



# UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

---

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DE LA ESCORIA DE COBRE COMO SUSTITUTO DEL AGREGADO FINO EN PORCENTAJE DE PESO, EN LA RESISTENCIA Y CONSISTENCIA DE UN CONCRETO  $f'c=210$  Kg/cm<sup>2</sup> ELABORADO CON CEMENTOS TIPO IP Y TIPO V, MEDIANTE PRUEBAS DE ESCLEROMETRÍA Y COMPRESIÓN AXIAL DE TESTIGOS SOMETIDOS A CURADO POR INMERSIÓN

---

Presentada por los bachilleres:

Bravo Santos, Miguel Ángel

Díaz Valencia, Juan Carlos

Para optar al Título Profesional de  
Ingeniero Civil

Asesor:

Mgt. Ing. Víctor Chacón Sánchez

CUSCO - PERÚ

2018



*«Serás lo que debas ser, o no serás nada.»*

José de San Martín





A mamá y papá, pródigos en amor.

J.C.D.V.

Dedicado a mi familia en general, porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos, alegría y tristeza, satisfacción y miseria. Y a mis compañeros que gracias a su apoyo, y conocimientos, hicieron de esta experiencia bella una de las más especiales de mi vida, porque sin el equipo que formamos no hubiera logrado esta meta.

M.A.B.S.



## Agradecimientos

Esta tesis es fruto del trabajo de investigación realizado durante muchos meses, y es obligación de los investigadores reconocer el apoyo que recibieron en las diferentes fases del estudio.

Primero, se agradece la ayuda incondicional del Ing. Víctor Chacón Sánchez, quien ha brindado asesoría y consejo en la elaboración de la tesis, desde la concepción de la idea que se desarrolló hasta su culminación. Es una deuda que difícilmente se podrá compensar.

Los tesisistas quedan muy agradecidos con los ingenieros Gustavo Ccori Salazar, Alfredo Curo Gómez y Albert Tapia Conza, por su inmenso apoyo en laboratorio.

Gracias al Ing. William Delgado Salazar, quien siempre estuvo pendiