el hormigón diseñado con cemento ARMADURO, el cual provee la característica de alta resistencia inicial, con el reemplazo de puzolana de origen volcánico en dosificaciones normales de hormigón, mediante la evaluación de características como son los tiempos de fraguado de la pasta de cemento y la consistencia normal que presenta.

Las propiedades físicas del cemento y de agregados; fueron analizadas y evaluadas, lo que permitió desarrollar dosificaciones en base al método del ACI 211.1 para resistencias de  $f'c = 14$  y  $24$  MPa. Con reemplazo en peso de cemento por porcentajes del 5, 10, 15 y 20% por puzolana de origen volcánico para observar la variabilidad de las propiedades obtenidas.

Debido a la característica del cemento ARMADURO de alta resistencia inicial, las pruebas de compresión simple en probetas de hormigón se ejecutaron en lapsos desde 3, 7, 14 hasta los 28 días desde la fabricación, con el objetivo de evaluar el desarrollo de cada una de las diferentes dosificaciones, mediante ensayos para obtener módulos de elasticidad y compresión.

**Palabras clave:** Puzolana de origen volcánico. Alta resistencia inicial. Fraguado del cemento.

## ***ABSTRACT***

This research project has as objective to appraise the concrete behavior designed with volcanic origin pozzolan replacement with high initial resistant cement, to determinate parameters of the development of the setting process in concrete.

The research project allows to obtain an information base, about the behavior of the concrete designed with ARMADURO cement, which provides the characteristic of high initial resistance, with the replacement of volcanic pozzolana in normal concrete dosages, through the evaluation of characteristics such as normal consistency and setting times of cement.

An analysis of the physical properties of cement and aggregates were performed, these values allowed to develop dosages based on the method of ACI 211.1, for resistances of  $f'c = 14$  and  $24$  MPa. With replacement in percentages of 5, 10, 15, 20% of cement weight per pozzolan to observe the variability of the properties obtained.

Due to the characteristic of the ARMADURO cement with high initial resistance, simple compression tests on concrete specimens are carried out in lapses from 3, 7, 14 to 28 days after manufacturing, with the objective of evaluating the development of each of the different dosages, through tests to obtain elasticity modules and compression.

**Keywords:** Volcanic origin pozzolana. High initial resistant. Cement setting.

# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

### 1.1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el sector constructivo se ha visto con la necesidad de mejorar o elaborar nuevas formas de fabricar hormigón con diferentes características para solventar las necesidades presentes en los diversos requerimientos técnicos en obras civiles. Entre los parámetros variables, que se puede optar está la utilización de nuevos materiales llamados complementarios o suplementarios en el hormigón, como por ejemplo, es el uso de puzolanas de origen volcánico, cuyo principal valor radica, en la aptitud presente para formar productos hidratados con propiedades conglomerantes, las cuales les hacen un componente con bastante valor sobre la mezcla de concreto al poder utilizarlas como aditivo o como suplemento en el mismo (Soria Santamaria, 1983).

Los materiales cementicios suplementarios (MCS) son ampliamente utilizados para reemplazar parcialmente el cemento, para mejorar ciertas propiedades y reducir el costo del hormigón. En China, los principales materiales de cemento suplementarios en concreto contienen cenizas volantes, escoria de alto horno y deben considerarse que la composición de los materiales cementosos tiene considerables efectos sobre las propiedades del hormigón (Liu, 2010).

En este contexto, el presente proyecto de investigación, plantea el análisis comparativo de probetas diseñadas con dosificaciones de hormigón, que reemplazan parcialmente el cemento de alta resistencia inicial por porcentajes de puzolana de origen volcánico; con la finalidad de poder establecer propiedades de las mezclas, como el tiempo de fraguado que constituye la característica fundamental para este tipo de cemento. Adicionalmente se evalúa los valores de los módulos de elasticidad o de Young y resistencia a la compresión mediante

probetas de hormigón. Dichas propiedades ayudarán a establecer la viabilidad técnica de la utilización de las dosificaciones con valores de reemplazo de cemento por puzolana de origen volcánico.

## **1.2. ANTECEDENTES**

En el transcurso del tiempo, la necesidad del ser humano por optimizar los procesos de construcción, ha llevado a la búsqueda de nuevas formas de elaborar uno de los materiales más importantes en el medio constructivo como lo es el hormigón. Por tal motivo, la utilización de materiales que permitan reemplazar parcialmente el cemento en el proceso de fabricación de concreto se ha convertido en una realidad, como es el uso de cenizas volantes o diferentes tipos de puzolanas naturales, como es el caso de la ceniza volcánica.

Debido a la ubicación geográfica del Ecuador, existen grandes depósitos de piedra pómez, pumitas y puzolanas, que están considerados entre los 10 más grandes del planeta. Dichos depósitos se localizan alrededor de chimeneas volcánicas extintas que conforman grandes colinas. (Cornejo, 2016) La gran presencia local de este material permitiría su obtención y utilización en obras civiles, especialmente en provincias de la región interandina del país.

La mayoría de los cementos desarrollados y utilizados a nivel nacional son de tipo Portland Puzolánicos; es decir, que la puzolana incluida está comprendida en un 40% de la masa del material cementicio, como lo define la norma NTE INEN 490, (INEN, NTE INEN 490. Cementos Hidráulicos Compuestos. Requisitos, 2011), esto se debe a que las principales empresas de fabricación y distribución de cemento, utilizan depósitos de origen volcánico para su proceso de fabricación.

La empresa UNACEM distribuye el cemento ARMADURO especial, el cual es un cemento hidráulico, Puzolánico tipo IP, que se caracteriza principalmente por su capacidad para elaborar hormigón con la propiedad de alta resistencia inicial, lo cual lo convierte en un material idóneo para el proyecto desarrollado.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar las propiedades físico-mecánicas del hormigón con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento de alta resistencia inicial, por puzolana de ceniza volcánica mediante ensayos de resistencia en laboratorio, para estudiar la viabilidad de la sustitución en dosificaciones de hormigón.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar las propiedades mecánicas y físicas de los materiales agregados componentes que se disponen dentro de la mezcla de concreto, por medio de ensayos de laboratorio para realizar las diferentes dosificaciones de hormigón, incorporando los porcentajes de puzolana volcánica.
- Realizar un análisis comparativo de los valores de consistencia normal de cemento y tiempos de fraguado, de acuerdo a la incidencia de la incorporación de los diferentes porcentajes de peso, de reemplazo de cemento por puzolana.
- Establecer las dosificaciones de hormigón para diseñar los cilindros patrón, mediante la utilización de los métodos descritos en el ACI 211.1, para posteriormente comparar la variabilidad en las propiedades físico-mecánicas con dosificaciones reemplazando porcentajes en peso de cemento por ceniza volcánica.

## 1.4. ALCANCE

Los procesos de dosificación respecto a las cantidades de cada material se detallan de acuerdo a normas establecidas en el ACI 211.1, en su manual de diseño de hormigones para diferentes fines, en dicha norma se presentan criterios de valores y caracterización de los materiales que deben cumplir de acuerdo a las normas ASTM, que a su vez cumplen con la normativa nacional INEN.

Los resultados obtenidos de cada parámetro se realizarán de acuerdo a pruebas de laboratorio, mediante procedimientos normados, los cuales podrán asegurar valores consistentes dentro del proceso de dosificación que deberán satisfacer las resistencias establecidas en el presente proyecto.

Las variables principales a considerar son los materiales que componen la dosificación de hormigón. Para determinar los tiempos de fraguado y alcanzar una alta resistencia a temprana edad se usará cemento portland puzolánico ARMADURO especial de la empresa UNACEM, cuya característica es su alta resistencia inicial en condiciones normales (UNACEM, 2011). Los agregados pétreos provienen de la cantera Guayllabamba ubicada en la provincia de Pichincha, al costado del cauce del Río Guayllabamba en la vía Calderón-Guayllabamba. La puzolana volcánica a ser utilizada proviene de las formaciones geológicas localizadas próximas al Observatorio Vulcanológico del Tungurahua del Instituto Geofísico de la EPN, con coordenadas UTM: 17 M – 778651E -9849744N

Para observar la variabilidad que presentan las dosificaciones con diferentes cantidades de reemplazo de puzolana se optó por realizar el diseño para una resistencia esperada a los 28 días. Esto es debido, a que las curvas de “resistencia vs tiempo” en pruebas de compresión simple de probetas de dosificaciones normales de hormigón se mantienen en crecimiento hasta los 28 días, aunque debido a la naturaleza del cemento, el hormigón puede llegar a la resistencia esperada en un lapso menor tiempo y esto puede variar de acuerdo a la cantidad de puzolana reemplazada por cemento en cada dosificación.

## 1.5. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la utilización de materiales suplementarios o complementarios en el diseño de hormigón, es una realidad que ofrece gran variabilidad y flexibilidad de acuerdo a las necesidades del uso de la obra civil o método constructivo, por tal motivo existe la importancia de determinar las posibles variaciones en los parámetros esperados del hormigón diseñado (National Ready Mixed Concrete, 2010).

Uno de los parámetros principalmente esperados en el momento de realizar una dosificación de hormigón, es la resistencia a la compresión del mismo, pero no es el único. En el presente proyecto se establecerán además otros parámetros importantes a ser evaluados en la composición de cemento con puzolana como son los valores de tiempos de fraguado, tiempo en alcanzar la resistencia deseada y módulos de elasticidad (Gaspar, 2000).

Los parámetros determinados permitirían una mejor comprensión de las interacciones existentes en el momento de realizar hormigones con inclusión o reemplazo de puzolanas de origen volcánico y su desarrollo a lo largo del tiempo de fabricación del hormigón.

En la práctica, las aplicaciones en las que los valores y las conclusiones obtenidas de este proyecto de investigación podrán aportar, contemplan diseñar concretos con reemplazo de cemento por puzolanas naturales, fabricación de bloques de hormigón y morteros, además que podrá, de forma indirecta, mejorar la situación económica de las personas que trabajan en el campo de la construcción reduciendo en cierto porcentaje el uso del cemento y por ende el costo de sus productos. (Jaigua & Vázquez, 2010)

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1. MATERIALES QUE CONFORMAN EL HORMIGÓN

Los materiales agregados conforman las tres cuartas partes de la dosificación en peso, por tanto, es indispensable para el estudio del hormigón determinar las características físicas de estos materiales para poder realizar la estimación de la dosificación de los materiales en la mezcla del concreto, obteniendo un hormigón de resistencia consistente al esperado en el proceso establecido en la norma del ACI 211.11, (ACI 211, 1991). Por tal razón, es importante obtener las características físicas de los componentes del hormigón, de igual importancia con las propiedades resultantes del hormigón fresco y endurecido que serán evaluadas en el proyecto:

**TABLA 2.1.1 PROPIEDADES EVALUADAS EN LA PASTA DE CEMENTO Y HORMIGÓN**

<b>PROPIEDADES EVALUADAS DE LA PASTA DE CEMENTO</b>		
Consistencia normal de la pasta cemento.	Tiempo inicial del fraguado del cemento.	Tiempo final del fraguado del cemento.
<b>PROPIEDADES EVALUADAS DEL HORMIGÓN ENDURECIDO</b>		
Densidad.	Resistencia a la compresión simple en cilindros.	Módulo de elasticidad del hormigón.

ELABORADO POR: Erik Castro

La presente investigación evalúa principalmente los tiempos de fraguado de la pasta de cemento, correspondiente a diferentes porcentajes de puzolana

reemplazada y valores de resistencia a la compresión simple, con los reemplazos de puzolana, valores que se verán afectados de acuerdo a la composición y propiedades de los materiales.

El capítulo detalla los estudios y pruebas realizadas a las propiedades de los materiales que determinarán la calidad y comportamiento que desempeñan dentro de la mezcla del hormigón.

### 2.1.1. CEMENTO

Conglomerante hidráulico es la definición más precisa del cemento, se conoce como conglomerantes hidráulicos a aquellos productos que al ser combinados y mezclados con agua, fraguan y ganan resistencia, expuestos en condiciones de aire libre o condiciones húmedas. (Montoya, Meseguer, & Morán, 2000).

Debido a las propiedades mecánicas que el cemento provee al hormigón, es uno de los materiales de construcción más empleados y existen diferentes variedades de cementos con diferentes propiedades de acuerdo a sus proveedores; los cementos provenientes de la empresa UNACEM se detallan a continuación:

**TABLA 2.1.2 CEMENTOS QUE PROVEE UNACEM**

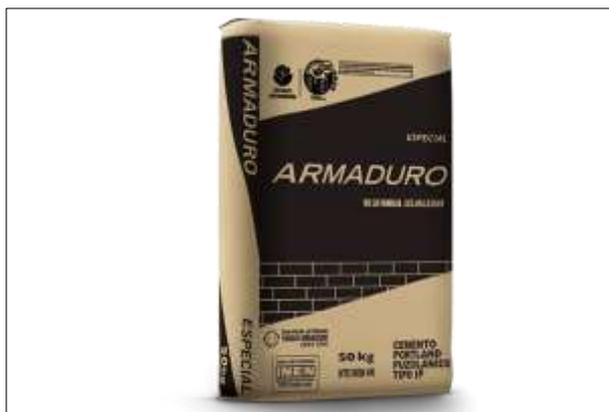
<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>TIPO</b>	<b>NORMA</b>
Selvalegre	Cemento Hidráulico Portland Puzolánico Tipo IP, usado en construcciones de hormigón en general.	ASTM C 595 NTE INEN 490
Campeón	Cemento Hidráulico de alta resistencia a los sulfatos Tipo HS.	ASTM C 1157 NTE INEN 2380
Armadero	Cemento Hidráulico Portland Puzolánico Tipo IP, diseñado para elaborar elementos prefabricados por su alta resistencia inicial.	ASTM C 595 NTE INEN 490

FUENTE: UNACEM.: <https://unacem.com.ec/es/productos/armadero/>

ELABORADO POR: Erik Castro

De acuerdo a su comportamiento, los cementos cumplen diferentes normas nacionales e internaciones como la NTE INEN 490 – ASTM C 595, dichas normas garantizan su calidad. Para el presente proyecto se empleó Cemento ARMADURO, el cual cumple con la característica de alta resistencia inicial (UNACEM, 2011).

#### ILUSTRACIÓN 2.1.1 CEMENTO ARMADURO



FUENTE: <https://unacem.com.ec/es/productos/armaduro/>

El cemento ARMADURO está diseñado para elaborar elementos prefabricados debido a su menor tiempo en alcanzar su resistencia máxima, obteniéndose su resistencia esperada aproximadamente en 7 días y en condiciones normales; y si el diseño lo permite puede alcanzar resistencias de hasta 50 MPa (UNACEM, 2011).

Para garantizar la calidad del cemento, se determinan las propiedades características del mismo, las cuales se obtienen a partir de la realización de ensayos de laboratorio normados a nivel nacional e internacional, los cuales se especifican a continuación:

TABLA 2.1.3 ENSAYOS DEL CEMENTO

ENSAYO	DEFINICIÓN	NORMA
Densidad real del cemento	La densidad es la relación entre la masa y el volumen que ocupa, se mide en $\text{gr}/\text{cm}^3$ .	NTE INEN 156 ASTM C 188
Densidades aparentes del cemento	Las densidades aparentes del cemento se definen como la cantidad de masa por unidad de volumen, tomando en cuenta el aire atrapado. El grado de compactación influye en este valor, se mide en $\text{gr}/\text{cm}^3$ .	NTE INEN 858 ASTM C 29
Consistencia normal del cemento	Se define la consistencia del cemento cuando se completa la hidratación de la totalidad de sus partículas, se mide el porcentaje de agua necesaria en peso de cemento.	NTE INEN 157 ASTM C 187
Tiempo inicial y final de fraguado del cemento.	Se define como el inicio de fraguado al tiempo transcurrido en pasar de consistencia moldeable a endurecida, mientras que el final de fraguado es el tiempo en que alcanza rigidez suficiente para resistir su propio peso, se mide en minutos.	NTE INEN 158 ASTM C 191

\*El ensayo de finura del cemento no se consideró, debido a que la inclusión de puzolana es en proporciones bajas, además que se utilizó solo el producto que pase el tamiz ASTM N°200.

FUENTE: Luna, G. (2014). *Estudio del Hormigón*. Quito. Ecuador. Editorial Edicumbre.

ELABORADO POR: Erik Castro

### 2.1.2. AGREGADO GRUESO

El agregado grueso constituye uno de los principales materiales que componen el hormigón, por tal razón asegurar la calidad de sus características es de vital importancia para así garantizar la fabricación del hormigón de buena calidad.

Los materiales del agregado grueso son de origen artificial o natural:

Los agregados de origen natural, provienen de la extracción directa de lechos de ríos o lecho marino, mejor conocidos como cantos rodados, estos no presentan

aristas, lo cual les resta adherencia en la pasta que conforma el hormigón y por tal razón no son los mejores para la adición en el concreto.

El agregado de origen artificial o triturado, es producto de la fragmentación de rocas de mayor tamaño mediante procesos estandarizados que certifican su calidad. Sus formas irregulares es la base que permite una adherencia óptima con los demás materiales que constituye el hormigón, como la pasta del cemento.

Los agregados gruesos son constituidos por gravas o material triturado, compuestos de forma predominante por partículas que son retenidas en el Tamiz ASTM No.4, es decir mayores a 4.75mm y generalmente se componen entre 9.5mm y 38mm. (Méndez, 2012).

Por consiguiente, el agregado grueso requiere un buen control de sus características para garantizar un concreto de alta calidad. Mediante ensayos de laboratorio normados por normas NTE INEN y ASTM se determina las propiedades físicas del agregado, que se indican a continuación:

**TABLA 2.1.4 ENSAYOS DEL AGREGADO GRUESO O RIPIO**

<b>ENSAYO</b>	<b>DEFINICIÓN</b>	<b>NORMA</b>
Peso específico y Absorción.	El peso específico del material en estado de "superficie saturada seca", siendo la relación de la masa con el volumen total que ocupan los agregados saturados de agua. La absorción mide la capacidad del agregado de ocupar, con agua, los espacios vacíos del material.	ASTM C 127 NTE INEN 857
Densidades aparentes.	La relación del peso del material por unidad de volumen, que varía acorde al grado de compactación presente.	ASTM C 29 NTE INEN 858
Granulometría.	Es el análisis de la forma en que se distribuyen las partículas que constituyen el material.	ASTM C 136 NTE INEN 696

Determinación de Contenido de Humedad.	La relación de la masa de agua contenida en el material y el peso seco, importante para obtener la cantidad definitiva de agua de mezclado en la dosificación.	NTE INEN 862
Abrasión.	Determinación de la cantidad de erosión que resisten las partículas del material frente a una carga de abrasión mediante esferas de acero y rotación en la Máquina de Los Ángeles.	ASTM C 131 NTE INEN 860

FUENTE: Luna, G. (2014). *Estudio del Hormigón*. Quito. Ecuador. Editorial Edicumbre.

ELABORADO POR: Erik Castro

El agregado grueso (AG-01) utilizado en el proyecto se origina en la cantera Guayllabamba localizada en la provincia de Pichincha, al costado izquierdo del cauce del Río Guayllabamba en la vía Calderón-Guayllabamba. El material está constituido por roca triturada compuesta principalmente por partículas cuyo tamaño máximo nominal es de 9.5mm (3/8”).

#### FOTOGRAFÍA 2.1.1 RIPIO (AG-01)



FUENTE: LEMSUR

ELABORADO POR: Erik Castro

### 2.1.3. AGREGADO FINO

El agregado fino generalmente se basa en arena natural extraída de río o piedra triturada, la cual contiene impurezas y por tanto debe ser lavada. Este árido es el que tiene mayor influencia y constituye uno de los mayores porcentajes en peso del hormigón por tal razón es importante asegurar la calidad para su incorporación en la mezcla de concreto. (Méndez, 2012)

El material que atraviesa el tamiz ASTM No. 4 es conocido como agregado fino, son partículas de menor tamaño a 4.75mm y es retenido por el tamiz ASTM No. 200, con abertura de 0.075mm. La arena debe estar constituida por fragmentos de roca limpios, de perfil angular, duro, compactado y resistente, además debe ser exento de sedimentos como polvo, sales o materiales orgánicos que pueden ser perjudiciales para el hormigón, y deberán satisfacer los requerimientos normados en la ASTM C 33. El control de características en el material se realiza mediante ensayos de laboratorio, los cuales se detallan en el siguiente cuadro:

**TABLA 2.1.5 ENSAYOS DE AGREGADO FINO**

<b>ENSAYO</b>	<b>DEFINICIÓN</b>	<b>NORMA</b>
Peso específico y Absorción	Con el peso específico del material en estado de "superficie saturada seca", siendo la relación de la masa y el volumen total del material saturado de agua. La absorción mide la capacidad del agregado de ocupar, con agua, los espacios vacíos del material.	NTE INEN 856 ASTM C 128
Densidades aparentes.	La relación del peso del material por unidad de volumen, que varía acorde al grado de compactación presente.	NTE INEN 858 ASTM C 29
Granulometría.	Es el análisis de la forma en que se distribuyen las partículas que constituyen el material.	NTE INEN 696 ASTM C 136

Determinación de Contenido de Humedad.	La relación entre la masa de agua contenida en la muestra y el peso seco, importante para corregir con la cantidad de agua final en la dosificación.	NTE INEN 862
Contenido Orgánico.	Determinar la existencia de partículas orgánicas en la muestra de finos, las cuales pueden ser perjudiciales en las reacciones químicas del proceso de hidratar el cemento en el hormigón.	NTE INEN 855 ASTM C 40

FUENTE: Luna, G. (2014). *Estudio del Hormigón*. Quito. Ecuador. Editorial Edicumbre.

ELABORADO POR: Erik Castro

El agregado fino utilizado en el presente proyecto consiste en arena de río extraída del cauce del Río Guayllabamba en la cantera del mismo nombre, ubicada en la vía Calderón-Guayllabamba, en la provincia de Pichincha.

#### FOTOGRAFÍA 2.1.2 CANTERA GUAYLLABAMBA



FUENTE: Cantera Guayllabamba

ELABORADO POR: Erik Castro

#### **2.1.4. AGUA**

Las funciones que desempeña el agua en la fabricación del hormigón son que permite el proceso de hidratar las partículas del cemento a la vez que brinda mayor trabajabilidad de la mezcla. Aproximadamente el 50% del agua empleada en la fabricación del hormigón se destina a la hidratación, lo demás se dispone en agua libre que se evapora con el paso del tiempo. (Luna, 2014)

Por norma general se considera que el hormigón puede ser amasado con cualquier clase de agua a excepción de aguas minerales. Un criterio utilizable sobre el agua de amasado es que sea apta para el consumo humano, es decir su potabilidad. En el Ecuador la norma NTE INEN 1108 establece los requerimientos que se debe satisfacer para el uso de agua en la fabricación del concreto.

### **2.2. PUZOLANA**

#### **2.2.1. DEFINICIÓN**

Se les denomina puzolanas a los materiales constituidos por sílice o sílice-alúmina, usados a lo largo de historia en la producción del cemento. A pesar de carecer directamente de propiedades hidráulicas, al combinarse con cal y agua, puede dar lugar a conformar un conglomerante hidráulico. De forma que las puzolanas aportan propiedades cementantes a un conglomerante no hidráulico. (Salazar, 2008).

Por tal razón, son materiales que en condiciones normales reaccionan con conglomerantes ordinarios como lo son morteros y hormigones. Pueden ser utilizados en el diseño de hormigones, como en el cemento puzolánico o como un suplemento cementicio.

### 2.2.2. CLASIFICACIÓN

Las puzolanas se clasifican principalmente por su origen, pueden ser naturales o de origen artificial. Las puzolanas artificiales son esencialmente de origen natural, pero se consideran artificiales a causa de que reciben un tratamiento para alcanzar sus propiedades. También se puede considerar puzolanas mixtas a aquellas conformadas por puzolanas tanto naturales como artificiales.

#### a) Puzolanas Naturales

Dentro de las puzolanas naturales se pueden distinguir dos formas de origen distintas, de origen mineral y un origen “orgánico”.

Los elementos volcánicos que proceden de eventos eruptivos, son el material que compone la puzolana de origen mineral. Las puzolanas orgánicas o biológicas, son formaciones geológicas sedimentarias ricas en sílice hidratada y que se forman en yacimientos subacuáticos por hacinamiento de osamentas de animales o algas. (Salazar, 2008)

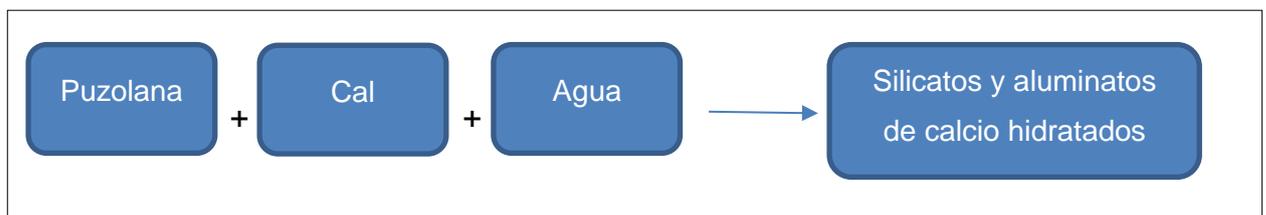
#### b) Puzolanas Artificiales

Las puzolanas artificiales son aquellas que se conforman gracias a la acción de un tratamiento, generalmente térmico. Las puzolanas artificiales pueden originarse de subproductos que adquieren el carácter puzolánico debido a operaciones industriales como las cenizas volantes, arcillas activadas y escorias de fundición. Otro grupo se forma a partir de tratamientos térmicos a materiales naturales silicatados como son las cenizas de desperdicios orgánicos como la ceniza de la caña y la ceniza de cáscara de arroz. (Salazar, 2008).

### 2.2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA PUZOLANA

En el diseño de concreto, uno de los factores que más se destaca es la actividad puzolánica o reacción puzolánica, que es la capacidad del material de reaccionar con el hidróxido de calcio contenido en la formación de composiciones hidráulicas presentadas en el siguiente esquema:

#### ILUSTRACIÓN 2.2.1 ESQUEMA REACCIÓN PUZOLÁNICA



FUENTE: Salazar, A. (2008). ¿QUÉ ES UNA PUZOLANA? Cali: CÁMARA Colombiana de la Construcción CAMACOL.

ELABORADO POR: Erik Castro

El proceso de la actividad puzolánica se da de acuerdo a los siguientes factores (Salazar, 2008):

- a) Origen y composición química de la puzolana.
- b) Relación cal – puzolana.
- c) Grado de finura.
- d) Temperatura de la reacción.

Para la determinación de la actividad puzolánica de un material existen procesos y métodos de ensayos normalizados por el ASTM:

- a) Evaluación del Índice de Actividad Puzolánica con Cemento, ASTM C-311.
- b) Índice de Actividad Puzolánica con Cal, ASTM C-311.
- c) Clasificación de material puzolánico mediante índice mínimo del 75%, ASTM C-618.

#### 2.2.4. EMPLEO DE PUZOLANAS

La puzolana ha sido utilizada a lo largo del tiempo en la producción del cemento debido a su capacidad de reacción con el hidróxido de calcio y agua, las principales ventajas que ofrece la puzolana dentro del cemento son (Calleja, 1997):

- a) Proporciona una mejor docilidad de la mezcla del hormigón, por tanto, mejora su trabajabilidad.
- b) Disminuye la tendencia a la segregación de los agregados.
- c) Prolonga el endurecimiento del hormigón
- d) Disminuye la exudación y sangrado del fraguado del concreto.
- e) Mejora la durabilidad del hormigón a largo plazo.

La ceniza volcánica utilizada en el presente proyecto, es proveniente de extracciones cercanas a la quebrada Achupashal del Observatorio Vulcanológico Tungurahua (OVT) del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, ubicado en el sector de Guadalupe, Provincia de Tungurahua. El material utilizado recibió un proceso de tamizado para obtener la porción más fina que atraviesa el tamiz ASTM N° 200, con una abertura de 0.075 mm.

#### ILUSTRACIÓN 2.2.2 SECTOR UBICADO CERCA AL OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO TUNGURAHUA



FUENTE: <https://igeqn.edu.ec/red-de-repetidoras/content/18-tungurahua>

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA DE PRUEBAS DE LABORATORIO**

#### **3.1. ENSAYOS DE LABORATORIO EN EL CEMENTO**

Las propiedades que se describen en el presente capítulo, permiten determinar la calidad del material, con lo que se puede asegurar que las dosificaciones realizadas con el cemento lleguen a adquirir las resistencias para las que son diseñadas. Para ello es indispensable conocer y seguir las disposiciones; y procedimientos dados en las normas que corresponden a cada ensayo:

##### **3.1.1. DENSIDAD REAL DEL CEMENTO**

El cemento portland en condiciones normales tiene una densidad real de aproximadamente  $3.10 \text{ gr/cm}^3$ , sin la inclusión de aire, pero este valor puede verse afectado por los cambios de las condiciones en el lugar de almacenaje.

Procedimiento de ensayo acorde con las disposiciones de la ASTM C 188 y NTE INEN 156.

##### **a) Equipo empleado**

- Picnómetro.
- Balanza de precisión de 0.01 gr.
- Espátula y embudo.
- Reactivo (Gasolina).
- Muestra de cemento.

##### **b) Procedimiento**

- Colocar una cantidad determinada de reactivo en el picnómetro, procurando que no supere la marca de la parte angosta del frasco ( $0-1 \text{ cm}^3$ ).

- Tomar el valor del volumen inicial ( $L_1$ ) y el peso inicial del reactivo ( $P_1$ ).
- Introducir en el frasco, la muestra de cemento (se requiere aproximadamente 64 gr) con ayuda del embudo, hasta que la altura de la gasolina llegue al cuello superior (18-24  $\text{cm}^3$ ).
- Agitar haciendo girar el frasco sacando las burbujas contenidas por el cemento y dejar en reposo.
- Tomar la lectura final de volumen ( $L_2$ ) y el peso final del cemento en conjunto con la gasolina y el picnómetro ( $P_2$ ).

### c) Cálculo

La densidad real es la división de la masa de cemento utilizada por el volumen del líquido que se desplazado (niveles del reactivo).

$$\delta_{\text{real}} = \frac{P_2 - P_1}{L_2 - L_1}$$

Donde,

$\delta_{\text{real}}$  = Densidad real, en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

$P_2$  = Peso del frasco con cemento y gasolina, en gr.

$P_1$  = Peso del frasco con gasolina, en gr.

$L_2$  = Volumen en el cuello superior, en  $\text{cm}^3$ .

$L_1$  = Volumen en el cuello inferior, en  $\text{cm}^3$ .

### 3.1.2. DENSIDADES APARENTES DEL CEMENTO

El valor del peso de un volumen definido de cemento depende del grado de compactación que éste presente. La densidad aparente compactada es obtenida mediante compactación en el momento de llenar un molde, mientras que la densidad aparente suelta es aquella que se determina después de llenar el envase sin compactarlo.

Procedimiento del ensayo acorde con las disposiciones de la ASTM C 29 y NTE INEN 858.

**a) Equipo empleado**

- Moldes plásticos.
- Calibrador.
- Brocha.
- Balanza con precisión de 0.01 gr.
- Espátula y brocha.

**b) Procedimiento*****Densidad Suelta***

- Determinar el peso del molde ( $P_1$ ) y medir el volumen del mismo en  $\text{cm}^3$ .
- Colocar con la espátula el cemento en el molde.
- Colmar el molde con una espátula, evitando producir vibraciones en el molde y limpiar los excesos.
- Pesar el molde con el cemento suelto ( $P_2$ ).

***Densidad Compactada***

- Determinar el peso del molde ( $P_1$ ) y medir el volumen del mismo en  $\text{cm}^3$ .
- Colocar con la espátula el cemento en el molde con 3 capas iguales y en cada capa compactar haciendo caer en 25 ocasiones el molde de una altura de 2cm.
- Enrasar el molde con ayuda de una espátula, evitando producir vibraciones en el molde y limpiar los excesos.
- Pesar el molde con el cemento compactado ( $P_2$ ).

Los ensayos deben realizarse por duplicado para obtener valores promedios.

**c) Cálculo**

La densidad aparente compactada o suelta, es la relación de la masa y el volumen.

$$\delta_{\text{aparente}} = \frac{P_2 - P_1}{V_{\text{molde}}}$$

Donde,

$\delta_{\text{aparente}}$  = Densidad aparente suelta o compactada del cemento, en gr/cm<sup>3</sup>.

$P_2$  = Peso del molde con el cemento en estado suelto o compactado, en gr.

$P_1$  = Peso del molde, en gr.

$V_{\text{molde}}$  = Volumen del molde, en cm<sup>3</sup>.

### 3.1.3. CONSISTENCIA NORMAL DE LA PASTA DE CEMENTO

El estado cuando todas las partículas están hidratadas, es cuando el cemento está en su consistencia normal y es indicador de contaminación o mala conservación del cemento.

La consistencia normal para cementos Portland de uso normal se encuentran entre un 20% y 30% de peso de agua sobre el peso total del cemento utilizado; y varía según la calidad del mismo, e indicada el grado de fluidez o plasticidad de la pasta de cemento.

La forma para preparar pasta de cemento se detalla en la NTE INEN 155 y ASTM C 305. Procedimiento del ensayo acorde con las disposiciones de la NTE INEN 157 y ASTM C 187.

#### a) Equipo empleado

- Mezcladora mecánica planetaria.
- Espátula.
- Cronómetro.
- Guantes de látex.
- Balanza.
- Probeta de 250 a 300 cm<sup>3</sup>.
- Aparato de Vicat.
- Molde tronco-cónico y placa de vidrio.

#### b) Procedimiento

##### *Preparación de la pasta*

- Pesar la cantidad de cemento a utilizarse (500gr. generalmente)

- Preparar la mezcladora universal, con la paleta y recipiente limpios con una franela húmeda.
- Llenar una probeta con un volumen de agua estimado al porcentaje en peso del cemento, alrededor de 22 a 30%.
- Verter el agua con el cemento dentro del recipiente y aguardar 30 segundos con la preparación mientras se absorbe.
- Revolver por 30 segundos en la menor velocidad.
- Detener la mezcladora por alrededor de 15 segundos, recoger la pasta adherida de los bordes del recipiente hacia el fondo.
- Mezclar durante 60 segundos a velocidad media.

#### ***Ensayo de penetración en el Aparato de Vicat***

- Una vez preparada la pasta, con las manos enguantadas se toma la pasta de cemento, se figura una esfera y se lanza en 6 ocasiones de una mano a la otra, separadas alrededor de 15 cm. Si la pasta tiene una consistencia viscosa o seca, se prepara la pasta con una porción de agua distinta.
- Cuando la pasta presente una buena consistencia (sin deshacerse o pegarse), se toma el molde tronco-cónico previamente engrasado con una fina capa de aceite y se introduce la pasta por el lado más ancho hasta que se llene por completo.
- Limpiar los excesos de pasta en la parte ancha del molde y colocarlo sobre una placa de acrílico o vidrio.
- Enrasar la parte angosta del molde con una espátula, evitando comprimir la pasta.
- Colocar el molde en el aparato de Vicat, poniendo en contacto la sonda Tetmayer suavemente con el borde superior y fijar el vástago en esta posición.
- Colocar el marcador al cero en la escala señalizada del aparato, centrar el molde con la pasta debajo del vástago, y soltarlo.

- Después de 30 segundos de haber dejado libre el vástago, se determina la consistencia normal si la sonda Tetmayer penetra  $10 \pm 1$  mm en la pasta.

### FOTOGRAFÍA 3.1.1 MEZCLADORA MECÁNICA PLANETARIA



FUENTE: LEMSUR

ELABORADO POR: Erik Castro

Si no se llega a obtener la consistencia normal del cemento, se repite el ensayo en su totalidad con nueva muestra de cemento, modificando la cantidad de agua usada.

#### c) Cálculo

La consistencia normal se expresa en porcentaje de peso de la cantidad de agua utilizada con el peso seco del cemento.

$$C\% = \frac{M_a}{M_c} \times 100$$

Donde,

C% = Consistencia normal de cemento, en %.

M<sub>a</sub> = Peso del agua, en gr.

M<sub>c</sub> = Peso del cemento, en gr.

### 3.1.4. TIEMPO INICIAL Y FINAL DE FRAGUADO DEL CEMENTO

El inicio del fraguado es el tiempo transcurrido, desde la mezcla y amasado, hasta el momento en que la pasta del cemento puede ser remodelada sin recibir alteraciones en sus propiedades. Después, la pasta plástica reduce la fluidez hasta perder la viscosidad y elevar su temperatura. El final del fraguado es el periodo de tiempo hasta que la pasta de cemento adquiere la rigidez adecuada para poder resistir el propio peso, en este punto termina el fraguado y empieza la ganancia de resistencia de la pasta de cemento.

En promedio, los cementos normales presentan un inicio de fraguado entre 60 a 120 minutos y el final de fraguado entre 7 y 8 horas.

El método de ensayo usado se especifica en las normas ASTM C 191 y NTE INEN 158.

#### a) Equipo empleado

- Mezcladora mecánica planetaria.
- Espátula.
- Cronómetro.
- Guantes de látex.
- Balanza.
- Probeta de 250 a 300 cm<sup>3</sup>.
- Aparato de Vicat.
- Molde tronco-cónico y placa.
- Cámara de humedad.

#### b) Procedimiento

- Preparar una pasta de cemento que se encuentre en su consistencia normal.

- Dejar en la cámara húmeda la pasta con el molde. Sacar el molde de la cámara solo para efectuar las mediciones.
- Tomar mediciones de penetración con la aguja de Vicat Modificado de 1 mm en lapsos de media hora al principio y 10 o 5 minutos conforme se aproxima el inicio del fraguado. Es recomendable registrar tiempos y lecturas de penetración para graficar el progreso del fraguado.
- El tiempo inicial de fraguado es si la aguja de Vicat se introduce  $25 \pm 1$  mm en la pasta en 30 segundos.
- El fin de fraguado es el instante cuando la aguja de Vicat ya no muestra una marca perceptible en la muestra.

### 3.1.5. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados de las pruebas de laboratorio se indican a continuación:

**TABLA 3.1.1 PROPIEDADES DE CEMENTO ARMADURO**

<b>Propiedades</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>
Densidad real del cemento	2.86	gr/cm <sup>3</sup>
Densidad aparente suelta	0.98	gr/cm <sup>3</sup>
Densidad aparente compactada	1.17	gr/cm <sup>3</sup>
Consistencia normal	28.1	%
Tiempo inicial de fraguado	140	min
Tiempo final de fraguado	310	min

ELABORADO POR: Erik Castro

Para evaluar la variación de las propiedades del cemento con la adición de puzolana de ceniza volcánica se procedió a realizar los ensayos de consistencia normal y tiempos de fraguado para las muestras modificadas al 5%, 10%, 15% y 20% en peso con la puzolana, obteniéndose:

**TABLA 3.1.2 PROPIEDADES DE CEMENTO CON REEMPLAZO DE PUZOLANA**

<b>Muestra</b>	<b>Consistencia normal de cemento</b>	<b>Inicio de fraguado</b>	<b>Final de fraguado</b>
Cemento	28.1%	140 min	310 min
Reemplazo 5%	27.4%	157 min	318 min
Reemplazo 10%	26.4%	165 min	324 min
Reemplazo 15%	26.0%	177 min	336 min
Reemplazo 20%	25.5%	184 min	345 min

ELABORADO POR: Erik Castro

## **3.2. ENSAYOS DE LABORATORIO DE AGREGADO GRUESO**

El agregado grueso utilizado en el presente proyecto proviene de un proceso de trituración, por tal motivo, las partículas corresponden a un tamaño uniforme. Las propiedades a evaluar están normadas a nivel nacional a través del INEN y a nivel internacional por la ASTM que se muestran a continuación.

### **3.2.1. PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN**

La relación del peso neto de las partículas con el volumen que ocupan se conoce como peso específico. La absorción es la capacidad del material de llenar con agua los vacíos permeables de su estructura.

El procedimiento de ensayo empleado acorde con las normas ASTM C 127 y NTE INEN 857.

**a) Equipo empleado**

- Canastilla metálica.
- Envase con agua.
- Balanza de 20 Kg de capacidad.
- Bandejas metálicas.
- Horno de ventilación y temperatura constante.
- Franela.

**b) Procedimiento*****Preparación de la muestra***

- Lavar las gravas con el fin de retirar todo el material fino adherido en la superficie, dejar sumergido el material durante 24h para saturarlo.

***Procedimiento de ensayo***

- Del material saturado, escoger de 15 a 25 gravas, las cuales se secan manualmente en su superficie con una franela para conseguir la condición S.S.S. Las superficies de las partículas están en dicha condición cuando pierden el brillo de la humedad superficial.
- Pesar las gravas en condición S.S.S. en aire ( $P_1$ ).
- Colocar la canastilla dentro del envase con agua y obtener el peso sumergido ( $P_c$ ).
- Colocar las gravas en la canastilla sumergida y tomar el peso ( $P_{c+m}$ )
- Obtener el peso del material sumergido ( $P_2$ ).
- Colocar el material en otra bandeja y dejar secar durante 24 horas en un horno a  $105^{\circ}\text{C}$  y tomar el peso del material seco ( $P_3$ ).

**FOTOGRAFÍA 3.2.1 PREPARACIÓN ESTADO S.S.S. DE RIPIO.**



FUENTE: LEMSUR

ELABORADO POR: Erik Castro

**c) Cálculo**

$$P_2 = P_{c+m} - P_c$$

$$P_{\text{ESPECÍFICO}} = \frac{P_3}{P_1 - P_2}$$

$$\delta_{\text{SSS}} = \frac{P_1}{P_1 - P_2}$$

$$P_{\text{ESP-AP}} = \frac{P_3}{P_3 - P_2}$$

$$\text{Abs} = \frac{P_1 - P_3}{P_3} \times 100\%$$

Donde,

$P_{c+m}$  = Peso de canasta y material sumergidos, en gr.

$P_c$  = Peso de la canasta sumergida, en gr.

- $P_1$  = Peso del material en estado superficie saturada seca en aire, en gr.
- $P_2$  = Peso del material sumergido, en gr.
- $P_3$  = Peso de la muestra seca, en gr.
- $P_{\text{ESPECÍFICO}}$  = Peso específico del ripio, en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .
- $\delta_{\text{SSS}}$  = Peso específico en estado superficie saturada seca en,  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .
- $P_{\text{ESP-AP}}$  = Peso específico aparente, en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .
- Abs = Porcentaje de absorción del agregado, en %.

### 3.2.2. DENSIDADES APARENTES DEL RIPIO

El valor del peso de un material para un determinado volumen varía en razón de la compacidad de la muestra, por tal razón es importante para el proceso de dosificación, obtener la densidad suelta y compactada del agregado.

Los métodos de ensayo para definir las densidades aparentes del agregado grueso se determinan por medio de ASTM C 29 y NTE INEN 858.

#### a) Equipo empleado

- Molde cilíndrico.
- Barra de compactación ( $d = 16\text{mm} \times 600\text{mm}$ ), punta redondeada.
- Balanza de capacidad de 20 Kg.
- Flexómetro.
- Pala.

#### b) Procedimiento

##### *Densidad Suelta*

- Determinar el volumen del molde cilíndrico (V).
- Pesar el recipiente vacío ( $P_1$ ).
- Llenar el molde con el material sin generar vibraciones, retirar el sobrante y enrasar.
- Pesar el molde con el material suelto ( $P_2$ ).

### ***Densidad Compactada***

- Determinar el volumen del molde cilíndrico (V).
- Pesar el recipiente vacío ( $P_1$ ).
- Llenar el molde colocando el material en 3 capas de igual altura, compactar las capas mediante 25 aplicaciones con la barra, retirar el sobrante y enrasar.
- Pesar el molde con el material suelto ( $P_2$ ).

#### **FOTOGRAFÍA 3.2.2 PRUEBA DE DENSIDAD APARENTE DEL RIPIO**



FUENTE: LEMSUR

ELABORADO POR: Erik Castro

#### **c) Cálculo**

La densidad suelta o compactada se calcula:

$$\delta_{\text{APARENTE}} = \frac{P_2 - P_1}{V}$$

Donde,

$\delta_{\text{APARENTE}}$  = Densidad aparente suelta o compactada del ripio, en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

$P_1$  = Peso del molde, en gr.

$P_2$  = Peso del molde con el agregado suelto o compactado, en gr.

$V$  = Volumen total del molde, en  $\text{cm}^3$ .

### 3.2.3. GRANULOMETRÍA DE AGREGADO GRUESO

Conocer la distribución del tamaño de las partículas del material proporciona una buena idea de las características físicas del material y su comportamiento conjunto dentro de la mezcla de hormigón.

El procedimiento de ensayo se determina con lo especificado en las normas ASTM C 136 y NTE INEN 696.

#### a) Equipo empleado

- Tamices de acuerdo a la gradación establecida.
- Tamizadora.
- Balanza.
- Bandejas.
- Brocha y cepillo metálico.
- Pala.
- Horno de ventilación y temperatura constante.

#### b) Procedimiento

- Analizar el material para determinar la porción de muestra necesaria para realizar el ensayo, de acuerdo a la tabla 3.2.1.:

**TABLA 3.2.1 MUESTREO DEL AGREGADO GRUESO (RIPIO)**

Máximo tamaño nominal con aberturas cuadradas		Masa mínima para el ensayo
Pulg	mm	Kg
3/8	9.5	1
1/2	12.5	2
3/4	19.0	5
1	25.0	10
1 1/2	37.5	15
2	50.0	20
2 1/2	63.0	35
3	75.0	60
3 1/2	90.0	100
4	100.0	150
5	125.0	300

FUENTE: NTE INEN 696 – ASTM C 136

ELABORADO POR: Erik Castro

- Escoger el tamaño máximo nominal del material, para determinar los tamices que se deben ocupar de acuerdo a la tabla 3.2.2.:

TABLA 3.2.2 TABLA DE GRADACIÓN RECOMENDADA PARA AGREGADOS GRUESOS

Tamaño nominal	Porcentaje acumulado en peso que pasa por los tamiz												
	4"	3 1/2"	3"	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16
	100 mm	90.0 mm	75.0 mm	63.0 mm	50.0 mm	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm
3 1/2" a 1 1/2"	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5					
2 1/2" a 1 1/2"			100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5					
2" a 1"				100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5				
2" a N°4				100	95 a 100		35 a 70		10 a 30		0 a 5		
1 1/2" a 3/4"					100	90 a 100	20 a 55	0 a 15		0 a 5			
1 1/2" a N°4					100	95 a 100		35 a 70		10 a 30	0 a 5		
1" a 1/2"						100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5			
1" a 3/8"						100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5		
1" a N°4						100	95 a 100		25 a 60		0 a 10	0 a 5	
3/4" a 3/8"							100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5		
3/4" a N°4							100	90 a 100		20 a 55	0 a 10	0 a 5	
1/2" a N°4								100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	
3/8" a N°8									100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

FUENTE: NTE INEN 696 – ASTM C 136

ELABORADO POR: Erik Castro

- Secar el material a una temperatura 110°C en el horno por aproximadamente 24 horas y cuartear con el peso necesario.
- Pesarse la cantidad de material inicial.
- Armar en la tamizadora el juego de tamices, ordenados de forma ascendente de diámetros desde la bandeja de recolección hasta el tamiz de mayor abertura.
- Tamizar la muestra durante 5 a 10 minutos.
- Retirar el juego de tamices y pesar el material recogido en cada uno.

### c) Cálculos

Con los pesos retenidos en los tamices, se determina los porcentajes retenidos, acumulados y el porcentaje de material pasante de cada tamiz para obtener la curva granulométrica.

Se determina el módulo de finura del material para el agregado grueso con los tamices 3", 1 1/2", 3/4", 3/8", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50 y N° 100.

$$M_F = \frac{\sum \% \text{retenido acumulados de los tamices de la serie Módulo de Finura}}{100}$$

Donde,

$M_F$  = Módulo de finura.

### 3.2.4. DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL RIPIO

La cantidad de agua (contenido de humedad) presente en el material, para realizar la mezcla del hormigón es un factor importante, ya que la humedad natural del agregado puede causar variaciones del agua de mezclado.

La metodología del ensayo se define en la norma NTE INEN 862.

**a) Equipo empleado**

- Balanza.
- Bandejas metálicas.
- Horno de ventilación y temperatura constante.

**b) Procedimiento**

- Pesar una bandeja metálica ( $P_1$ ).
- Colocar de 200 a 400gr de muestra en la bandeja y pesar ( $P_2$ ).
- Dejar secar el material a 110°C en el horno, durante 18 a 24 horas aproximadamente.
- Pesar el recipiente con la muestra seca ( $P_3$ ).

**c) Cálculo**

$$\%W = \frac{P_2 - P_3}{P_3 - P_1} \times 100\%$$

Donde,

$P_1$  = Peso de la bandeja, en gr.

$P_2$  = Peso de la bandeja con muestra húmeda, en gr.

$P_3$  = Peso de la bandeja con muestra seca, en gr.

$\%W$  = Porcentaje de humedad, en %.

**3.2.5. ABRASIÓN**

La abrasión mide la capacidad del material de resistir la erosión en la superficie de las partículas, por medio del uso de una carga abrasiva conformada por esferas de acero que golpean el conjunto con la rotación producida de la Máquina de Los Ángeles.

La metodología del ensayo para la abrasión del agregado grueso se establece de las ASTM C 131 y NTE INEN 860.

**a) Equipo empleado**

- Máquina de Los Ángeles.
- Juego de tamices de abertura cuadrada (numeración depende de la gradación).
- Balanza.
- Carga abrasiva (12 esferas de 23.4mm de radio y masa de 390 a 445 gr).

**b) Procedimiento**

- El agregado grueso debe separarse mediante tamizado, de acuerdo a los rangos de tamaño, para obtener la gradación de acuerdo a la tabla 3.2.2., para partículas menores a 37.5mm:

**TABLA 3.2.3 GRADACIÓN DE LA MUESTRA PARA PARTÍCULAS MENORES A 37.5MM**

Tamaño de aberturas de tamiz en mm		Masa con tamaños indicados (gr)			
		Gradaciones			
Pasa	Retenido en	A	B	C	D
37.5	26.5	1250 ± 25			
26.5	19.0	1250 ± 25			
19.0	13.2	1250 ± 10	2500 ± 10		
13.2	9.5	1250 ± 10	2500 ± 10		
9.5	6.7			2500 ± 10	
6.7	4.75			2500 ± 10	
4.75	2.36				5000 ± 10
TOTAL		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10
Número de esferas		12	11	8	6

FUENTE: Luna, G. (2014). *Estudio del Hormigón*. Quito. Ecuador. Editorial Edicumbre.

ELABORADO POR: Erik Castro

- Con la gradación correspondiente, separar el material necesario para el ensayo, con el peso inicial (A).
- Colocar el material dentro de la máquina de Los Ángeles, con la carga abrasiva (esferas) propia de la gradación indicada en la tabla 3.2.3.
- La gradación determina la cantidad de revoluciones: para partículas menores a 37.50mm, inicialmente 200 rev. hasta 1000 rev. y para partículas mayores a 19mm, inicialmente 100 rev. hasta 5000 rev.
- Hacer rotar la máquina de Los Ángeles en una primera fase, pesar el material atrapado en el tamiz N°12.
- Después de pesar el material volver a colocarlo en la máquina de Los Ángeles e iniciar la segunda fase de rotaciones.
- Terminar la segunda fase de rotaciones hasta completa el total de revoluciones y pesar el material atrapado en el tamiz N°12 (B).

### c) Cálculo

El porcentaje de abrasión se calcula:

$$\%_{\text{ABRASIÓN}} = \frac{A - B}{A} \times 100\%$$

El coeficiente de uniformidad se determina:

$$\text{Coef. Uni.} = \frac{\% \text{ de pérdidas luego de 100 ó 200 rev.}}{\% \text{ de pérdidas luego de 500 ó 1000 rev.}} \times 100\%$$

Donde,

$\%_{\text{ABRASIÓN}}$  = Abrasión del agregado grueso, en %.

Coef. Uni. = Coeficiente de uniformidad.

B = Peso de la muestra después de tamizado, retenido en el N°12.

A = Peso inicial del agregado, en gr.

### 3.2.6. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados de las pruebas de laboratorio se indican a continuación:

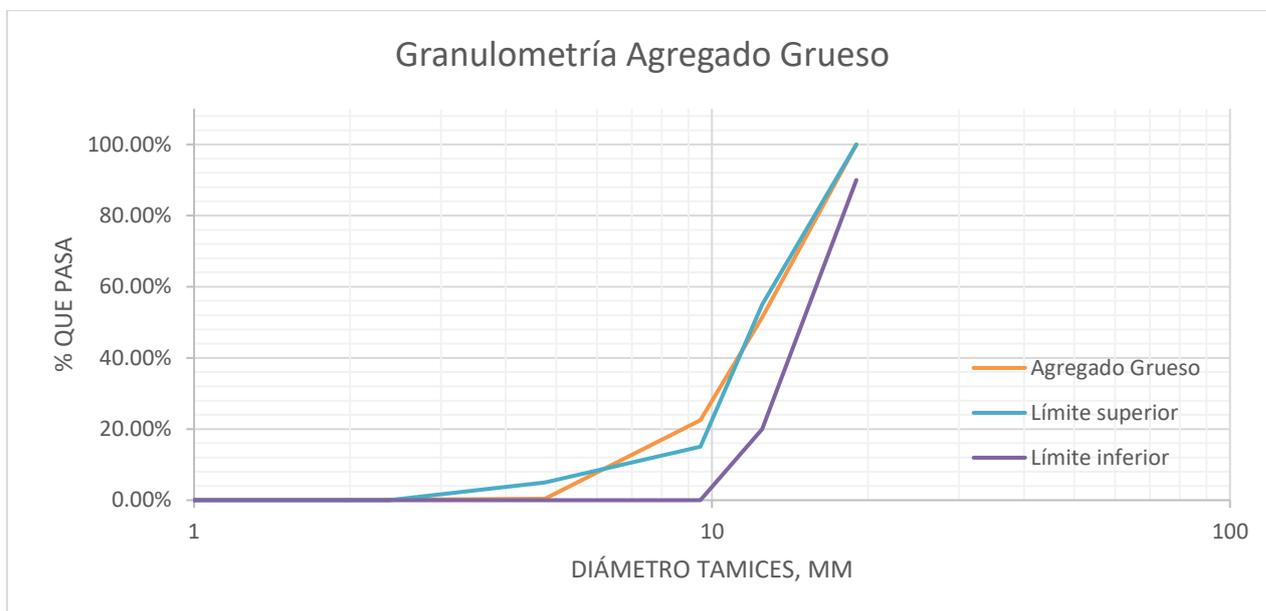
**TABLA 3.2.4 PROPIEDADES DEL RIPIO ENSAYADO (AG-01)**

<b>Propiedades</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>
Peso específico del ripio	2.52	gr/cm <sup>3</sup>
Peso específico S.S.S.	2.57	gr/cm <sup>3</sup>
Porcentaje de Absorción	2.21	%
Densidad aparente suelta	1.28	gr/cm <sup>3</sup>
Densidad aparente compactada	1.46	gr/cm <sup>3</sup>
Módulo de finura	4.79	-
Tamaño nominal	3/4	Pulg.
Contenido de humedad	0.49	%
Tipo de gradación	B	-
Coefficiente de uniformidad	0.25	-
Abrasión	18.90	%

ELABORADO POR: Erik Castro

A continuación, se presenta la curva granulométrica que pertenece al ripio (AG-01):

**GRÁFICA 3.2.1 CURVA GRANULOMÉTRICA DE RIPIO PROVENIENTE DE GUAYLLABAMBA (AG-01)**



ELABORADO POR: Erik Castro

### 3.3. ENSAYOS DE LABORATORIO DE AGREGADO FINO

Al igual que el agregado grueso, es necesario conocer las principales propiedades de la arena o agregado fino para establecer, de forma adecuada, las relaciones que permitan un buen proceso de dosificación; por lo cual los ensayos son realizados conforme las normas nacionales e internacionales lo expresan.

#### 3.3.1. PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN

El valor del peso de las partículas de arena sobre el volumen que ocupan, es conocido el peso específico del material.

El procedimiento de ensayo empleado, está acorde con las normas ASTM C 128 y NTE INEN 856.

**a) Equipo empleado**

- Picnómetro o matraz de 500ml.
- Molde trono-cónico.
- Apisonador.
- Bomba de vacío.
- Balanza de precisión 0.01gr.
- Bandejas metálicas.
- Horno de ventilación y temperatura constante.
- Embudo.
- Piseta.
- Espátula.

**b) Procedimiento*****Preparación de la muestra***

- Lavar el agregado para retirar todo el material fino adherido en la superficie, dejar sumergido el material durante 24 para saturarlo.

***Procedimiento de ensayo***

- Del material saturado, recoger una cantidad superior a 500gr en una bandeja, retirando el sobrante de agua.
- Secar la muestra, bien en temperatura ambiente o con el uso de un horno para acelerar el proceso.
- Verificar si se ha llegado al estado de superficie saturada seca (S.S.S.), llenando el tronco-cónico con la muestra y aplicando un total de 25 aplicaciones con el apisonador, dejando caer de una altura de  $\pm 3.5$ cm.
- Retirar los excesos y limpiar la parte exterior del molde.
- Retirar el molde cuidadosamente; se comprueba la condición S.S.S. de la arena si se desmorona ligeramente una vez retirado el molde. Si no se desmorona se vuelve a secar hasta conseguir esta condición.
- Alcanzada la condición S.S.S., pesar de 400 a 500 gr de muestra ( $P_1$ ).
- Pesar el picnómetro lleno hasta la marca de aforo con agua ( $P_2$ ).

- Introducir el material en estado S.S.S., utilizando un embudo, en el picnómetro con 200 ml de agua.
- Extraer el aire atrapado en la arena del picnómetro, usando la bomba de vacío.
- Colmar hasta la marca de aforo del picnómetro con agua, impidiendo ingresar aire.
- Pesarse el picnómetro lleno hasta la marca con aforo con la arena y agua ( $P_3$ ).
- Verter el contenido del picnómetro en un recipiente y dejar secar a temperatura de  $110^{\circ}\text{C}$  durante por lo menos 24 horas.
- Pesarse el material seco sin el peso del recipiente ( $P_4$ ).

**FOTOGRAFÍA 3.3.1 ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN EN ARENA (AF -01)**



FUENTE: LEMSUR

ELABORADO POR: Erik Castro

### c) Cálculo

$$P_{\text{ESPECÍFICO}} = \frac{P_4}{P_2 + P_1 - P_3}$$

$$\delta_{\text{SSS}} = \frac{P_1}{P_2 + P_1 - P_3}$$

$$P_{\text{ESP-AP}} = \frac{P_4}{P_2 + P_4 - P_3}$$

$$\text{Abs} = \frac{P_1 - P_4}{P_4} \times 100\%$$

Donde,

$P_1$  = Peso del agregado en estado superficie saturada seca, en gr.

$P_2$  = Peso del frasco lleno de agua hasta la marca de aforo, en gr.

$P_3$  = Peso del frasco lleno de agua y agregado hasta la marca de aforo, en gr.

$P_4$  = Peso seco del agregado, en gr.

$P_{\text{ESPECÍFICO}}$  = Peso específico de la arena, en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

$\delta_{\text{SSS}}$  = Peso específico de la arena en estado SSS en,  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

$P_{\text{ESP-AP}}$  = Peso específico aparente del agregado fino, en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

Abs = Porcentaje de absorción, en %.

### 3.3.2. DENSIDADES APARENTES DE LA ARENA

Ya se ha establecido que la densidad de un material cambia con el valor de la compactación que se le aplique, por tal razón determinar los valores de las densidades aparentes suelta y compactada son importantes para el proceso de dosificación de hormigón.

El procedimiento de ensayo empleado acorde con las normas ASTM C 29 y NTE INEN 858.

#### a) Equipo empleado

- Molde cilíndrico.
- Barra de compactación (d =16mm x 600mm), punta redondeada.
- Balanza de capacidad de 20 Kg.

- Flexómetro.
- Pala.

## b) Procedimiento

### ***Densidad Suelta***

- Determinar el volumen del molde cilíndrico (V).
- Secar el material a 110°C en horno de temperatura constante por no menos de 24 horas.
- Pesar el recipiente vacío (P<sub>1</sub>).
- Llenar suavemente el molde con el material, retirar el sobrante y enrasar.
- Pesar el molde con el material suelto (P<sub>2</sub>).

### ***Densidad Compactada***

- Determinar el volumen del molde cilíndrico (V).
- Secar el material a 110°C en horno de temperatura constante por no menos de 24 horas.
- Pesar el recipiente vacío (P<sub>1</sub>).
- Llenar el molde en 3 capas de igual espesor, cada capa se compacta mediante 25 aplicaciones de la barra de compactación, retirar el sobrante y enrasar.
- Pesar el molde con el material suelto (P<sub>2</sub>).

## c) Cálculo

La densidad suelta o compactada se calcula:

$$\delta_{\text{APARENTE}} = \frac{P_2 - P_1}{V}$$

Donde,

$\delta_{\text{APARENTE}}$  = Densidad aparente de la arena, en gr/cm<sup>3</sup>.

P<sub>1</sub> = Peso del molde, en gr.

P<sub>2</sub> = Peso del molde con material, en gr.

V = Volumen del molde, en cm<sup>3</sup>.

### 3.3.3. GRANULOMETRÍA DE AGREGADO FINO

El estudio granulométrico de la arena corresponde a la distribución de las partículas, determinada por el análisis mediante tamices de aberturas cuadradas estandarizados de acuerdo a la norma ASTM C 33. Para el proceso de dosificación es importante distinguir, mediante la granulometría, el módulo de finura del material. Que representa un índice que permite evaluar o clasificar los agregados en función del tamaño de las partículas que las componen.

El procedimiento de ensayo empleado acorde con las normas ASTM C 136 y NTE INEN 696.

#### a) Equipo empleado

- Serie de tamices de Tyler y recomendados de Duff Abrams (3", 1<sup>1</sup>/<sub>2</sub>", 3/4", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200).
- Tamizadora automática.
- Balanza.
- Bandejas.
- Cepillo.
- Pala.
- Horno de ventilación y temperatura constante.

#### b) Procedimiento

- Poner a secar la arena en el horno a 110°C, durante aproximadamente 24 horas.
- Pesar la muestra seca inicial (alrededor de 400-500gr).
- Armar en la tamizadora, el juego de tamices en orden ascendente de tamaños de abertura, desde la bandeja de recolección hasta el tamiz de mayor abertura.
- Tamizar el material durante 5 a 10 minutos.
- Retirar el juego de tamices de la tamizadora y pesar el material atrapado en cada tamiz.

### c) Cálculo

Con los pesos retenidos en los tamices, se determina los porcentajes retenidos acumulados y el porcentaje que pasa por cada tamiz para obtener la curva granulométrica.

El MF presenta el tamaño medio ponderado del agregado, concepto elaborado por Duff Abrams (1925) con los tamices: 3", 1 1/2", 3/4", 3/8", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50 y N° 100.

$$M_F = \frac{\sum \% \text{retenido acumulados de los tamices de la serie Módulo de Finura}}{100}$$

Donde,

$M_F$  = Módulo de finura de agregado fino.

### 3.3.4. DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN ARENA

Dependiendo del lugar de procedencia del material o la condición de almacenaje, éste puede estar humedecido por el ambiente. Esta humedad presente puede influir en la proporción final de agua de mezcla de la dosificación, ocasionando un exceso de humedad perjudicial en la mezcla o resequedad en el concreto. Por tal motivo es importante determinar si el material incluye humedad propia.

La metodología de ensayo para obtener el contenido de humedad de la arena se detalla en la norma NTE INEN 862.

#### a) Equipo empleado

- Balanza.
- Bandejas metálicas.
- Horno de ventilación y temperatura constante.

**b) Procedimiento**

- Pesar una bandeja metálica ( $P_1$ ).
- Colocar de 200 a 400gr de muestra en la bandeja y pesar ( $P_2$ ).
- Dejar secar el material a temperatura constante de 110°C en horno durante aproximadamente de 18 a 24 horas.
- Pesar el recipiente con el material seco ( $P_3$ ).

**c) Cálculo**

$$\%W = \frac{P_2 - P_3}{P_3 - P_1} \times 100\%$$

Donde,

$P_1$  = Peso de la bandeja, en gr.

$P_2$  = Peso de la bandeja con muestra húmeda, en gr.

$P_3$  = Peso de la bandeja con muestra seca, en gr.

$\%W$  = Humedad del agregado, en %.

**3.3.5. CONTENIDO ORGÁNICO**

En el agregado fino que se obtiene de depósitos naturales, en ocasiones se presenta impurezas orgánicas, las cuales pueden llegar a afectar la hidratación del cemento durante su mezclado, que a la vez afecta a la calidad final de la mezcla de hormigón esperada. De tal forma que es indispensable identificar si existe presencia de material orgánico en la arena, para tomar medidas previas al mezclado como el lavado de la misma

El proceso de determinación de contenido orgánico en agregado fino se realiza mediante el ensayo de colorimetría, como se especifican en la ASTM C 40 y NTE INEN 855.

**a) Equipo empleado**

- Recipientes de vidrio graduados de 12 onzas.

- Reactivo estandarizado (solución de hidróxido de sodio).
- Placa de Gardner.

#### b) Procedimiento

- Preparar el reactivo como una solución de hidróxido de sodio al 3% con agua destilada.
- Colocar en el recipiente de vidrio el agregado fino hasta las 4.5 onzas (130ml).
- Colocar el reactivo hasta alcanzar los 200ml en el recipiente de vidrio.
- Tapar el recipiente, agitar vigorosamente y dejar en reposo durante 24 horas.
- Después de las 24 horas, comparar el color del líquido sobre la muestra en el recipiente con la escala de color de Gardner.

#### FOTOGRAFÍA 3.3.2 COMPARACIÓN DE AGREGADO FINO CON ESCALA DE GARDNER



FUENTE: LEMSUR

ELABORADO POR: Erik Castro

### c) Cálculo

Con la tabla de Gardner se determina si el material es apto para su uso en el diseño de hormigón.

**TABLA 3.3.1 VALORES ESCALA DE GARDNER**

Color	N° de color normal de Gardner	N° de referencia orgánica	Descripción
Igual a la solución	5	1	Material recomendado
Amarillo	8	2	Material recomendado
Naranja	11	3	Apto fabricación de hormigón
Rojo claro	14	4	Material descartado
Rojo oscuro	16	5	Material descartado

FUENTE: Giraldo, O. (2003). Manual de agregados para el hormigón. Medellín. Colombia

ELABORADO POR: Erik Castro

### 3.3.6. RESULTADOS OBTENIDOS

Se tabulan, a continuación, los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio:

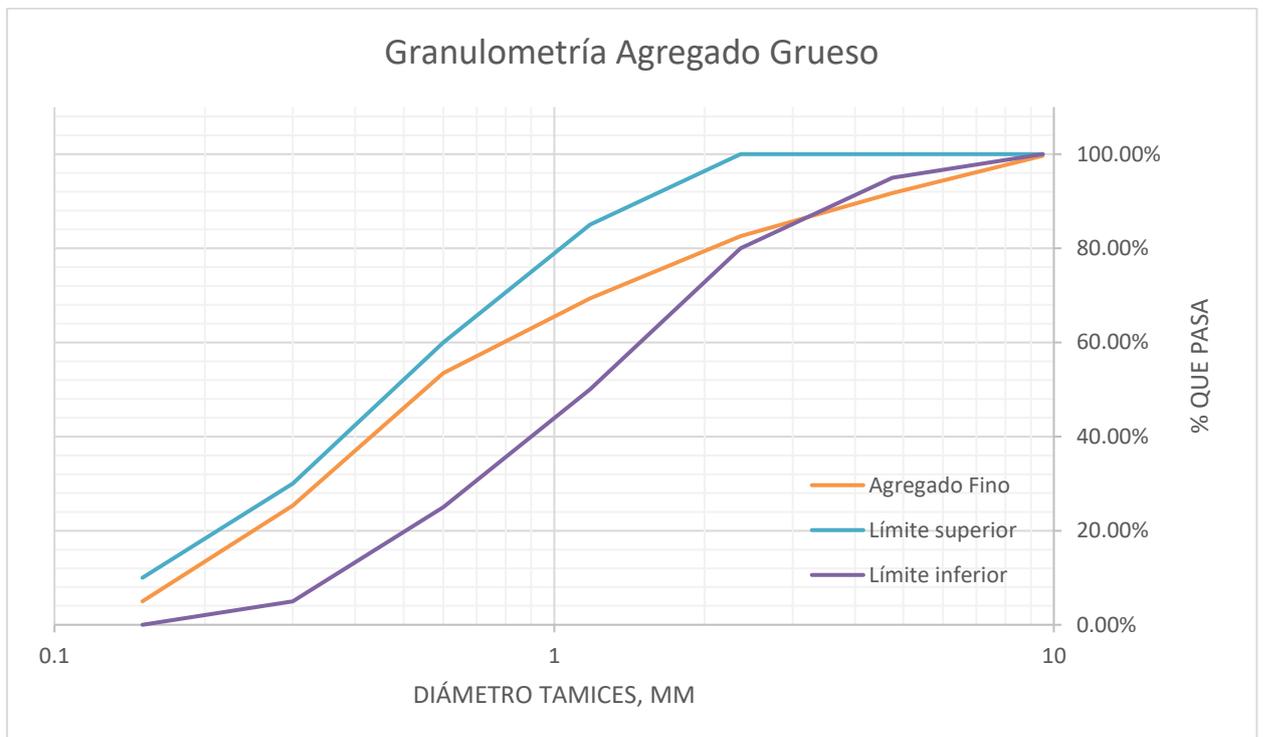
**TABLA 3.3.2 PROPIEDADES DE LA ARENA EMPLEADA (AF-01)**

Propiedades	Resultado	Unidad
Peso específico	2.46	gr/cm <sup>3</sup>
Peso específico S.S.S.	2.55	gr/cm <sup>3</sup>
Porcentaje de Absorción	3.80	%
Densidad aparente suelta	1.53	gr/cm <sup>3</sup>
Densidad aparente compactada	1.71	gr/cm <sup>3</sup>
Módulo de finura	2.73	-

Tamaño nominal	4.75	mm
Contenido de humedad	3.33	%
Contenido orgánico	2	N° placa

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 3.3.1 CURVA GRANULOMÉTRICA DE AGREGADO FINO PROVENIENTE DE CANTERA GUAYLLABAMBA (AF-01)**



ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 3.3.3 GRADACIÓN RECOMENDABLE PARA AGREGADO FINO**

Abertura de tamiz cuadrado		Límites de Gradación
N°	mm	
$\frac{3}{8}$ "	9.500	100%
N°4	4.750	100% - 95%
N°8	2.360	100% - 80%
N°16	1.180	85% - 50%
N°30	0.600	60% - 25%
N°50	0.300	30% - 10%
N°100	0.150	10% - 2%

FUENTE: NTE INEN 696 y ASTM C 136

ELABORADO POR: Erik Castro.

## **CAPÍTULO IV**

### **DISEÑO DE PATRONES DE ANÁLISIS**

#### **4.1. DISEÑO DE CONCRETO MÉTODO ACI**

La metodología de diseño de hormigón planteado por el Instituto Americano del Concreto (A.C.I.) proporciona un procedimiento para dosificación de mezclas basado en los parámetros físico-mecánicos de los agregados que se incorporan en el concreto, mediante el uso de tablas que permiten obtener valores que se expresan en peso y volumen de los componentes para fabricar un metro cúbico de hormigón.

El método planteado que se presenta en el A.C.I. 211.1, requiere que las propiedades de los materiales que componen la mezcla cumplan ciertas especificaciones dadas en las normas internacionales ASTM, que a su vez cumplen con las normas NTE-INEN.

El procedimiento para el diseño de mezclas de concreto desarrollado del A.C.I. es considerado empírico, a pesar de ello, ha sido comprobado y se basa principalmente en que el concreto dosificado, alcance una resistencia de diseño a compresión simple, a una edad específica, con una buena trabajabilidad en el proceso de fabricación.

Se optó, por la utilización de dos resistencias patrón en el estudio, que demuestren la variabilidad con la incorporación de la puzolana de ceniza volcánica. Los hormigones fueron diseñados para alcanzar las resistencias de 140 MPa y 240 MPa a la edad de 28 días, pero debido a la naturaleza de alta resistencia inicial del cemento utilizado se espera que alcance estos valores en menor tiempo, y a los 28 días superen las resistencias a la cuales fueron diseñadas.

## 4.2. PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACIÓN

Previo a la estimación de las cantidades de material en la dosificación, es necesario un estudio detallado de las especificaciones técnicas de la obra para establecer su tipo, así como también la puesta en sitio y la colocación del hormigón. Estas características brindan una mejor idea de las propiedades que se buscan obtener durante el diseño del hormigón.

Con la información de las propiedades de los agregados obtenidas en laboratorio y las características que se espera obtener del hormigón diseñado, se procede a realizar la dosificación para las resistencias previamente señaladas.

### 4.2.1. SELECCIÓN DEL ASENTAMIENTO

Cuando en las especificaciones técnicas de la construcción se requiera un hormigón de una consistencia definida, puede ser determinado mediante la tabla 4.2.1:

**TABLA 4.2.1 CONSISTENCIAS ESPERADAS EN HORMIGÓN FRESCO**

Consistencia	Asentamiento	
	(cm)	(pulg)
Seca	0 a 5	0" a 2"
Plástica	7.5 a 10	3" a 4"
Fluida	Mayor a 12.5	Mayor a 5"

FUENTE: Huanca, S. (2006). Diseño de Mezclas de Concreto. Perú

ELABORADO POR: Erik Castro

En caso que el dimensionamiento no indique un asentamiento o consistencia determinados, puede utilizarse la tabla 4.2.2 en función del elemento que se diseña.

**TABLA 4.2.2 ASENTAMIENTOS RECOMENDADOS DE ACUERDO A LOS ELEMENTOS DISEÑADOS**

<b>Tipo de construcción</b>	<b>Asentamiento</b>
Muros de cimentación y zapatas reforzadas	2.5 a 7.5 cm
Muros de subestructura, cajones y zapatas sin refuerzo	2.5 a 7.5 cm
Vigas y muros reforzados	2.5 a 10.0 cm
Columnas	2.5 a 10.0 cm
Pavimentos y losas	2.5 a 7.5 cm
Concreto masivo	2.5 a 7.5 cm

FUENTE: Luna, G. (2014). *Estudio del Hormigón*. Quito. Ecuador. Editorial Edicumbre.

ELABORADO POR: Erik Castro

En la elaboración de las probetas cilíndricas de hormigón del presente proyecto, se procedió a utilizar un valor de asentamiento esperado de 7.5 cm a 10 cm, correspondiente a una consistencia plástica, con buena trabajabilidad para ambos casos de resistencias patrón de 14 y 24 MPa.

#### **4.2.2. SELECCIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO**

Desde una visión económica, se puede aconsejar el usar el mayor tamaño de agregado permitido, cumpliendo que éste sea compatible con las dimensiones de los elementos estructurales (Luna, 2014). Sin embargo, el agregado debe cumplir:

- no ser mayor a  $1/5$  de la menor dimensión del elemento a fundirse.
- no ser mayor a  $1/3$  del espesor de la losa.
- no ser mayor a  $3/4$  del menor espacio libre de las varillas de refuerzo en el elemento.

De igual forma, se puede estimar el tamaño máximo nominal del material con el tipo de elemento diseñado, mediante la tabla 4.2.3:

**TABLA 4.2.3 TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO DE ACUERDO A LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

Dimensión menor de sección en cm (pulg)	Tamaño máximo nominal en cm (pulg)			
	Muros reforzados, Vigas y Columnas	Muros sin refuerzo	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6.4 a 12.7 (2.5 a 5)	1.2 a 1.9 (1/2 a 3/4)	1.9 (3/4)	1.9 a 2.5 (3/4 a 1)	1.9 a 3.8 (3/4 a 1 1/2)
15.2 a 28.0 (6 a 11)	1.9 a 3.8 (3/4 a 1 1/2)	3.8 (1 1/2)	3.8 (1 1/2)	3.8 a 7.6 (1 1/2 a 3)
30.5 a 73.7 (12 a 29)	3.8 a 7.6 (1 1/2 a 3)	7.6 (3)	3.8 a 7.6 (1 1/2 a 3)	7.6 (3)
Mayor a 76.2 (Mayor a 30)	3.8 a 7.6 (1 1/2 a 3)	15.2 (6)	3.8 a 7.6 (1 1/2 a 3)	7.6 a 15.2 (3 a 6)

FUENTE: Luna, G. (2014). *Estudio del Hormigón*. Quito. Ecuador. Editorial Edicumbre.

ELABORADO POR: Erik Castro

El tipo de construcción no es un factor decisivo en el proceso de dosificación del presente proyecto; pero se optó por utilizar agregado grueso, debido a la disponibilidad del material, cuyo tamaño nominal es de 19.00 mm en el diseño para las resistencias de 14 y 24 MPa.

#### **4.2.3. VOLUMEN DEL AGUA DE MEZCLADO Y AIRE INCLUIDO**

La cantidad de agua se estima en función al asentamiento requerido y al tamaño máximo de agregado presente en la mezcla, mediante la tabla 4.2.4, sugerida por el ACI 211:

**TABLA 4.2.4 CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO POR METRO CÚBICO REQUERIDA ACORDE AL TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO GRUESO Y ASENTAMIENTO DESEADO**

Asentamiento, en cm	Agua en lt/m <sup>3</sup> de concreto para los tamaños nominales máximos del árido grueso, en cm (pulg)							
	0.95	1.27	1.90	2.54	3.81	5.08	7.62	15.24
	(3/8)	(1/2)	(3/4)	(1)	(1 1/2)	(2)	(3)	(6)
<b>HORMIGÓN SIN AIRE INCLUIDO</b>								
2.5 a 5.1	208	198	183	178	163	153	144	124
7.6 a 10.2	228	218	203	193	178	168	158	139
15.2 a 17.8	243	228	213	203	188	178	168	149
Porcentaje de aire incluido en el hormigón, %.	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
<b>HORMIGÓN CON AIRE INCLUIDO</b>								
2.5 a 5.1	183	178	163	153	144	134	124	109
7.6 a 10.2	203	193	178	168	158	149	139	119
15.2 a 17.8	213	203	188	178	168	158	149	129
Porcentaje de aire incluido en el hormigón, %.	8.0	7.0	6.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0

FUENTE: Luna, G. (2014). *Estudio del Hormigón*. Quito. Ecuador. Editorial Edicumbre.

ELABORADO POR: Erik Castro

Se consideró en el presente proyecto, hormigón sin inclusión de aire, para obtener concreto de peso normal; como se indicó en las tablas 4.2.1 y 4.2.3., se optó por un asentamiento de 7.5 a 10 cm y 1.9 mm de tamaño nominal de agregado grueso. Obteniéndose 203 Lt de agua por 1m<sup>3</sup> de concreto, con un 2% de aire incluido en la mezcla, para ambas resistencias patrón.

#### 4.2.4. SELECCIÓN DE RELACIÓN AGUA/CEMENTO (A/C)

Entre los parámetros más importantes del diseño de la mezcla se distingue la relación agua-cemento, ya que con este parámetro se cumple el requisito de resistencia del concreto diseñado. La relación agua/cemento, se expresa como:

$$a/c = \frac{\text{Peso de agua de mezclado}}{\text{Peso de cemento}}$$

El valor de la relación a/c se determina con la tabla 4.2.5, de acuerdo a la resistencia probable.

**TABLA 4.2.5 VALORES DE RELACIÓN AGUA-CEMENTO PARA DISEÑO EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA**

Resistencia a la compresión probable a los 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación agua-cemento en peso	
	Hormigón sin aire incluido	Hormigón con aire incluido
420	0.35	---
350	0.45	0.35
280	0.53	0.42
240	0.58	0.45
210	0.62	0.53
140	0.80	0.70

FUENTE: Luna, G. (2014). *Estudio del Hormigón*. Quito. Ecuador. Editorial Edicumbre.

ELABORADO POR: Erik Castro

Como se estableció en el numeral 4.2.3, el hormigón diseñado es sin inclusión de aire, y de acuerdo a los requerimientos de resistencia establecidos previamente, se tiene la utilización de relaciones agua-cemento de 0.80 para concreto de  $f'c = 140$  MPa y 0.58 para concreto de  $f'c = 240$  MPa.

#### 4.2.5. CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL CEMENTO

Con la cantidad de agua y relación a/c establecidas, se calcula el factor cemento que representa el total de cemento por 1m<sup>3</sup> de concreto diseñado y se lo expresa como:

$$\text{Factor cemento} = \frac{\text{Cantidad de agua por m}^3}{\text{Relación a/c}}$$

Una vez determinado el factor cemento, calcular el volumen real de cemento que se va a utilizar con su valor de densidad:

$$\text{Volumen real de cemento} = \frac{\text{Factor cemento}}{\text{Densidad real del cemento}}$$

#### 4.2.6. ESTIMACIÓN DE ÁRIDOS GRUESO Y FINO

El volumen de agregado grueso se determina en función del estudio granulométrico de los agregados. Utilizando el tamaño máximo del agregado y el MF de la arena en la tabla 4.2.6, presentada por el Comité 211 del ACI se obtiene el volumen aparente compactado del árido grueso en m<sup>3</sup> por cada unidad cúbica de concreto.

**TABLA 4.2.6 ESTIMACIÓN DE VOLUMEN APARENTE DEL ÁRIDO GRUESO (RIPIO) PARA 1 M<sup>3</sup> DE CONCRETO**

Tamaño máximo nominal del agregado		Volumen de árido grueso, seco y compactado por unidad de volumen de hormigón						
		Módulo de finura del agregado fino						
cm	pulg	2.40	2.50	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00
1.00	3/8	0.50	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44
1.25	1/2	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53
1.90	3/4	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.60
2.54	1	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65
3.81	1 1/2	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.70
5.08	2	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72
7.62	3	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75
15.24	6	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81

FUENTE: ACI 211 (1991) ACI 211. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. American Concrete Institute.

ELABORADO POR: Erik Castro

El análisis granulométrico del agregado fino permitió determinar el módulo de finura con un valor de 2.73, y con 1.90 cm de tamaño nominal del agregado grueso; se determina de la tabla 4.2.6.: 0.63 m<sup>3</sup> de volumen aparente de árido grueso en un metro cúbico de hormigón. Con el volumen aparente del ripio, por unidad de hormigón diseñado, se puede calcular el volumen del agregado grueso en condición S.S.S., por medio de la expresión:

$$V_{\text{ripio S.S.S.}} = V_{\text{aparente compactado}} \times \frac{\delta_{\text{compactada ripio}}}{\delta_{\text{SSSripio}}}$$

Calculados los volúmenes de agua, cemento, árido grueso y la estimación de aire atrapado para 1m<sup>3</sup> de hormigón, se determina el volumen de agregado fino, que se determina como la cantidad que falta para completar el metro cúbico de hormigón.

$$V_{\text{agregado fino}} = 1\text{m}^3_{\text{hormigón}} - V_{\text{agua}} - V_{\text{cemento}} - V_{\text{agregado grueso}} - V_{\text{aire atrapado}}$$

Con los valores de volumen de los materiales y la densidad conocida de los mismos, se obtiene la cantidad en peso de cada componente.

$$P_{\text{componente}} = \delta_{\text{real}} \times V_{\text{componente}}$$

#### 4.2.7. CORRECCIÓN POR HUMEDAD Y ABSORCIÓN DE LOS ÁRIDOS

Ya que los agregados cuentan con humedad propia o del lugar de almacenaje del material, es necesario realizar una corrección a la porción de agua en la dosificación, ya que la misma, solo es considerada como la porción de agua necesaria en el proceso de hidratación del cemento y suficiente para llevar a los agregados a la condición S.S.S. Con la absorción de cada agregado se puede calcular un factor de corrección de agua de acuerdo a la expresión:

$$\Delta A_{\text{agregado}} = P_{\text{agregado}} \times \left( \frac{100 + \%Abs}{100 + W\%} - 1 \right)$$

Donde,

$\Delta A_{\text{agregado}}$  = Diferencia de agua por corrección de humedad.

$P_{\text{agregado}}$  = Peso del material en estado seco.

$\%Abs$  = Absorción del material.

$W\%$  = Contenido de humedad del material.

Si la diferencia de material resulta positiva, esta cantidad se adiciona al peso de agua de la dosificación, por el contrario, si la diferencia resulta negativa se resta a la cantidad de agua total de la dosificación; e igualmente se ven modificados los pesos de los agregados, si se agrega el agua, se retira material y viceversa.

#### **4.2.8. MOLDEO DE PROBETAS CILÍNDRICAS**

Una vez realizada la dosificación, se realiza la fabricación de las probetas cilíndricas correspondientes a las mezclas desarrolladas. De acuerdo al criterio del ACI 318-08, en la sección 5.3.3.2, se establece que por cada dosificación deben elaborarse y curarse mínimo dos cilindros, de 150x300mm, o tres cilindros de 100x200mm, los mismos que deben ser ensayados a la edad fijada para obtener el valor de  $f'c$  (ACI, 2008). En el presente proyecto se optó por utilizar cuatro probetas de 100x200mm, para obtener el promedio de resistencias con mayor precisión, de acuerdo a la disponibilidad de ceniza volcánica. La elaboración de las probetas cilíndricas de hormigón se detalla en la ASTM C 31 y NTE INEN 1576.

Se utilizan moldes que cumplan los requisitos establecidos por la norma ASTM C 470, tienen que ser bien ajustados y colocar en su interior una capa ligera de aceite mineral o sustancia desmoldante. Los cilindros de 100x200mm se llenan con el concreto fresco y se compacta en 2 capas con 25 golpes distribuidas en la superficie con el uso de una varilla de compactación ( $10 \pm 2$  mm de diámetro). Después de compactar cada capa se golpea por la parte externa del molde en 15 ocasiones con un martillo de caucho, para realizar vibración que permitan distribuir correctamente el material y retirar el aire atrapado. Una vez los moldes son completados con la mezcla, se enrasan y se los deja en una ubicación plana y uniforme para permitirles que fragüen. Al día siguiente se desencofra los cilindros y se los deja reposar en una cámara de curado que cumpla los requisitos que se presentan en las normas NTE INEN 2528 y ASTM C 511.

#### FOTOGRAFÍA 4.2.1 CILÍNDROS EN LA CÁMARA DE CURADO



FUENTE: LEMSUR

ELABORADO POR: Erik Castro

#### 4.2.9. RESULTADOS DOSIFICACIÓN

##### 4.2.9.1. RESULTADOS DE DOSIFICACIÓN PARA $f'c = 14$ MPA

TABLA 4.2.7 VALORES UTILIZADOS EN DOSIFICACIÓN DE 14 MPA

Resistencia esperada a los 28 días	14	MPa
Asentamiento	7.5	cm
Tamaño máximo agregado	1.9	cm
Volumen de agua	203	Lt agua/m <sup>3</sup> hormigón
Aire atrapado	2	%
Relación a/c	0.8	-
Vol. Aparente de Agregado Grueso	0.63	m <sup>3</sup> ripio /m <sup>3</sup> hormigón
Factor cemento	253.75	Kg cemento/m <sup>3</sup> hormigón
Volumen real de cemento	88.72	dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Volumen real árido grueso en S.S.S.	357.90	dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Volumen de aire	20	dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Volumen de Arena	330.38	dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\Delta A$ arena	-7.83	Kg
$\Delta A$ ripio	+15.74	Kg

ELABORADO POR: Erik Castro

TABLA 4.2.8 CANTIDAD DE MATERIAL PARA 1 M3 DE HORMIGÓN DE 14 MPA

Componente	Cantidad en volumen real (dm <sup>3</sup> )	Densidad real (Kg/dm <sup>3</sup> )	Cantidad en peso (Kg)	Cantidad relativa en peso
Agua	203	1	210.91	0.83
Cemento	88.72	2.86	253.75	1.00
Arena	330.38	2.5	833.78	3.29
Ripio	357.90	2.57	904.06	3.56
Aire	20	0	0.00	0.00
<b>TOTAL</b>	1000		2202.50	

\*Los valores de corrección por humedad del agregado ya se encuentran incluidos.

ELABORADO POR: Erik Castro

#### 4.2.9.2. RESULTADOS DE DOSIFICACIÓN PARA F'c = 24 MPA

TABLA 4.2.9 VALORES UTILIZADOS EN DOSIFICACIÓN DE 24 MPA

Resistencia deseada	24	MPa
Asentamiento	7.5	cm
Tamaño máximo agregado	1.9	cm
Volumen de agua	203	Lt agua/m <sup>3</sup> hormigón
Aire atrapado	2	%
Relación a/c	0.58	
Vol. Aparente de Agregado Grueso	0.63	m <sup>3</sup> ripio /m <sup>3</sup> hormigón
Factor cemento	350	Kg cemento/m <sup>3</sup> hormigón
Volumen real de cemento	122.38	dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Volumen real árido grueso en S.S.S.	357.90	dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Volumen de aire	20	dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Volumen de Arena	296.72	dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
ΔA arena	-7.04	Kg
ΔA ripio	+15.74	Kg

ELABORADO POR: Erik Castro

TABLA 4.2.10 CANTIDAD DE MATERIAL PARA 1 M3 DE HORMIGÓN DE 24 MPA

Componente	Cantidad en volumen real (dm <sup>3</sup> )	Densidad real (Kg/dm <sup>3</sup> )	Cantidad en peso (Kg)	Cantidad relativa en peso
Agua	203	1	211.71	0.83
Cemento	122.38	2.86	350.00	1.00
Arena	296.72	2.5	748.84	3.29
Ripio	357.90	2.57	904.06	3.56
Aire	20	0	0.00	0.00
<b>TOTAL</b>	1000		2214.60	

\*Los valores de corrección por humedad del agregado ya se encuentran incluidos.

ELABORADO POR: Erik Castro

#### 4.2.9.3. DOSIFICACIÓN CON REEMPLAZOS DE PUZOLANA

El reemplazo de cemento por puzolana de origen volcánico se realiza con los valores finales de la dosificación en peso, reemplazando las cantidades en peso de cemento con los porcentajes al 5%, 10%, 15% y 20% de puzolana, obteniéndose para un metro cúbico de hormigón:

TABLA 4.2.11 DOSIFICACIÓN PARA 1 M<sup>3</sup> CON REEMPLAZO DE PUZOLANA

Resistencia	% de reemplazo	Agua (Kg)	Cemento (Kg)	Arena (Kg)	Ripio (Kg)	Puzolana (Kg)
f'c=14 MPa	Patrón	210.91	253.75	833.78	904.06	0
	5%	210.91	241.06	833.78	904.06	12.69
	10%	210.91	228.38	833.78	904.06	25.34
	15%	210.91	215.69	833.78	904.06	38.06
	20%	210.91	203	833.78	904.06	50.75
f'c=24 MPa	Patrón	211.71	350	748.84	904.06	0
	5%	211.71	332.50	748.84	904.06	17.50
	10%	211.71	315	748.84	904.06	35

	15%	211.71	297.50	748.84	904.06	52.50
	20%	211.71	280	748.84	904.06	70

ELABORADO POR: Erik Castro

### 4.3. ENSAYOS DE LABORATORIO

Los parámetros utilizados para comprobar el empleo adecuado de la calidad del concreto mediante pruebas de laboratorio son: la densidad del hormigón, resistencia a la compresión simple y módulo de Young. Estos parámetros obtenidos en laboratorio permiten determinar la diferencia entre la resistencia real que obtienen los cilindros respecto a la resistencia de diseño por el método ACI 211.11. Adicionalmente, se puede determinar las diferencias y variaciones de las dosificaciones, para los cilindros con inclusión de puzolana respecto a los cilindros patrones.

#### 4.3.1. DENSIDAD DEL HORMIGÓN

La densidad del hormigón corresponde a la relación directa de la masa del concreto y su volumen ocupado. Este parámetro del hormigón dependerá del grado de compactación y de la densidad de los áridos utilizados en la mezcla. Para hormigones bien compactados, con áridos de densidades normales, la densidad del hormigón oscila entre 2100- 2800 kg/m<sup>3</sup> (Herrera, 2008).

Para determinar la densidad en probetas de hormigón acorde a la norma NTE INEN 1573, se utiliza la relación:

$$\text{Densidad} = \frac{W}{V}$$

Donde:

W = Masa de la probeta de hormigón, kg.

V = Volumen de la probeta, m<sup>3</sup>.

#### 4.3.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

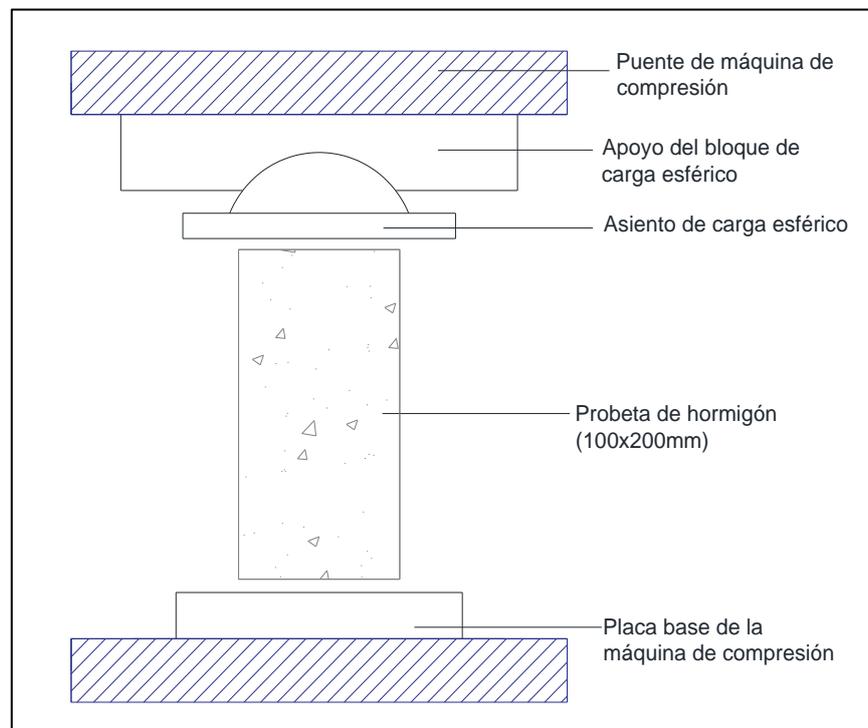
Una de las propiedades más importantes obtenidos de los ensayos de los cilindros de hormigón, es su valor de resistencia a la compresión, la cual permite cuantificar el desempeño del concreto, es también utilizado como factor para realizar diseños de obras civiles; y controlarlas en sus especificaciones.

El ensayo se encuentra normado a nivel nacional en la NTE INEN 1573 y a nivel internacional por la ASTM C 39. El ensayo se compone de la aplicación de una fuerza axial sobre el cilindro de hormigón, hasta que éste llegue al punto de falla (rotura del cilindro).

Como ya se había determinado previamente, para este proyecto de investigación se optó por usar cuatro cilindros para poder confirmar la veracidad de los resultados, los especímenes normados a las dimensiones de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura. Utilizando cuatro probetas por cada dosificación a las edades de 3, 7, 14 y 28 días; las edades de ensayo son seleccionadas debido a la naturaleza del cemento que presenta características de resistencia la compresión a tempranas edades.

El ensayo se realiza con el uso de una prensa hidráulica, la cual aplica una carga axial sobre el cilindro de hormigón con una velocidad de  $0.25 \pm 0.05$  MPa/s, la carga debe ser constante para obtener la curva esfuerzo-deformación del hormigón sin variaciones fuertes que alteren los resultados esperados de la prueba.

### ILUSTRACIÓN 4.3.1 ESQUEMA DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN



ELABORADO POR: Erik Castro

Se aplica la fuerza constante hasta obtener la carga en la que la muestra falle, la que se presenta en diferentes tipos de falla, de acuerdo a la calidad de los materiales, fabricación y el ensayo. Las fallas que puede presentar el espécimen se indican en la tabla 4.3.1:

**TABLA 4.3.1 FORMAS DE FALLAS CARACTERÍSTICAS DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE HORMIGÓN ENSAYADOS A COMPRESIÓN SIMPLE**

Tipos de falla	Descripción
	<p>Obtenido cuando existe una carga axial de compresión bien aplicada en un cilindro bien preparado. Los esfuerzos internos son correctamente distribuidos en el espécimen de concreto.</p>

	<p>Obtenido en cilindros con superficies de aplicación de la carga desviadas. Los esfuerzos internos se distribuyen en forma desigual hacia un lado del cilindro, provocando una inclinación prominente en el plano de falla.</p>
	<p>Obtenido con cilindros que presentan una cara convexa y/o defectos del refrentado, también por concavidad de la placa del cabezal. Los esfuerzos internos se distribuyen de forma irregular provocando un plano de fallo inconsistente.</p>
	<p>Obtenido con cilindros que presentan superficie de aplicación cóncava y/o defectos del refrentado. Los esfuerzos internos se distribuyen de forma irregular provocando un plano de fallo inconsistente.</p>
	<p>Obtenido en cilindros que presentan puntos sobresalientes en la superficie de aplicación, defectos del refrentado, rugosidades en el cabezal. Los esfuerzos internos se distribuyen de forma irregular provocando un plano de fallo inconsistente.</p>
	<p>Obtenido con cilindros con una superficie de aplicación de carga convexa y/o defectos del refrentado, rugosidades en el cabezal o placas de carga. Los esfuerzos internos se distribuyen de forma irregular provocando un plano de fallo inconsistente.</p>
	<p>Obtenido en cilindros con superficies de aplicación de la carga desviadas del paralelismo o desviaciones del centro del cilindro en la colocación de la carga. Los esfuerzos internos se distribuyen de forma irregular provocando un plano de fallo inclinada.</p>

FUENTE: IMCYC. (2008). Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto de: <http://www.imcyc.com/ct2008/nov08/PROBLEMAS.pdf>

ELABORADO POR: Erik Castro

La resistencia a la compresión de probetas de hormigón se obtiene de la relación entre la carga máxima de rotura que alcanza la probeta en el ensayo y el valor del área de la sección donde se aplica la carga.

$$f'c = \frac{F}{A_{\text{probeta}}}$$

Donde,

$f'c$  = Resistencia a la compresión simple, en MPa.

$F$  = Carga máxima del ensayo, en kN.

$A_{\text{probeta}}$  = Sección del cilindro, en  $\text{mm}^2$ .

#### FOTOGRAFÍA 4.3.1 ENSAYO DE CILINDROS A COMPRESIÓN.



FUENTE: LEMSUR

ELABORADO POR: Erik Castro

#### 4.3.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de Young o módulo elástico en los materiales, se define como el cociente de la diferencia del valor del esfuerzo que recibe y la deformación longitudinal unitaria que esta produce, esto dentro del rango elástico de los materiales. El módulo de Young sirve de parámetro para determinar la rigidez del material frente

a una carga a la que se somete; cuanto más rígido es el material, el módulo elástico es mayor.

El ensayo para determinar el módulo de Young estático (Lineal) del concreto se especifica en la norma ASTM C 469. Utilizando el principio de carga estática y la deformación que produce para determinar el valor del módulo de Young.

El ensayo se realiza dentro del rango elástico del material, para el caso del hormigón, dicho rango corresponde aproximadamente hasta el 40% de su resistencia máxima a la compresión. Se aplica una carga en tres ciclos constantes de un minuto, mientras se mide la deformación mediante el uso de extensómetros conectados al espécimen de hormigón.

#### **FOTOGRAFÍA 4.3.2 ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD CON EXTENSÓMETROS**



FUENTE: LEMSUR

ELABORADO POR: Erik Castro

De acuerdo a los métodos de cálculo del módulo elástico descritos en la ASTM C 469, se empleará el método de la secante, evaluando la inclinación (pendiente) del segmento que corta por los puntos 1 (Cero) y 2 (40% de  $f_c$ ) en la gráfica 4.3.2. Se tiene entonces, que el módulo de Young por el criterio de la recta secante corresponde a:

$$E_c = \frac{\sigma_f - \sigma_0}{\delta_f - \delta_0}$$

Donde,

$E_c$  = Módulo de elasticidad, en MPa.

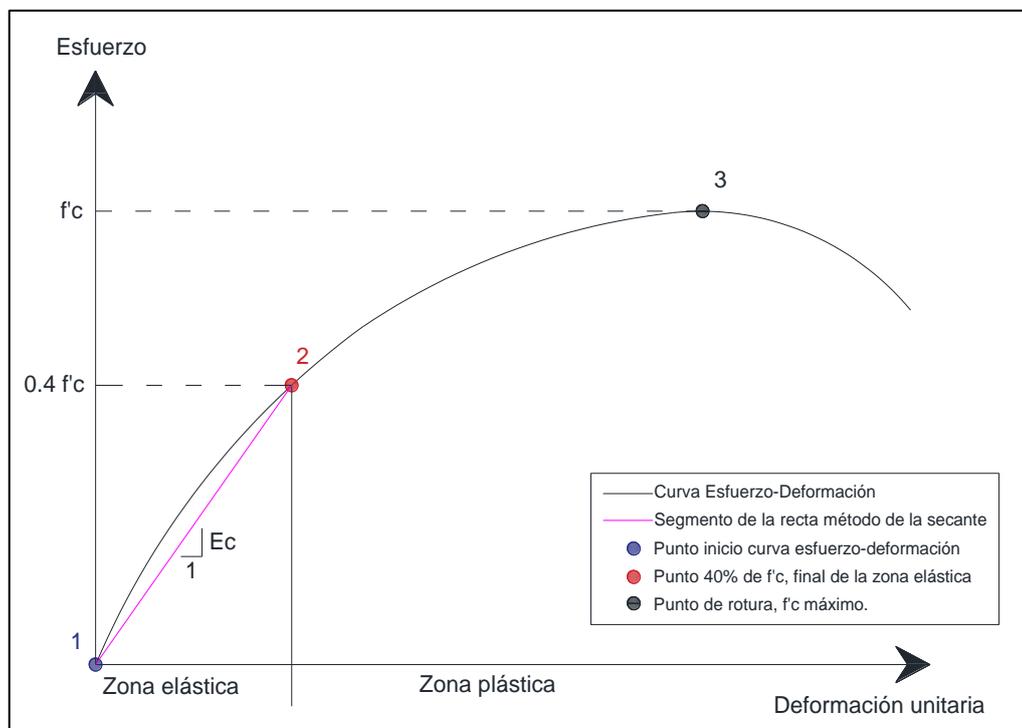
$\sigma_f$  = Esfuerzo final al valor del 40% de resistencia máxima a la compresión, en MPa.

$\sigma_0$  = Esfuerzo inicial, en MPa.

$\delta_f$  = Deformación unitaria final al 40% de  $f_c$ .

$\delta_0$  = Deformación unitaria inicial.

#### ILUSTRACIÓN 4.3.2 CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN PARA DETERMINAR MÓDULO DE YOUNG POR EL CRITERIO DE LA SECANTE



ELABORADO POR: Erik Castro

De acuerdo al ACI 318-08, se puede calcular el valor teórico del módulo de Young de acuerdo a la relación planteada (ACI, 2008):

$$E_c = 4700 \times \sqrt{f'_c}$$

Donde,

$E_c$  = Módulo de elasticidad para hormigones de densidad normal (2.0 a 2.8 T/m<sup>3</sup>), en MPa.

$f'_c$  = Resistencia a la compresión, en MPa.

La ecuación está presente dentro del Código de la Construcción Ecuatoriana, para el diseño bajo acciones sísmicas, específicamente en la NEC-SE-DS.

#### **4.3.4. RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO**

Los valores de los resultados de las pruebas de laboratorio se muestran resumidas en las tablas a continuación; en la sección de anexos se presentan con detalle los valores en los informes de laboratorio de las probetas de hormigón ensayadas y los valores de los resultados.

#### 4.3.4.1. DENSIDAD DEL HORMIGÓN

**TABLA 4.3.2 VALORES PROMEDIO (20 CILINDROS) DE DENSIDADES PARA CILINDROS DE 14 MPA.**

<b>Muestra</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (kg/ m<sup>3</sup>)</b>
Patrón	3684.19	1622.427	2271.19
5% puzolana	3702.84	1599.097	2288.82
10% puzolana	3677.41	1629.453	2272.38
15% puzolana	3609.45	1602.995	2238.67
20% puzolana	3635.44	1616.059	2251.45

ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.3 VALORES PROMEDIO (20 CILINDROS) DE DENSIDADES PARA CILINDROS DE 24 MPA.**

<b>Muestra</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (kg/ m<sup>3</sup>)</b>
Patrón	3725.09	1639.704	2290.64
5% puzolana	3731.84	1628.809	2291.44
10% puzolana	3724.25	1627.854	2287.43
15% puzolana	3717.41	1609.069	2286.97
20% puzolana	3725.62	1655.819	2290.70

ELABORADO POR: Erik Castro

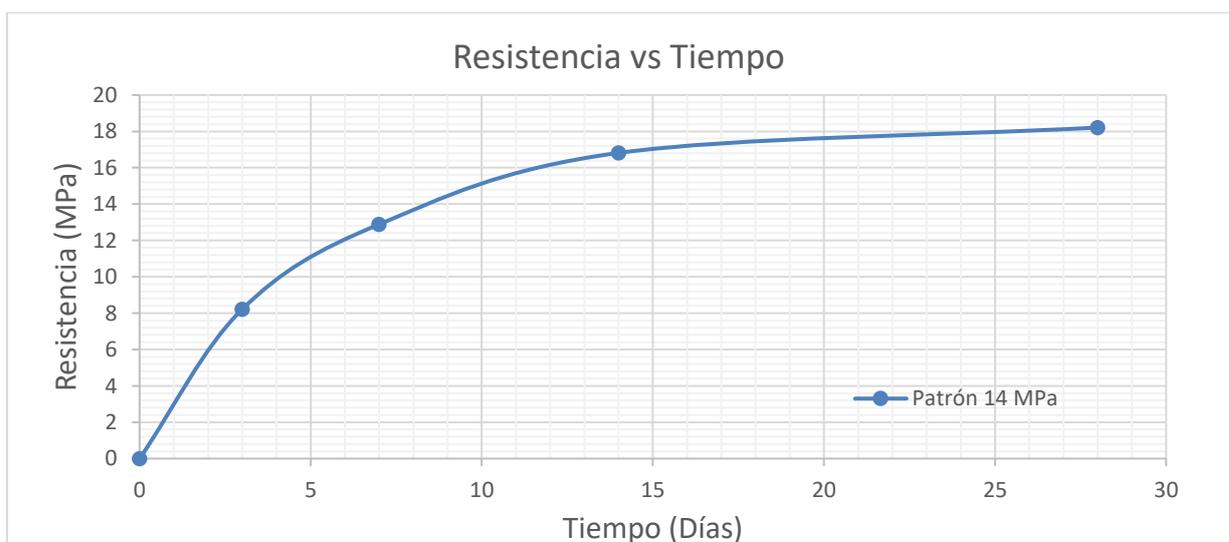
#### 4.3.4.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

**TABLA 4.3.4 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN PATRÓN DE 14 MPA.**

Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	f'c (Mpa)	Media f'c (MPa)
3	81.39	66.81	8.21	8.21
	81.39	66.11	8.12	
	79.56	65.54	8.24	
	81.23	67.32	8.29	
7	82.03	104.37	12.72	12.88
	80.60	104.33	12.94	
	80.75	105.81	13.10	
	81.47	104.01	12.77	
14	81.15	135.8	16.73	16.81
	81.95	136.54	16.66	
	81.71	143.75	17.59	
	80.83	131.54	16.27	
28	80.52	146.44	18.19	18.21
	81.15	149.47	18.42	
	81.47	145.32	17.84	
	80.20	147.52	18.39	

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 4.3.1 CURVA DE RESISTENCIA-TIEMPO EN DOSIFICACIÓN PATRÓN DE 14 MPA.**



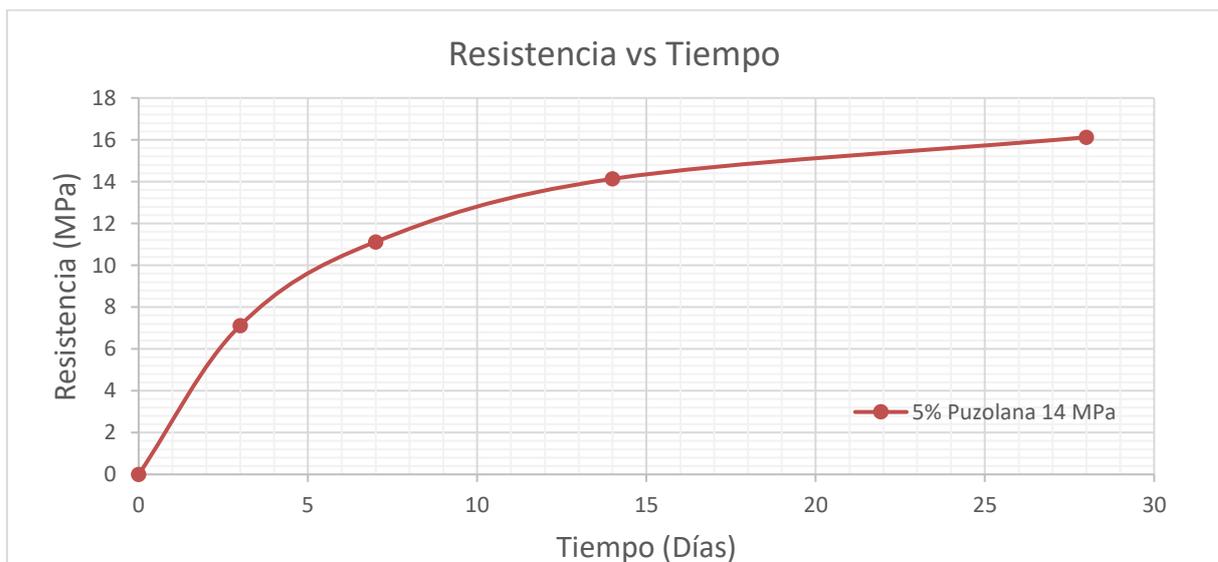
ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.5 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 5% DE PUZOLANA DE 14 MPA.**

Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	f'c (Mpa)	Media f'c (MPa)
3	80.36	57.23	7.12	7.12
	80.04	59.46	7.43	
	80.12	55.93	6.98	
	80.83	56.23	6.96	
7	80.52	88.52	10.99	11.12
	79.72	88.61	11.11	
	81.71	89.99	11.01	
	81.55	92.7	11.37	
14	81.63	115.67	14.17	14.13
	80.99	117.53	14.51	
	79.80	110.69	13.87	
	80.52	112.56	13.98	
28	81.71	128.34	18.19	16.12
	82.27	135.23	18.42	
	81.55	132.33	17.84	
	81.15	130.78	18.39	

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 4.3.2 CURVA DE RESISTENCIA-TIEMPO EN DOSIFICACIÓN CON 5% DE PUZOLANA DE 14 MPA.**



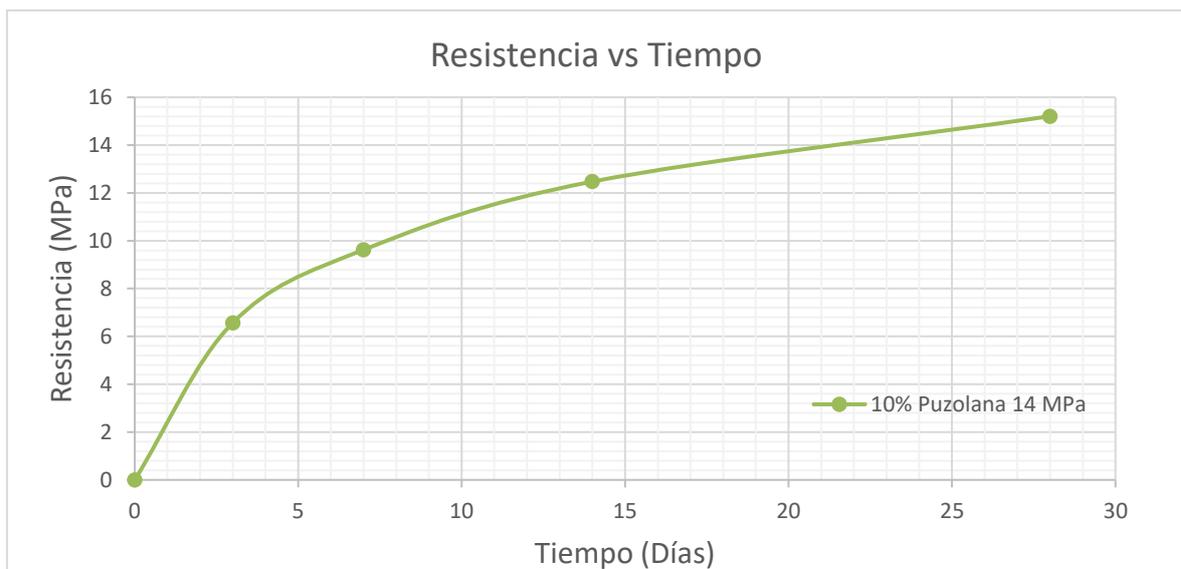
ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.6 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 10% DE PUZOLANA DE 14 MPA.**

Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	f'c (Mpa)	Media f'c (MPa)
3	81.47	52.91	6.49	6.57
	79.64	54.1	6.79	
	79.96	51.35	6.42	
	81.15	53.23	6.56	
7	82.11	82.56	10.05	9.62
	80.44	74.15	9.22	
	79.88	78.46	9.82	
	81.07	76.12	9.39	
14	81.79	103.9	12.70	12.47
	81.63	98.71	12.09	
	80.44	102.73	12.77	
	80.91	99.78	12.33	
28	79.88	119.16	14.92	15.20
	82.68	127.22	15.39	
	82.11	125.84	15.33	
	81.15	123.26	15.19	

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 4.3.3 CURVA DE RESISTENCIA-TIEMPO EN DOSIFICACIÓN CON 10% DE PUZOLANA DE 14 MPA.**



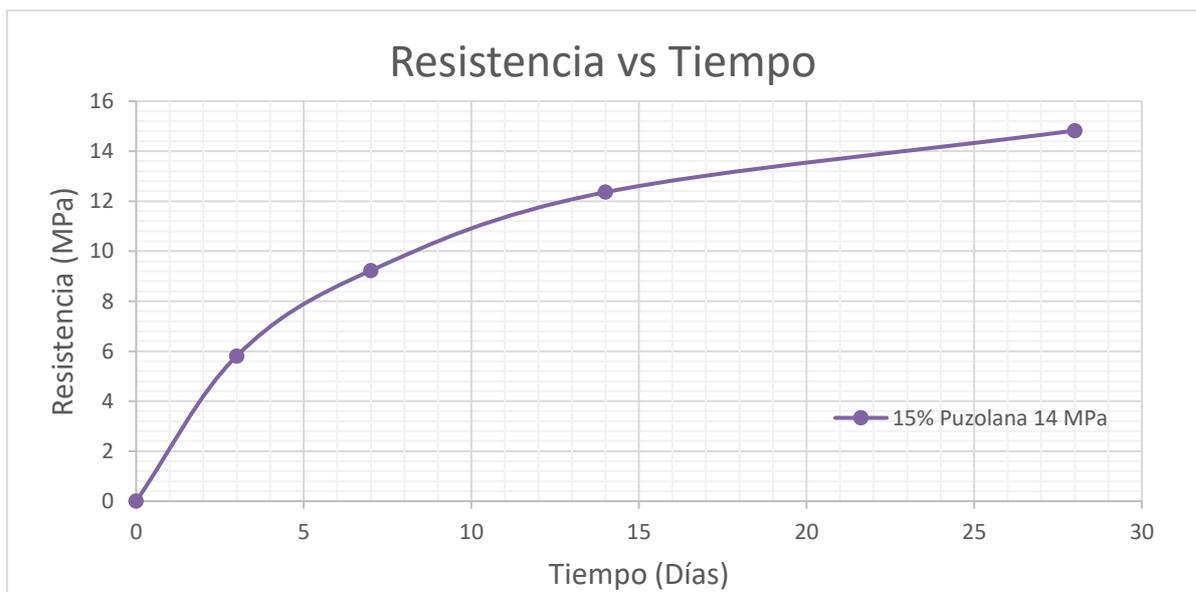
ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.7 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 15% DE PUZOLANA DE 14 MPA.**

Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	f'c (Mpa)	Media f'c (MPa)
3	81.23	45.68	5.62	5.81
	80.52	45.95	5.71	
	80.91	49.13	6.07	
	80.99	47.23	5.83	
7	80.99	71.30	8.80	9.23
	80.91	74.40	9.19	
	80.20	77.88	9.71	
	81.87	75.28	9.19	
14	80.52	104.85	13.02	12.36
	81.79	98.98	12.10	
	81.15	97.55	12.02	
	80.52	99.03	12.30	
28	81.31	115.58	14.21	14.82
	80.12	124.43	15.53	
	81.79	121.18	14.81	
	81.15	119.60	14.74	

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 4.3.4 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO EN DOSIFICACIÓN CON 15% DE PUZOLANA DE 14 MPA.**



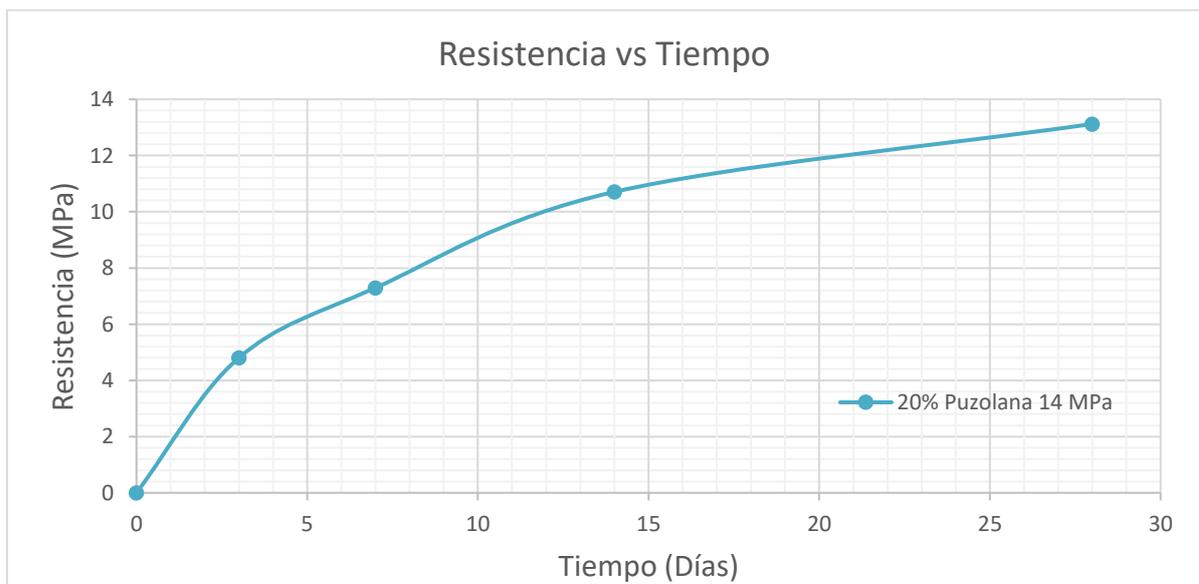
ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.8 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 20% DE PUZOLANA DE 14 MPA.**

Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	f'c (Mpa)	Media f'c (MPa)
3	81.07	38.00	4.69	4.80
	81.23	41.31	5.09	
	81.79	39.70	4.85	
	80.36	36.85	4.59	
7	80.28	51.29	6.39	7.29
	79.96	59.64	7.46	
	81.95	69.39	8.47	
	82.35	56.49	6.86	
14	80.44	86.23	10.72	10.71
	81.31	95.84	11.79	
	82.52	81.88	9.92	
	80.20	83.40	10.40	
28	80.44	110.91	13.79	13.12
	81.23	102.79	12.65	
	81.07	105.29	12.99	
	82.11	107.25	13.06	

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 4.3.5 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO PARA DOSIFICACIÓN CON 20% DE PUZOLANA DE 14 MPA.**



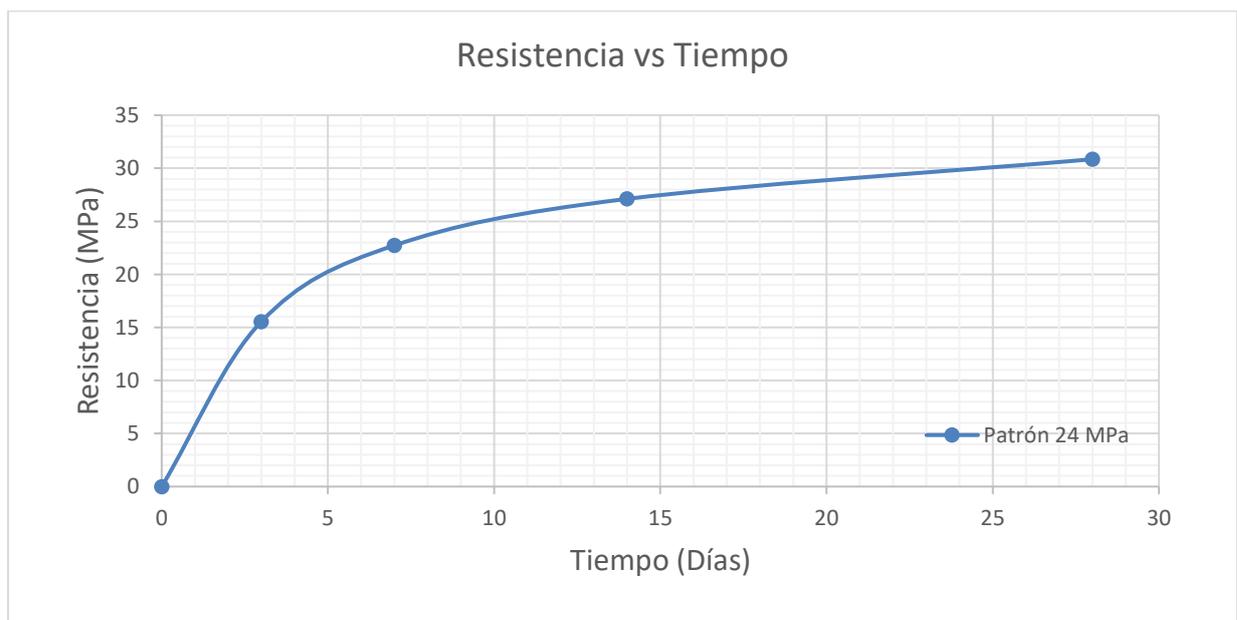
ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.9 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN PATRÓN DE 24 MPA.**

Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	f'c (Mpa)	Media f'c (MPa)
3	82.52	130.1	15.77	15.55
	79.25	123.65	15.60	
	80.20	122.87	15.32	
	81.31	126.2	15.52	
7	81.23	176.63	21.74	22.73
	80.28	179.21	22.32	
	81.55	187.44	22.98	
	81.79	195.15	23.86	
14	79.88	201.56	25.23	27.11
	82.11	223.16	27.18	
	80.60	220.3	27.33	
	80.20	230.12	28.69	
28	81.15	253.2	31.20	30.85
	82.35	254.81	30.94	
	81.55	245.02	30.04	
	81.07	252.96	31.20	

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 4.3.6 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO PARA DOSIFICACIÓN PATRÓN DE 24 MPA.**



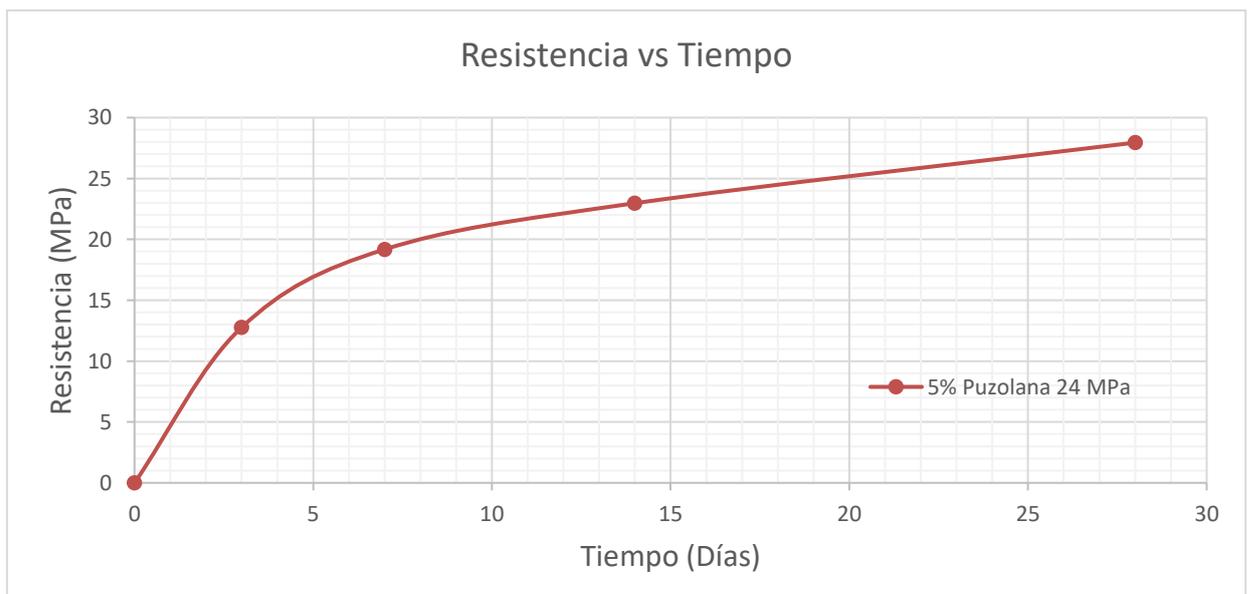
ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.10 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 5% DE PUZOLANA DE 24 MPA.**

Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	f'c (Mpa)	Media f'c (MPa)
3	80.99	109.78	13.55	12.77
	80.04	101.05	12.63	
	81.23	100.4	12.36	
	81.39	102.2	12.56	
7	81.15	158.26	19.50	19.18
	81.87	160.56	19.61	
	80.44	146.81	18.25	
	79.96	154.7	19.35	
14	80.67	181.46	22.49	22.97
	81.71	185.69	22.72	
	81.39	193.71	23.80	
	81.87	187.2	22.86	
28	81.87	224.4	27.41	27.95
	81.63	222.84	27.30	
	81.31	236.33	29.06	
	81.47	228.23	28.01	

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 4.3.7 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO PARA DOSIFICACIÓN CON 5% DE PUZOLANA DE 24 MPA.**



ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.11 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 10% DE PUZOLANA DE 24 MPA.**

Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	f'c (Mpa)	Media f'c (MPa)
3	81.39	102.93	12.65	12.32
	81.31	95.55	11.75	
	81.63	102.71	12.58	
	81.39	100.23	12.31	
7	80.04	145.06	18.12	18.51
	81.39	156.8	19.26	
	82.84	150.33	18.15	
	82.68	153.1	18.52	
14	80.36	176.48	21.96	22.59
	81.87	181.82	22.21	
	79.72	186.56	23.40	
	80.52	183.52	22.79	
28	81.95	225.48	27.51	26.70
	80.60	207.77	25.78	
	80.44	220.11	27.36	
	80.52	210.56	26.15	

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 4.3.8 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO PARA DOSIFICACIÓN CON 10% DE PUZOLANA DE 24 MPA.**



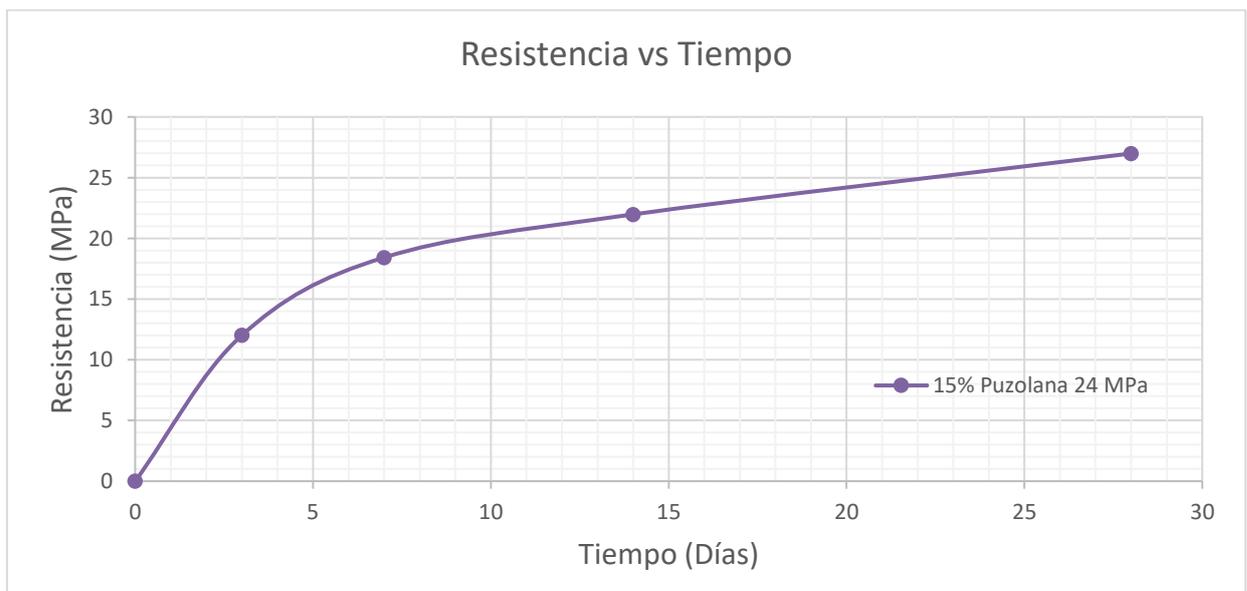
ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.12 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 15% DE PUZOLANA DE 24 MPA.**

Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	f'c (Mpa)	Media f'c (MPa)
3	81.71	98.1	12.01	12.01
	80.28	98.32	12.25	
	80.67	95.24	11.81	
	81.39	97.63	11.99	
7	79.64	142.4	17.88	18.42
	82.52	153.21	18.57	
	83.16	154.63	18.59	
	81.71	152.39	18.65	
14	80.75	177.69	22.00	21.97
	79.96	178.74	22.35	
	80.75	177.04	21.92	
	81.55	176.23	21.61	
28	80.75	224.25	27.77	26.99
	81.63	216.88	26.57	
	81.39	219.39	26.95	
	80.60	214.86	26.66	

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 4.3.9 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO PARA DOSIFICACIÓN CON 15% DE PUZOLANA DE 24 MPA.**



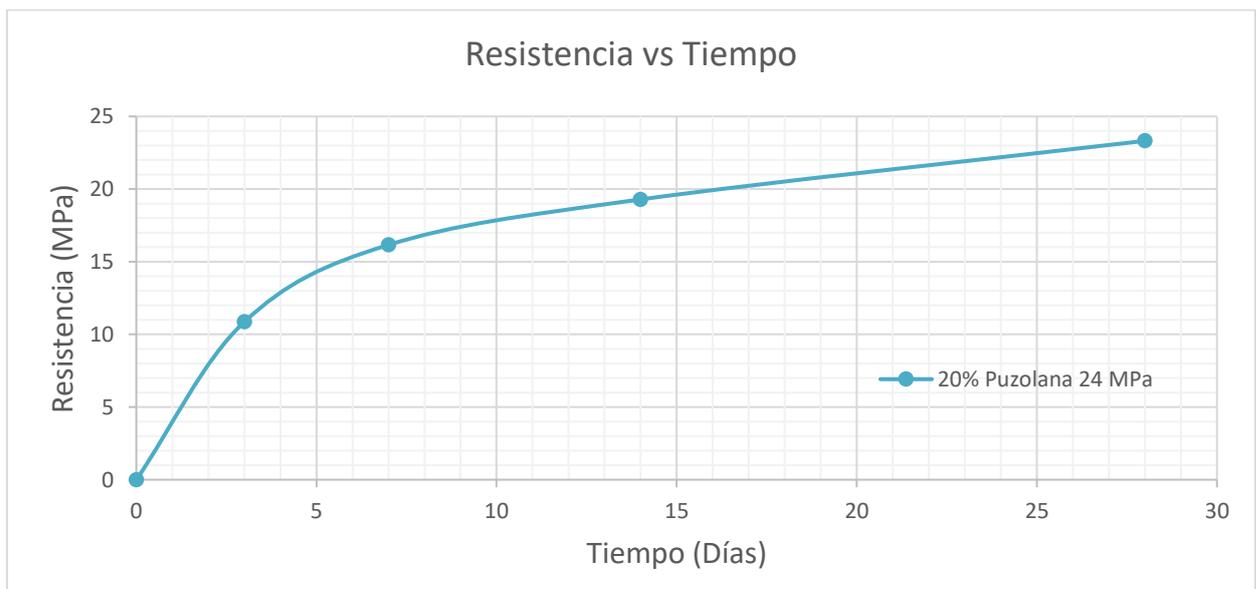
ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.13 VALORES PROMEDIO (4 CILINDROS) PARA DOSIFICACIÓN CON 20% DE PUZOLANA DE 24 MPA.**

Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	f'c (Mpa)	Media f'c (MPa)
3	81.71	89.82	10.99	12.01
	81.39	89.98	11.06	
	82.19	87.03	10.59	
	81.79	88.56	10.83	
7	80.60	133.87	16.61	18.42
	80.75	126.26	15.64	
	80.20	128.65	16.04	
	80.04	130.89	16.35	
14	79.56	148.53	18.67	21.97
	82.52	151.28	18.33	
	81.79	161.12	19.70	
	79.96	163.62	20.46	
28	81.55	179.74	22.04	26.99
	79.96	182.11	22.78	
	81.71	194.29	23.78	
	80.99	199.89	24.68	

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 4.3.10 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO PARA DOSIFICACIÓN CON 20% DE PUZOLANA DE 24 MPA.**



ELABORADO POR: Erik Castro

#### 4.3.4.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD

**TABLA 4.3.14 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN PATRÓN DE 14 MPA.**

<b>Patrón 14 MPa</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación unitaria (cm/cm)x10<sup>-6</sup></b>
<b>Punto inicial</b>	0.00	0.00
<b>Punto final</b>	7.07	400.00
<b>Módulo de Elasticidad Secante (MPa)</b>	17675.17	

ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.15 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 14 MPA CON 5% DE PUZOLANA.**

<b>5% Puzolana 14 MPa</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación unitaria (cm/cm)x10<sup>-6</sup></b>
<b>Punto inicial</b>	0.00	0.00
<b>Punto final</b>	6.41	355.00
<b>Módulo de Elasticidad Secante (MPa)</b>	18055.93	

ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.16 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 14 MPA CON 10% DE PUZOLANA.**

<b>10% Puzolana 14 MPa</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación unitaria (cm/cm)x10<sup>-6</sup></b>
<b>Punto inicial</b>	0.00	0.00
<b>Punto final</b>	6.11	325.00
<b>Módulo de Elasticidad Secante (MPa)</b>	18811.05	

ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.17 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 14 MPA CON 15% DE PUZOLANA.**

<b>15% Puzolana 14 MPa</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación unitaria (cm/cm)x10<sup>-6</sup></b>
<b>Punto inicial</b>	0.00	0.00
<b>Punto final</b>	5.91	300.00
<b>Módulo de Elasticidad Secante (MPa)</b>	19691.94	

ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.18 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 14 MPA CON 20% DE PUZOLANA.**

<b>20% Puzolana 14 MPa</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación unitaria (cm/cm)x10<sup>-6</sup></b>
<b>Punto inicial</b>	0.00	0.00
<b>Punto final</b>	5.09	260.00
<b>Módulo de Elasticidad Secante (MPa)</b>	19559.63	

ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.19 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN PATRÓN DE 24 MPA.**

<b>Patrón 24 MPa</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación unitaria (cm/cm)x10<sup>-6</sup></b>
<b>Punto inicial</b>	0.00	0.00
<b>Punto final</b>	12.27	535.00
<b>Módulo de Elasticidad Secante (MPa)</b>	22938.90	

ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.20 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 24 MPA CON 5% DE PUZOLANA.**

<b>5% Puzolana 24 MPa</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación unitaria (cm/cm)x10<sup>-6</sup></b>
<b>Punto inicial</b>	0.00	0.00
<b>Punto final</b>	11.13	505.00
<b>Módulo de Elasticidad Secante (MPa)</b>	22046.28	

ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.21 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 24 MPA CON 10% DE PUZOLANA.**

<b>10% Puzolana 24 MPa</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación unitaria (cm/cm)x10<sup>-6</sup></b>
<b>Punto inicial</b>	0.00	0.00
<b>Punto final</b>	10.70	630.00
<b>Módulo de Elasticidad Secante (MPa)</b>	16982.20	

ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.22 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 24 MPA CON 15% DE PUZOLANA.**

<b>15% Puzolana 24 MPa</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación unitaria (cm/cm)x10<sup>-6</sup></b>
<b>Punto inicial</b>	0.00	0.00
<b>Punto final</b>	10.47	550.00
<b>Módulo de Elasticidad Secante (MPa)</b>	19043.89	

ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.23 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE ACUERDO AL CRITERIO DE LA RECTA SECANTE (ASTM C-469) PARA DOSIFICACIÓN DE 24 MPA CON 20% DE PUZOLANA.**

<b>20% Puzolana 24 MPa</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación unitaria (cm/cm)x10<sup>-6</sup></b>
<b>Punto inicial</b>	0.00	0.00
<b>Punto final</b>	9.05	430.00
<b>Módulo de Elasticidad Secante (MPa)</b>	21057.28	

ELABORADO POR: Erik Castro

**TABLA 4.3.24 MÓDULOS DE ELASTICIDAD POR MÉTODO DEL ACI**

<b>Muestra</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidad (MPa)</b>
Patrón 14 MPa	18.21	20056.39
14 MPa Reemplazo 5% puzolana	16.12	18870.37
14 MPa Reemplazo 10% puzolana	15.2	18323.97
14 MPa Reemplazo 15% puzolana	14.82	18093.47
14 MPa Reemplazo 20% puzolana	13.12	17024.12
Patrón 24 MPa	30.85	26105.10
24 MPa Reemplazo 5% puzolana	27.95	24847.85
24 MPa Reemplazo 10% puzolana	26.7	24285.86
24 MPa Reemplazo 15% puzolana	26.99	24417.39
24 MPa Reemplazo 20% puzolana	23.32	22696.67

ELABORADO POR: Erik Castro

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

Se presenta un análisis completo de los valores de los resultados de los ensayos de laboratorio, como también el análisis con las diferencias de los valores determinados con las dosificaciones patrones respecto a las dosificaciones de hormigón con reemplazo de puzolana.

#### 5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PASTA DE CEMENTO

Los parámetros representativos del cemento con los efectos de la combinación de la puzolana de origen volcánico, se pueden observar en los valores obtenidos de las pruebas de consistencia normal de cemento y los tiempos de fraguado.

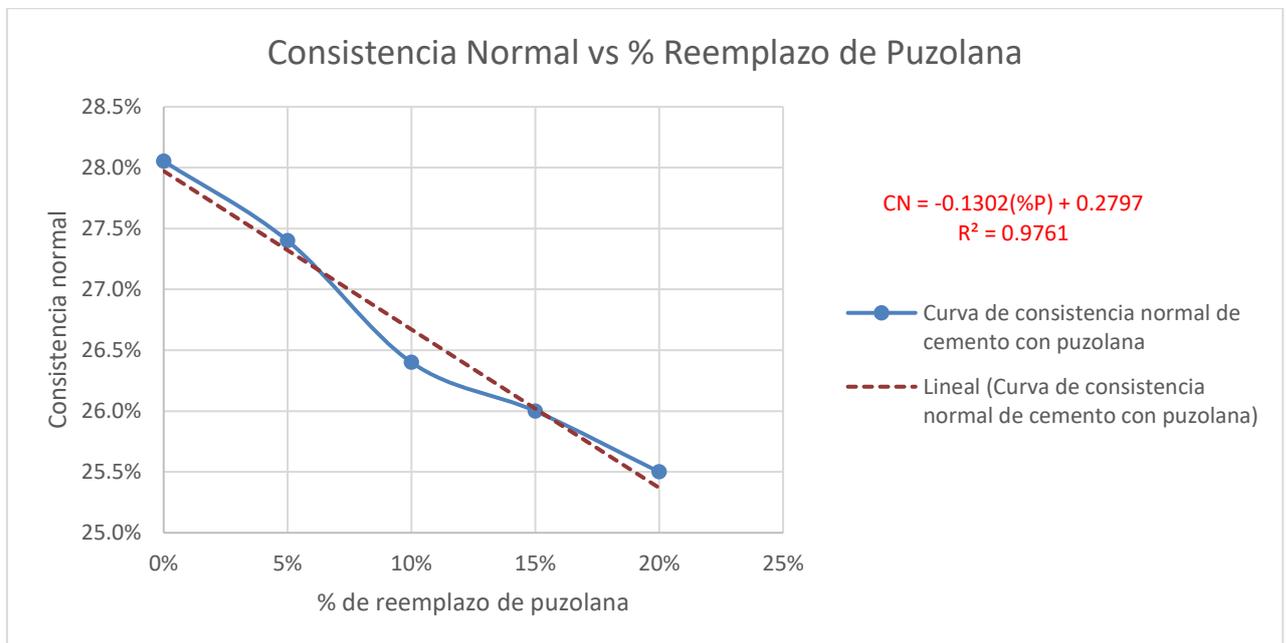
##### 5.2.1. CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO

**TABLA 5.2.1 VALORES DE CONSISTENCIA NORMAL DE CEMENTO CON INCLUSIÓN DE PUZOLANA.**

<b>Muestra</b>	<b>Consistencia normal de cemento</b>
Cemento	28.1%
Reemplazo 5%	27.4%
Reemplazo 10%	26.4%
Reemplazo 15%	26.0%
Reemplazo 20%	25.5%

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 5.2.1 VARIACIÓN DE CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO CON REEMPLAZO DE PUZOLANA.**



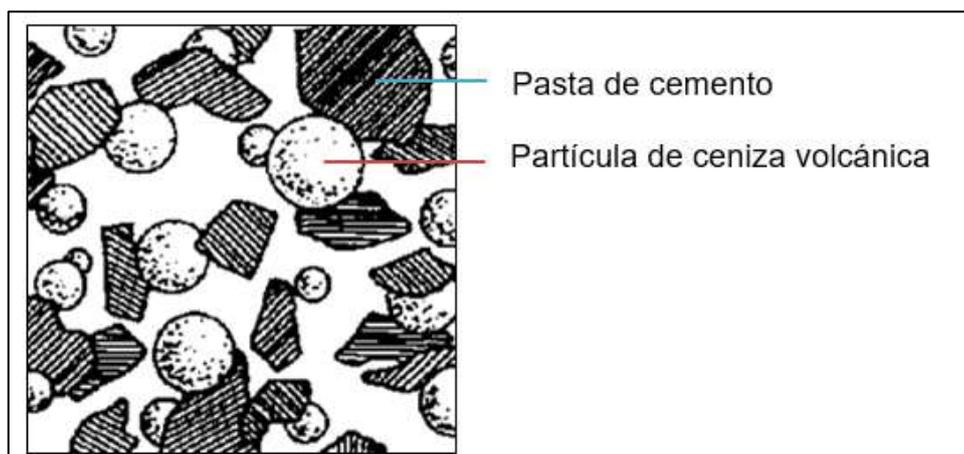
ELABORADO POR: Erik Castro

Se puede evidenciar una clara tendencia de reducción de la proporción de agua indispensable para llegar a la completa hidratación en las partículas cementantes, que se puede expresar con la siguiente ecuación lineal: **CN = -0.13(%P) + 0.28**. Esto se debe a dos razones principales:

-Al utilizar un porcentaje de puzolana que reemplaza el cemento, existe una menor cantidad de partículas de cemento que se hidratan y por tal motivo es menor la cantidad de agua utilizada para hidratarlas; mientras que las partículas de puzolana también se hidratan y reaccionan.

-Otra razón para la disminución de la cantidad de agua necesaria, es por la disposición esférica de las partículas que componen la ceniza, que permiten un mejor acomodamiento en las partículas de la pasta agua-cemento, y por tanto, una mayor facilidad para que la sonda Tetmayer penetre la pasta durante el ensayo (Ossa & Jorquera, 1984).

**ILUSTRACIÓN 5.2.1 ESQUEMA DE PARTÍCULAS DE PUZOLANA EN PASTA DE CEMENTO.**



FUENTE: <http://ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms09.html>

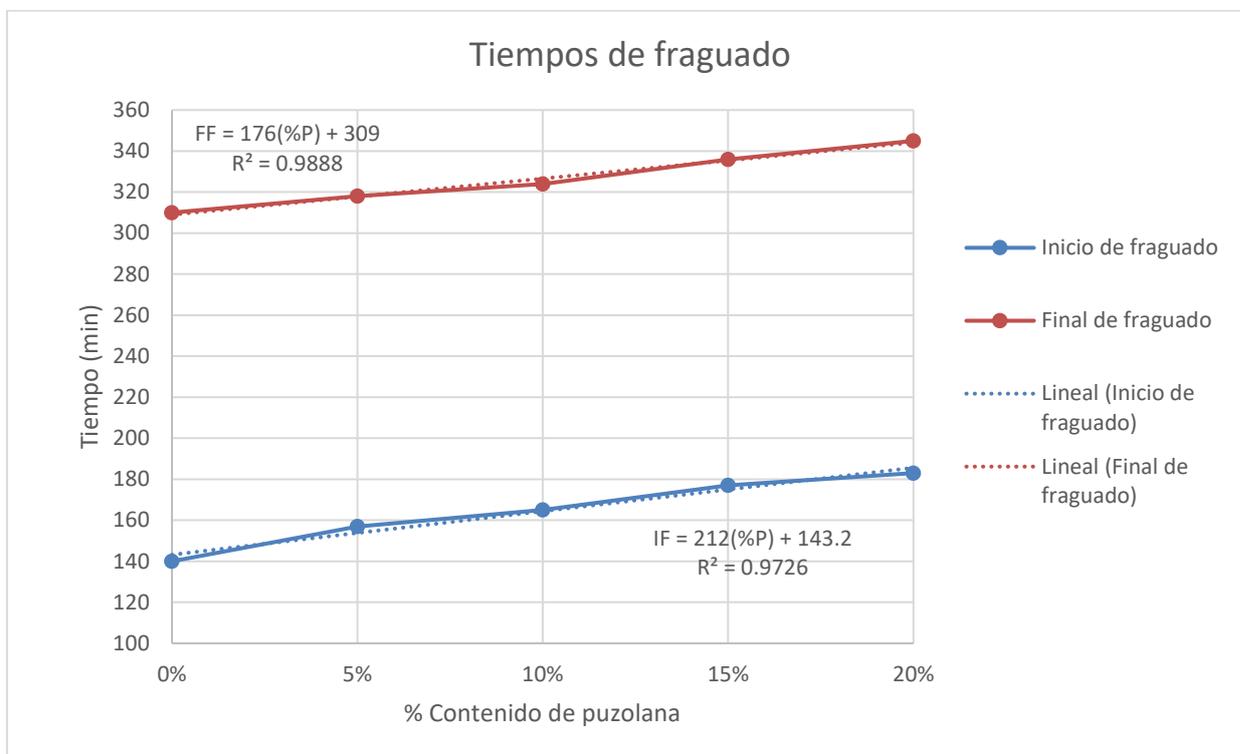
**5.2.2. TIEMPOS DE FRAGUADO**

**TABLA 5.2.2 TIEMPOS DE FRAGUADO DE CEMENTO CON INCLUSIÓN DE PUZOLANA**

<b>Muestra</b>	<b>Tiempo inicial de fraguado</b>	<b>Tiempo final de fraguado</b>	<b>Intervalo de tiempo desde el inicio hasta el final de fraguado</b>
Cemento	140 min	310 min	170 min
Reemplazo 5%	157 min	318 min	161 min
Reemplazo 10%	165 min	324 min	159 min
Reemplazo 15%	177 min	336 min	159 min
Reemplazo 20%	184 min	345 min	161 min

ELABORADO POR: Erik Castro

GRÁFICA 5.2.2 TIEMPOS DE FRAGUADO DE CEMENTO CON INCLUSIÓN DE PUZOLANA



Los valores de tiempo inicial de fraguado que se presentan cumplen con la exigencia en la norma INEN 490, que especifica: que el tiempo hasta el inicio del fraguado no debe ser menor a 45 minutos y mayor a 420 minutos. Sin embargo, se evidencia que conforme se incrementa la cantidad de puzolana reemplazada en la pasta de cemento, el inicio del fraguado se extiende y de forma similar el tiempo final de fraguado. Pero el intervalo de tiempo entre el inicio y final de fraguado se mantiene similar (aproximadamente 160 min) para las muestras que contienen puzolana. El retraso, tanto del fraguado inicial como el final, se debe a que las partículas de ceniza retardan el proceso de hidratación de la sílice, demorando el proceso en que la pasta adquiere resistencia mecánica (Ossa & Jorquera, 1984).

Los valores obtenidos presentan tendencias lineales, las cuales se pueden expresar mediante las ecuaciones: Inicio de Fraguado,  $IF = 212(\%P) + 143.2$ ; Final de Fraguado,  $FF = 176(\%P) + 309$ . Ecuaciones válidas para intervalos de reemplazo del 0% a 20% de puzolana por masa de cemento.

### 5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PROBETAS DE HORMIGÓN

Mediante los ensayos realizados a los especímenes de hormigón, se puede determinar el comportamiento mecánico del hormigón diseñado con las diferentes dosificaciones de reemplazo. La resistencia a la compresión representa el parámetro determinante en probetas de hormigón, y obtener su variabilidad con el uso de puzolanas aporta una mejor comprensión al uso de dicho material.

#### 5.3.1. DENSIDAD DEL HORMIGÓN

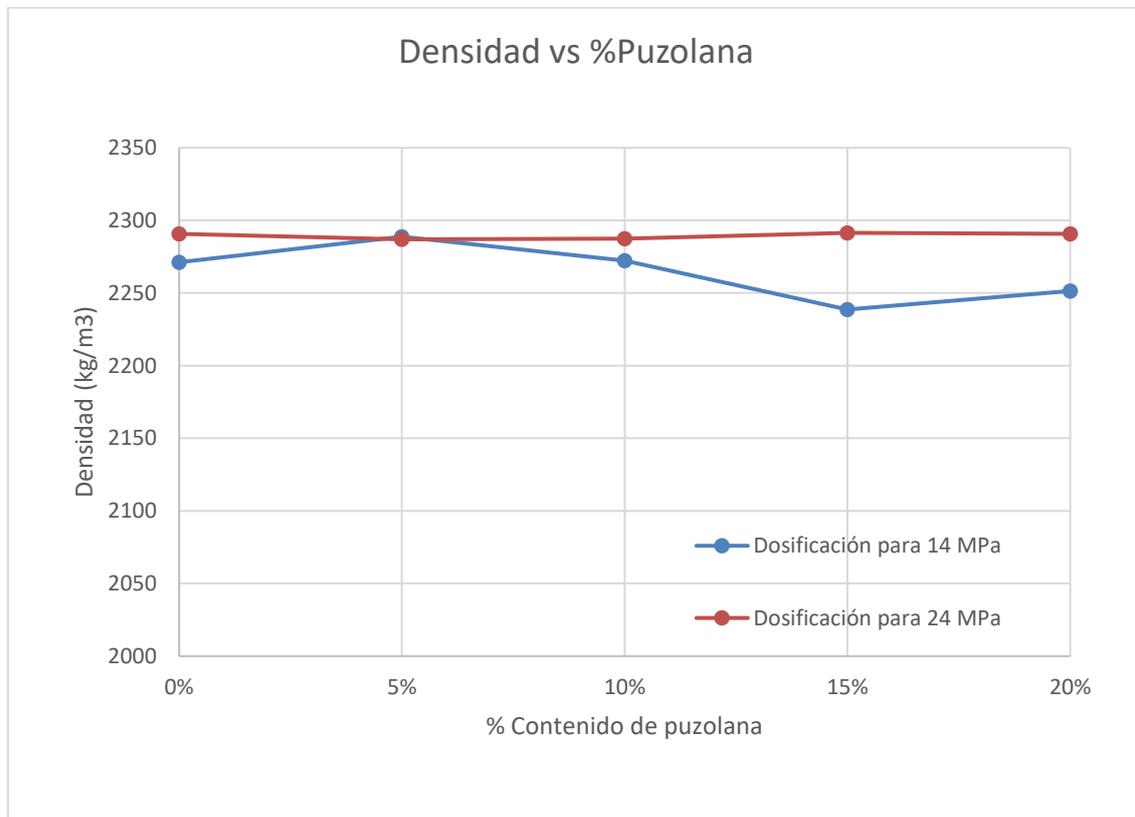
TABLA 5.3.1 RESUMEN DE DENSIDADES DE HORMIGÓN PROMEDIO (20 CILÍNDROS).

Muestra	Dosificación para 14 MPa	Dosificación para 24 MPa
	Densidad (kg/ m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/ m <sup>3</sup> )
Patrón	2271.19	2290.71
5% puzolana	2288.82	2286.97
10% puzolana	2272.38	2287.43
15% puzolana	2238.67	2291.44
20% puzolana	2251.45	2290.64
Promedio	2264.50	2289.44

ELABORADO POR: Erik Castro

De acuerdo a la tabla y la gráfica 5.3.1., se puede evidenciar que los valores de densidades del hormigón no varían de forma significativa con el uso de puzolanas, e indicando una ligera tendencia a menor densidades con las dosificaciones de 14 MPa; aun así, obteniéndose densidades dentro de un rango normal para el hormigón entre 2.2 y 2.3 T/m<sup>3</sup>.

**GRÁFICA 5.3.1 CURVA DENSIDAD VS PORCENTAJE DE PUZOLANA REEMPLAZADA EN DOSIFICACIONES DE 14 Y 24 MPA.**



ELABORADO POR: Erik Castro

### 5.3.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN

Se indican los valores de resistencia a compresión obtenidas de los ensayos de carga con las probetas de hormigón patrón de 14 MPa, con el porcentaje de resistencia alcanzado por cada una de ellas, en la tabla:

**TABLA 5.3.2 CUADRO DE RESUMEN DE RESISTENCIAS PROMEDIO PARA DOSIFICACIÓN DE 14 MPA.**

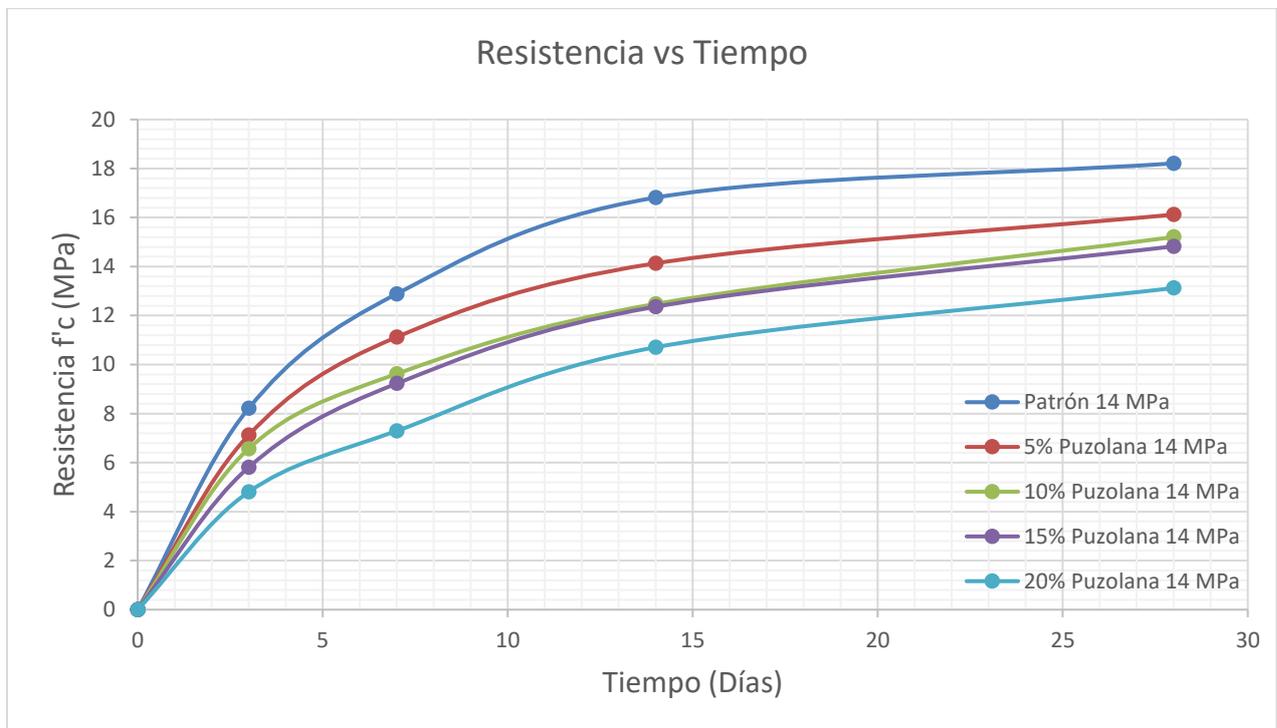
Edad (días)	Patrón		5% Puzolana		10% Puzolana		15% Puzolana		20% Puzolana	
	f'c (MPa)	% de 14 MPa	f'c (MPa)	% de 14 MPa	f'c (MPa)	% de 14 MPa	f'c (MPa)	% de 14 MPa	f'c (MPa)	% de 14 MPa
3	8.21	58.67%	7.12	50.87%	6.57	46.91%	5.81	41.49%	4.80	34.30%
7	12.88	92.03%	11.12	79.44%	9.62	68.72%	9.23	65.90%	7.29	52.10%
14	16.81	120.11%	14.13	100.95%	12.47	89.10%	12.36	88.29%	10.71	76.48%
28	18.21	130.07%	16.12	115.15%	15.20	108.60%	14.82	105.89%	13.12	93.73%

ELABORADO POR: Erik Castro

Debido a la naturaleza del cemento utilizado, se tiene que a los 7 días para el cilindro patrón alcanza el 92% de la resistencia esperada a los 28 días, mientras que en el mismo lapso de tiempo los especímenes con inclusión del 20% de puzolana apenas ha alcanzado el 52% de la resistencia.

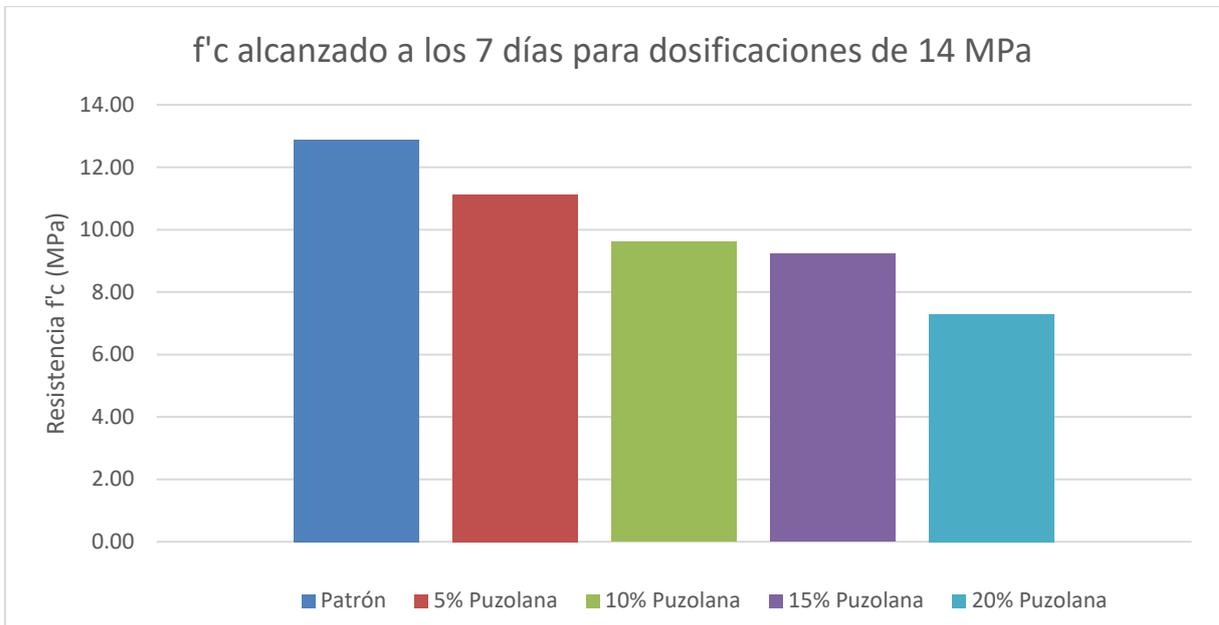
A los 28 días, los especímenes de la dosificación patrón alcanzaron y superaron su resistencia de diseño hasta en un 30%. Las probetas que incluyen puzolana también llegaron a superar la resistencia de diseño a los 28 días, a excepción de los especímenes con el 20% de contenido de puzolana, los cuales llegaron a un 93.7% de la resistencia esperada.

**GRÁFICA 5.3.2 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO DOSIFICACIÓN DE 14 MPa E INCLUSIÓN DE PUZOLANA.**

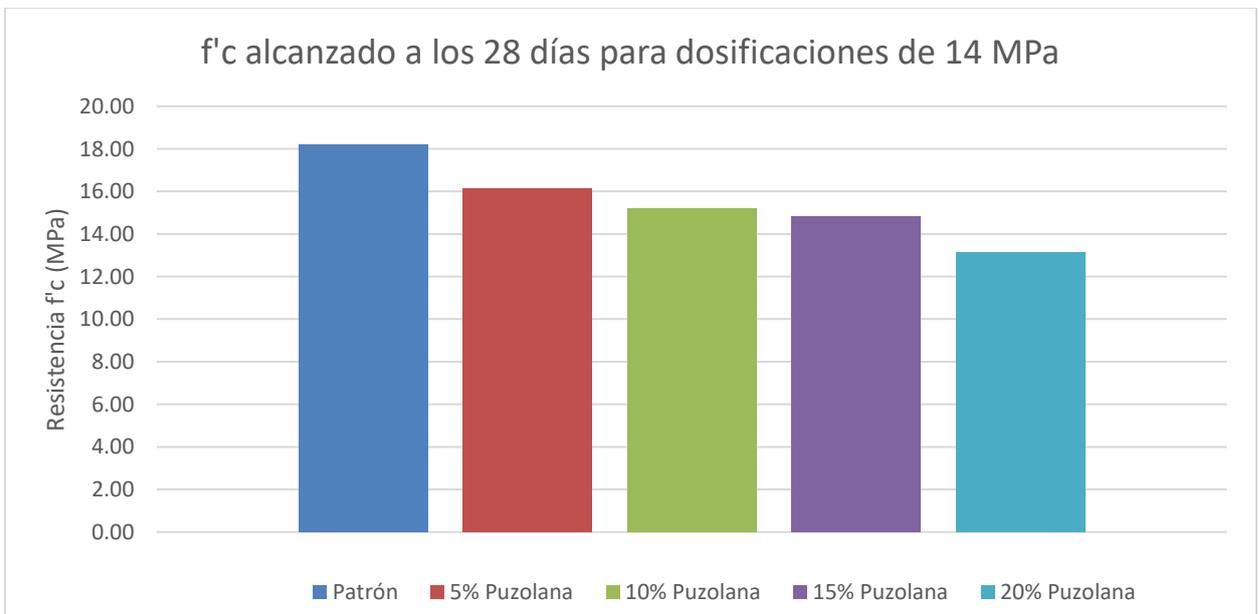


ELABORADO POR: Erik Castro

Como se observa en la gráfica 5.3.2., la resistencia que alcanzan los especímenes que contienen puzolana es menor a la resistencia alcanzada por el cilindro patrón de 14 MPa. Sin embargo, se aprecia que las formas de la curva de crecimiento de los cilindros de dosificaciones de reemplazo son bastante similares a la curva de la dosificación del cilindro patrón. La gráfica 5.3.3 indica que, a los 7 días ninguna de las dosificaciones ha alcanzado la resistencia de 14 MPa para los que fueron diseñados, por otra parte, en la gráfica 5.3.4 se observa que, a los 28 días en todas las dosificaciones, a excepción de la de 20% de puzolana, las probetas alcanzaron y superaron los 14 MPa de diseño.

**GRÁFICA 5.3.3 RESISTENCIA ALCANZADA A LOS 7 DÍAS PARA DOSIFICACIONES DE 14 MPA.**

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 5.3.4 RESISTENCIA ALCANZADA A LOS 28 DÍAS PARA DOSIFICACIONES DE 14 MPA.**

ELABORADO POR: Erik Castro

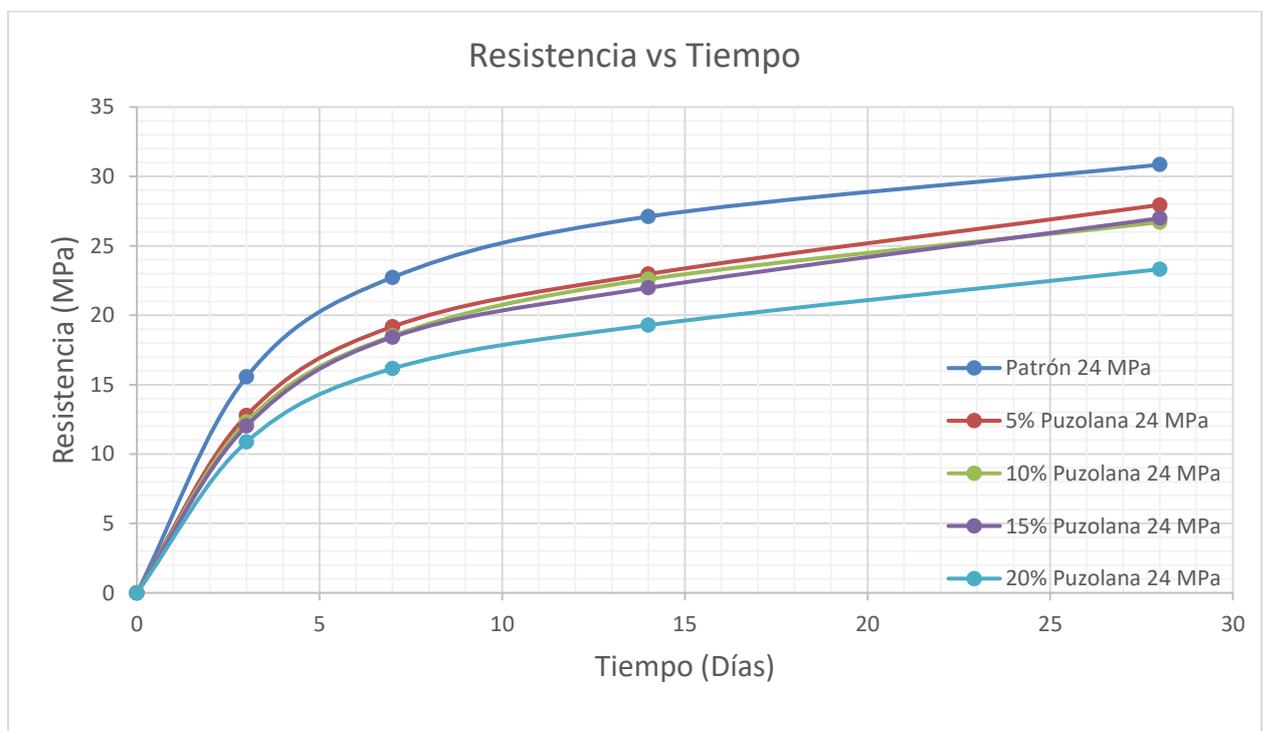
Se presentan los valores de resistencias obtenidas de las pruebas de compresión simple con las probetas de hormigón patrón de 24 MPa, con el porcentaje de resistencia alcanzado por cada una de ellas, en la tabla:

**TABLA 5.3.3 RESUMEN DE RESISTENCIAS PROMEDIO PARA DOSIFICACIÓN DE 24 MPA.**

Edad (días)	Patrón		5% Puzolana		10% Puzolana		15% Puzolana		20% Puzolana	
	f'c (MPa)	% de 24 MPa	f'c (MPa)	% de 24 MPa	f'c (MPa)	% de 24 MPa	f'c (MPa)	% de 24 MPa	f'c (MPa)	% de 24 MPa
3	15.55	64.80%	12.77	53.22%	12.32	51.35%	12.01	50.06%	10.87	45.27%
7	22.73	94.70%	19.18	79.91%	18.51	77.14%	18.42	76.76%	16.16	67.33%
14	27.11	112.96%	22.97	95.71%	22.59	94.13%	21.97	91.55%	19.29	80.38%
28	30.85	128.53%	27.95	116.44%	26.70	111.26%	26.99	112.45%	23.32	97.16%

ELABORADO POR: Erik Castro

**GRÁFICA 5.3.5 CURVA RESISTENCIA VS TIEMPO DOSIFICACIÓN DE 24 MPA E INCLUSIÓN DE PUZOLANA.**

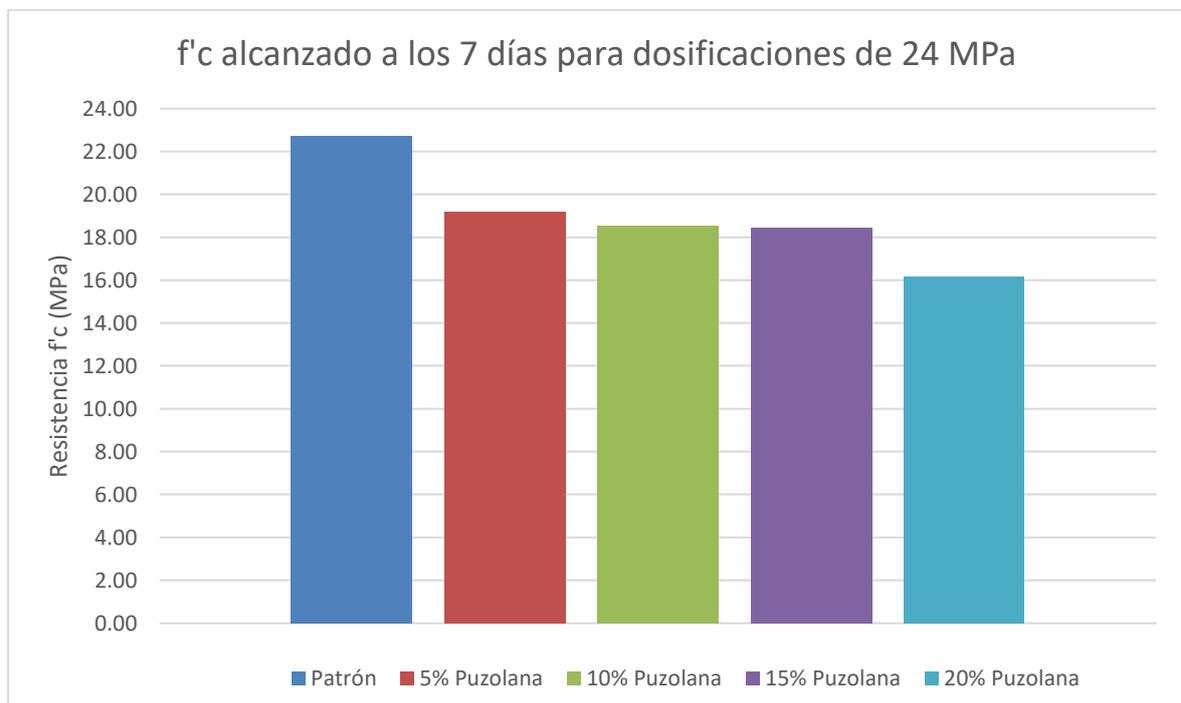


ELABORADO POR: Erik Castro

Al igual que en la dosificación de 14 MPa, se tiene que la media de valores de resistencia de las probetas con inclusión de puzolana presenta valores menores a la de los especímenes de la dosificación patrón de 24 MPa.

Como se puede apreciar en la gráfica 5.3.5., en cada edad a la que fueron ensayados los especímenes con puzolana, las resistencias obtenidas continúan siendo menores a la de la resistencia patrón de 24 MPa. Cabe destacar que las curvas de crecimiento se asemejan entre sí, y se superponen entre ellas para los casos de 5%, 10% y 15% de reemplazo de puzolana con valores de resistencia muy próximos entre sí, lo que indica que para el rango de 5% a 15% de reemplazo de puzolana el valor de  $f'_c$  no se ve afectado significativamente.

**GRÁFICA 5.3.6 RESISTENCIA ALCANZADA A LOS 7 DÍAS PARA DOSIFICACIONES DE 24 MPA.**

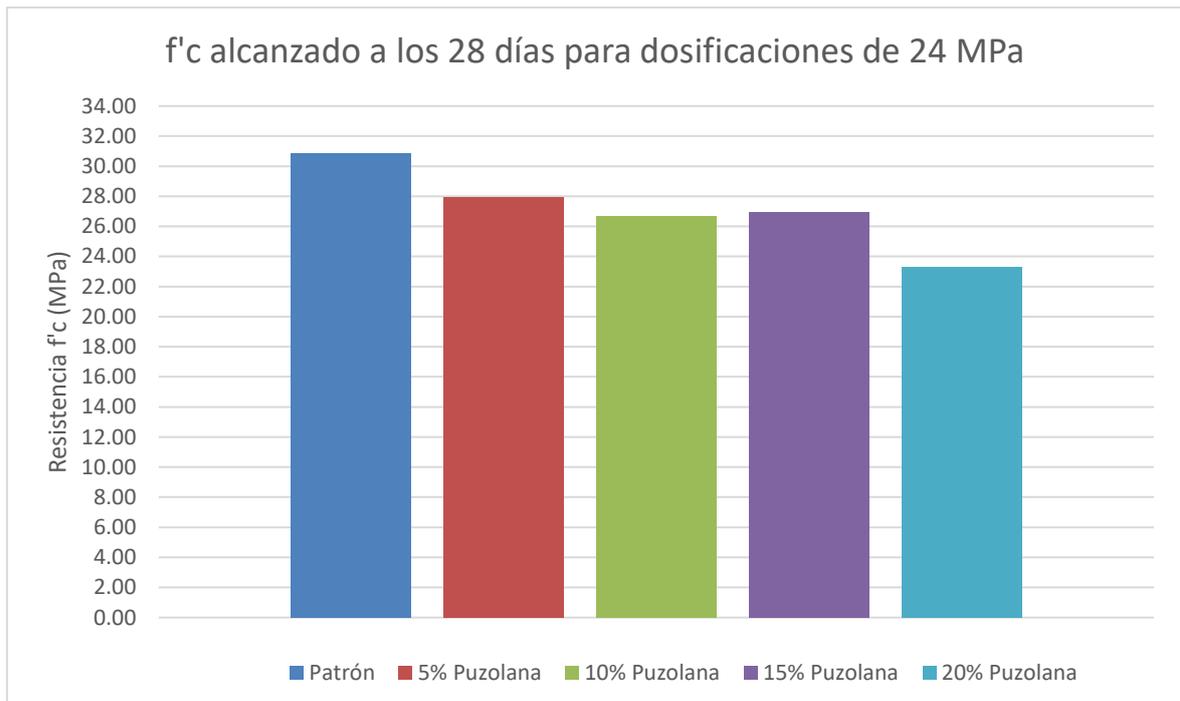


ELABORADO POR: Erik Castro

A los 7 días de edad de los cilindros, como se observa en la gráfica 5.3.6. ninguna de las probetas ha alcanzado la resistencia de diseño, pero la de la dosificación

patrón se aproxima más, con un 94.7% de la resistencia final, sobre los demás especímenes, con el 20% de puzolana llega al 67.3% de la resistencia de diseño.

**GRÁFICA 5.3.7 RESISTENCIA ALCANZADA A LOS 28 DÍAS PARA DOSIFICACIONES DE 24 MPA.**



ELABORADO POR: Erik Castro

En la gráfica 5.3.7 se observa que al igual que con las probetas con dosificación de 14 MPa, los especímenes han alcanzado y superado la resistencia de diseño esperada, exceptuando los especímenes que contienen un 20% de puzolana. Esto indica que, con el uso de la inclusión de puzolanas, el tiempo para alcanzar las resistencias de diseño se extiende a la vez que la resistencia se ve disminuida.

### 5.3.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN

Se indican los resultados encontrados con los ensayos de módulos de elasticidad del hormigón, junto con el módulo determinado por la ecuación planteada en el ACI 318.

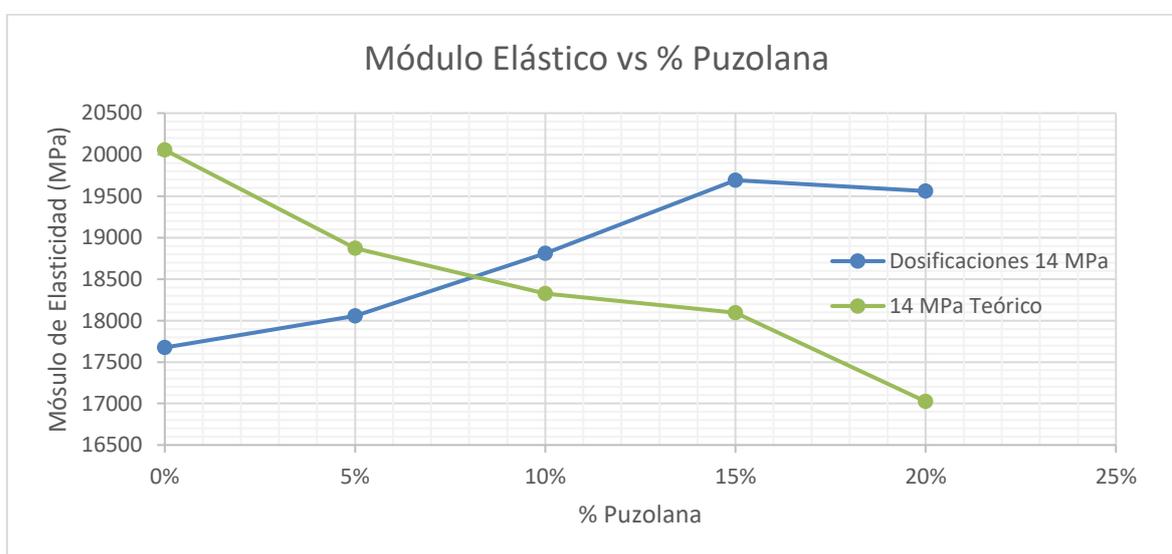
**TABLA 5.3.4 RESUMEN DE MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA DOSIFICACIÓN DE 14 MPA.**

Muestra	f'c (MPa)	Ec Experimental (MPa)	Ec Teórico (4700*√f'c) (MPa)
Patrón	18.21	17675.17	20056.39
5% Puzolana	16.12	18055.93	18870.37
10% Puzolana	15.20	18811.05	18323.97
15% Puzolana	14.82	19691.94	18093.47
20% Puzolana	13.12	19559.63	17024.12

ELABORADO POR: Erik Castro

El módulo de elasticidad para el cilindro patrón de 14 MPa se encuentra distante al valor estimado mediante la fórmula propuesta por el ACI (ACI, 2008), los demás valores se encuentran dispersos pero en el rango de valores del módulo teórico propuesto por el ACI siendo bastante próximos los valores para los casos de 5% y 10% de puzolana reemplazada; también se evidencia una tendencia en los módulos de elasticidad que aumentan conforme se incrementa el contenido de puzolana.

**GRÁFICA 5.3.8 MÓDULOS DE ELASTICIDAD VS % INCLUSIÓN DE PUZOLANA PARA DOSIFICACIÓN DE 14 MPA.**



ELABORADO POR: Erik Castro

La disparidad que presenta la curva de dosificación respecto a la curva teórica del ACI, probablemente se deba a que los ensayos de módulo de elasticidad secante, fueron realizados posteriormente a los ensayos de compresión por lo cual, los cilindros pudieron seguir desarrollando mayor resistencia y, por ende, el crecimiento del valor del módulo de Young obtenido; ya que los valores del módulo Elástico fueron determinados con la resistencia dada en la fecha establecida de cada ensayo. Esto indica que a pesar que las resistencias ensayadas hasta los 28 días, ya se aproximan al valor de diseño, el hormigón continúa desarrollando sus resistencias sin importar que estos contengan puzolana.

Los módulos de elasticidad para las dosificaciones de 24 MPa, presentan una disminución de los valores conforme aumenta el contenido de puzolana en los especímenes, al igual que disminuye el valor de resistencia a la compresión.

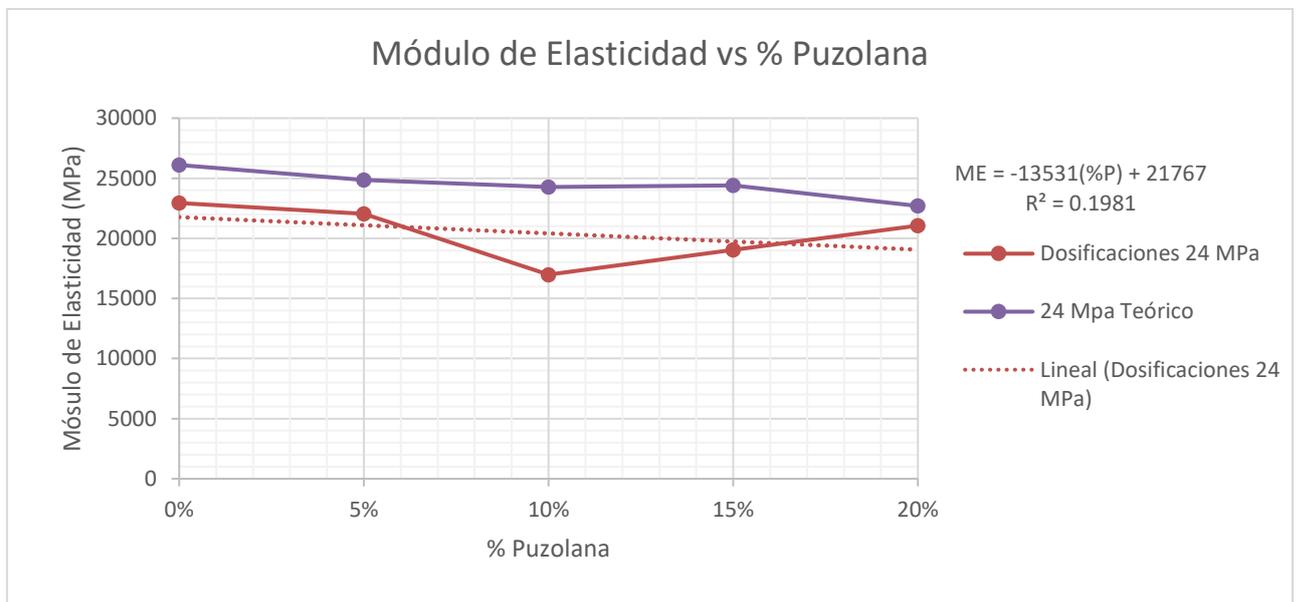
**TABLA 5.3.5 RESUMEN DE MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA DOSIFICACIÓN DE 24 MPA.**

<b>Muestra</b>	<b>f'c (MPa)</b>	<b>Ec Experimental (MPa)</b>	<b>Ec Teórico (<math>4700 \cdot \sqrt{f'c}</math>) (MPa)</b>
Patrón	30.85	22938.90	26105.10
5% Puzolana	27.95	22046.28	24847.85
10% Puzolana	26.70	16982.20	24285.86
15% Puzolana	26.99	19043.89	24417.39
20% Puzolana	23.32	21057.28	22696.67

ELABORADO POR: Erik Castro

En el caso de los cilindros de 24 MPa, los valores del Módulo de Elasticidad muestran un comportamiento más uniforme que el visto con los de 14 MPa; esto se debe a que en el momento que los ensayos de módulo de elasticidad fueron realizados a la par con los ensayos de compresión, esto da como resultado, valores de módulo de Young más precisos y consistentes con la ecuación planteada por el ACI.

**GRÁFICA 5.3.9 MÓDULOS DE ELASTICIDAD VS % INCLUSIÓN DE PUZOLANA PARA DOSIFICACIÓN DE 24 MPA.**



ELABORADO POR: Erik Castro

Estos valores del Módulo de Young, permiten observar una ligera tendencia que se ve expresada por la ecuación: **ME = -13531(%P) + 21767**

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

- El cemento puzolanico Tipo IP ARMADURO satisface con los requerimientos físicos conforme la norma NTE INEN 490 y los supera. Cumpliendo con las características de cemento apto para altas resistencias iniciales, alcanzado más del 90% de la resistencia de diseño a los 7 días en dosificaciones de 14 y 24 MPa, como se indica en las tablas 5.3.2 y 5.3.3. Se confirma que el ARMADURO, trabaja bien como un cemento portland tipo HE.
- Mediante las pruebas de consistencia normal de cemento, se demostró que la proporción de agua indispensable para una total hidratación de las partículas de cemento se ve disminuida conforme la cantidad de puzolana reemplazada en la pasta de cemento es mayor. Tendencia que se puede representar mediante la ecuación lineal:  $CN = -0.13(\%P) + 0.28$ , para valores de reemplazo de puzolana del 0 al 20%.
- El incremento de los tiempos de fraguado en las muestras que contienen puzolana, respecto a la muestra patrón, indica que, al contener un mayor porcentaje de puzolana en la pasta de cemento, la hidratación de las partículas de cemento se ve ralentizada, por tal razón el proceso de endurecimiento y adquisición de resistencia de las probetas cilíndricas lleva mayor tiempo.
- Los módulos de elasticidad secante obtenidos en pruebas de laboratorio difieren el comportamiento entre sí, las probetas con dosificación de 14 MPa presentaron un aumento del módulo de Young a medida que aumenta la puzolana contenida, mientras las probetas de 24 MPa de dosificación

disminuyen el módulo de Young a la vez que aumenta la puzolana contenida. Sin embargo, para ambas dosificaciones se tiene valores típicos de módulo de elasticidad del hormigón (entre 14 GPa y 30 GPa) (Tamburrino, 2011).

- Los valores de resistencia  $f'c$  a los 28 días obtenidas en laboratorio, alcanzan a desarrollar su resistencia de diseño de 14 y 24 MPa, a excepción de los casos con el 20% de puzolana, donde quedan a un 93.73% y 97.16% de sus respectivas resistencias de diseño, como lo indica la tabla 6.1.1.

**TABLA 6.1.1 PORCENTAJE DE RESISTENCIAS ALCANZADAS A LOS 28 DÍAS PARA DOSIFICACIONES DE 14 Y 24 MPA.**

Muestra	$f'c$ máx. MPa	% $f'c$ de diseño 14 MPa	$f'c$ máx. MPa	% $f'c$ de diseño 24 MPa
Patrón	18.21	130.07%	30.85	128.53%
5% Puzolana	16.12	115.15%	27.95	116.44%
10% Puzolana	15.20	108.60%	26.70	111.26%
15% Puzolana	14.82	105.89%	26.99	112.45%
20% Puzolana	13.12	93.73%	23.32	97.16%

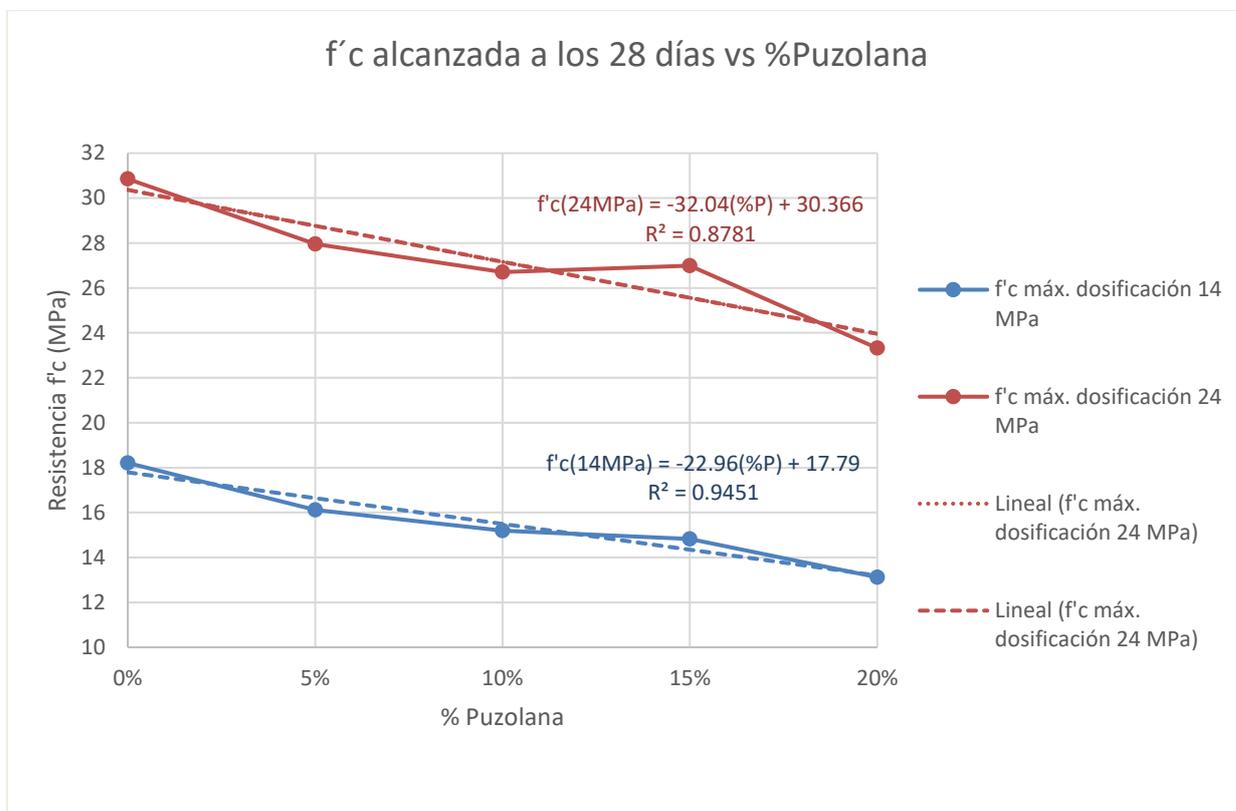
ELABORADO POR: Erik Castro

- Los valores de resistencia a los 28 días, como se indican en la gráfica 6.1.1., permiten identificar una tendencia lineal bastante precisa de acuerdo a los datos de laboratorio obtenidos; pudiéndose expresarse en las ecuaciones para estimar el valor de  $f'c$  esperado de acuerdo al porcentaje de puzolana reemplazado:

Para resistencias de diseño de 24 MPa:  $f'c(24MPa) = -32.04(\%P) + 30.37$

Para resistencias de diseño de 14 MPa:  $f'c(14MPa) = -22.96(\%P) + 17.79$

**GRÁFICA 6.1.1 VALORES DE F'C MÁXIMA ALCANZADA A LOS 28 DÍAS PARA DOSIFICACIONES DE 14 Y 24 MPA**



ELABORADO POR: Erik Castro

- El uso de cemento con características de alta resistencia inicial no altera la tendencia de las curvas de crecimiento del hormigón para las diferentes dosificaciones con reemplazos de puzolana, obteniéndose que todos los especímenes fabricados alcanzan más del 80% de su resistencia máxima a la edad de 14 días.
- Los valores de las densidades del hormigón obtenidas para las dosificaciones de 14 y 24 MPa se encuentran en el rango típico de hormigones normales de 2.0 a 2.8 T/m<sup>3</sup> (de Cea, 2008). El uso de puzolanas en las dosificaciones, no marco relevancia significativa en los valores de las densidades obtenidas.

- El uso, en conjunto, de cemento de propiedades de alta resistencia inicial con reemplazo de puzolanas para el diseño de hormigón, no resulta factible en cuanto a la característica principal de la alta resistencia a temprana edad del concreto, ya que si bien, los especímenes demostraron que si llegan a alcanzar la resistencia de diseño, este proceso dura mayor tiempo. Por tanto, el uso de reemplazo de puzolana en cemento, hace que este pierda la condición de tipo HE.
- El uso de cemento reemplazado por puzolana, resulta conveniente y factible, en cuanto el factor tiempo para poner en uso el hormigón no sea determinante. Ya que los ensayos demostraron que al cabo de 28 días las probetas con hasta el 20% de puzolana, llegaron a alcanzar casi en su totalidad el 100% de su resistencia de diseño. Por lo cual, si el tiempo para poner en uso el hormigón no resulta importante, usar puzolanas como reemplazo hasta al 20%, generarían beneficios económicos disminuyendo la cantidad de cemento empleado.
- La razón del decremento de la resistencia de los especímenes que contienen puzolana, en parte se debe a que, al reemplazar puzolana por cemento, la cantidad de éste disminuye e indirectamente la relación agua-cemento aumenta, reduciendo el valor de las resistencias a la compresión de los hormigones diseñados. Al ser la puzolana un cementante natural, resulta su aporte menos significativo en la ganancia de resistencia mecánica del concreto.
- La utilización de puzolanas incorporadas en dosificaciones de hormigón se puede llevar a cabo cuando el tiempo de fraguado o la resistencia mecánica que alcance no son factores decisivos en el diseño del mismo, como es el caso en el uso de morteros u hormigones no estructurales.

- Mediante el proyecto de investigación, se puede establecer que el uso de puzolanas en el diseño de hormigón como reemplazo de cemento es factible, considerando que en los valores de reemplazo del 5 hasta el 15% los valores de resistencia última no difieren mucho de sí. Teniendo como valor óptimo de reemplazo el 10% de porcentaje en peso de cemento por puzolana.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

- Comprobar la corrección por humedad y absorción de los áridos del hormigón, así se garantiza que la proporción de agua estimada en la dosificación sea la correcta y no altere la consistencia esperada en la mezcla.
- Los resultados obtenidos se basan en condiciones específicas de material como el cemento ARMADURO y bajo condiciones de laboratorio controladas, por lo que es importante que se continúen con investigaciones modificando parámetros, como es el uso de distintos tipos de cementos en combinación de puzolana.
- El uso de puzolanas en el diseño de hormigón de forma generalizada, debe ser verificado mediante investigaciones que demuestren la viabilidad y registre su uso, de acuerdo a las normas de construcción nacionales que permitan este tipo de adiciones o reemplazo del material cementante.
- Para llevar a cabo el ensayo de módulos elásticos del hormigón, es importante dar un seguimiento a la curva de crecimiento del concreto, para poder determinar que el valor de resistencia a la compresión ya es constante y poder realizar el ensayo con el valor máximo de  $f'c$ , obteniéndose así los valores de módulo de Young con mayor exactitud.

- Es importante un correcto enrasado al momento de la fabricación de los cilindros de hormigón o a su vez el refrentado que corrija todas las imperfecciones en las caras de las superficies de los especímenes, en especial para el uso de los mismos en el ensayo de módulos de elasticidad, ya que las pequeñas irregularidades pueden representar errores en los datos obtenidos del ensayo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### REFERENCIAS

- ACI. (2008). *Requisitos de reglamento para hormigón estructural (ACI 318S-08) y comentarios*. American Concrete Institute.
- ACI 211. (1991). *ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. American Concrete Institute.
- ASTM. (2003). *ASTM C 188. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2004). *ASMT C 40. Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2004). *ASTM C 187. Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2005). *ASMT C 39. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2006). *ASTM C 131. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2006). *ASTM C 136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2007). *ASTM C 127. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2007). *ASTM C 128. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.

- ASTM. (2007). *ASTM C 191. Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2008). *ASTM C 33. Standard Specification for Concrete Aggregates*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2009). *ASTM C 29. Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2009). *ASTM C 31. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimen in the field*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2009). *ASTM C 470. Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2009). *ASTM C 535. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2009). *ASTM C 595. Specifications for Blended Hydraulic Cements*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2010). *ASTM C 1157. Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*. USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2010). *ASTM C 469. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2011). *ASTM C 305. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2011). *ASTM C 311. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.

- ASTM. (2012). *ASTM C 618. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2013). *ASTM C 511. Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- Calleja, J. (1997). *Cementos puzolánicos*. *Materiales de construcción*, 615-659. Obtenido de <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc>
- Cornejo, P. (2016). *Depósitos minerales no metálicos del Ecuador*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- de Cea, A. (2008). *Antecedentes Hormigón Alta Densidad*. En A. de Cea, *Hormigón de muy Alta Densidad* (págs. 55-72). Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- E. AP. INGENIERÍA CIVIL. (2013). *Granulometría de Agregados (Grueso y Fino)*. Nuevo Chimbote: Universidad Nacional del Santa.
- Escuela de Ingeniería Técnica Civil-UPCT. (2007). *Tipos de hormigón y sus propiedades*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. Obtenido de [http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6203/mod\\_resource/content/1/Hormigon\\_02.\\_Tipos\\_y\\_propiedades.pdf](http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6203/mod_resource/content/1/Hormigon_02._Tipos_y_propiedades.pdf)
- Gaspar, D. (2000). *Tiempo de fraguado: algunos comentarios sobre el método de ensayo*. *Materiales de Construcción*, 39-57.
- Giraldo, O. (2003). *Manual de agregados para el hormigón*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Herrera, Y. (2008). *Antecedentes Hormigón Alta Densidad*. En Y. Herrera, *Hormigón de muy alta densidad* (págs. 55-72). Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2099.1/8326>
- Huanca, S. (2006). *Diseño de Mezclas de Concreto*. Perú: Universidad Nacional del Altiplano.

- IMCYC. (2008). *Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto-Método de prueba*. Mexico D.F. Obtenido de <http://www.imcyc.com/ct2008/nov08/PROBLEMAS.pdf>
- INEN. (2009). *NTE INEN 155. Cemento Hidráulico. Mezclado Mecánico de Pastas y Morteros de Consistencia Plástica*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2009). *NTE INEN 156. Cemento Hidráulico. Determinación de la Densidad*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2009). *NTE INEN 157. Cemento Hidráulico. Determinación de la Consistencia Normal. Método de Vicat*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2009). *NTE INEN 158. Cemento Hidráulico. Determinación del Tiempo de Fraguado. Método de Vicat*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2010). *NTE INEN 1573. Hormigón de Cemento Hidráulico. Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Hormigón de Cemento Hidráulico*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2010). *NTE INEN 2528. Cámaras de Curado, Gabinetes Húmedos, Tanques para Almacenamiento en Agua y Cuartos para Elaborar Mezclas, Utilizados en Ensayos de Cemento Hidráulico y Hormigón. Requisitos*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2010). *NTE INEN 855. Áridos. Determinación de las Impurezas Orgánicas en el Árido Fino para Hormigón*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2010). *NTE INEN 856. Áridos. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Árido Fino*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2010). *NTE INEN 857. Áridos. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Árido Grueso*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

- INEN. (2010). NTE INEN 858. Áridos. Determinación de la Masa Unitaria (Peso Volumétrico) y el Porcentaje de Vacíos. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2011). NTE INEN 1576. Hormigón de Cemento Hidráulico. Elaboración y Curado en Obra de Especímenes para Ensayo. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2011). NTE INEN 2380. Cemento Hidráulico. Requisitos de Desempeño para Cementos Hidráulicos. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2011). NTE INEN 490. Cementos Hidráulicos Compuestos. Requisitos. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2011). NTE INEN 696. Áridos. Análisis Granulométrico en los Áridos, Fino y Grueso. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2011). NTE INEN 860. Áridos. Determinación del Valor de la Degradación del Árido Grueso de Partículas Menores a 37.5 mm Mediante el Uso de la Máquina de los Ángeles. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2011). NTE INEN 861. Áridos. Determinación del Valor de la Degradación del Árido Grueso de Partículas Mayores a 19 mm Mediante el Uso de la Máquina de los Ángeles. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2011). NTE INEN 862. Áridos para Hormigón. Determinación del Contenido Total de Humedad. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN. (2014). NTE INEN 1108. Agua Potable. Requisitos. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional IG-EPN. (2017). Volcán Tungurahua. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de <http://www.igepn.edu.ec/tungurahua>
- Jaigua, B., & Vázquez, S. (2010). Estudio de Hormigones de Altas Prestaciones Utilizando Áridos y Cemento Local, Cenizas Volcánicas Naturales. Cuenca: Universidad de Cuenca.

- Liu, M. (2010). *Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash*. *Construct Building Materials*, 1245-1252.
- Luna, G. (2014). *Estudio del Hormigón*. Quito: Editorial Edicumbre.
- Méndez, E. (2012). *Propuesta para sustitución de agregados petreos por agregados pet, en diseño de mezcla de concreto con resistencia  $f'c=150\text{kg/cm}^2$ , usado para banquetas, guarniciones y firmes*. Veracruz: Universidad Veracruzana.
- Montoya, Meseguer, & Morán. (2000). *Cementos*. Barcelona: Gustavo Gili. Obtenido de [https://previa.uclm.es/area/ing\\_rural/trans\\_const/cementos.pdf](https://previa.uclm.es/area/ing_rural/trans_const/cementos.pdf)
- National Ready Mixed Concrete. (2010). *CIP30 - Adiciones al cemento*. NRMCA.
- Ossa, M., & Jorquera, H. (1984). *Cementos con cenizas volantes*. *Materiales de Construcción*, 3-17. Obtenido de <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc>
- Rivera, G. (2003). *Agua de Mezcla*. *Concreto Simple*, 77-82.
- Romero, A., & Hernández, J. (2014). *DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN POR EL MÉTODO A.C.I. Y EFECTOS DE LA ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES DE TERMOTASAJERO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Salazar, A. (2008). *¿QUÉ ES UNA PUZOLANA?* Cali: CÁMARA Colombiana de la Construcción CAMACOL. Obtenido de [https://www.academia.edu/24569108/Puzolonas.\\_Texto\\_elaborado\\_por\\_Alejandro\\_Salazar\\_J](https://www.academia.edu/24569108/Puzolonas._Texto_elaborado_por_Alejandro_Salazar_J)
- Soria Santamaria, F. (1983). *Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción*. *Materiales de Construcción*, 190-191. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.3989/mc.1983.v33.i190-191.974>
- Tamburrino. (2011). *Módulo de Young y Coeficiente de Poisson para distintos materiales*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- UNACEM. (2011). *Ficha técnica ARMADURO*. Quito: UNACEM.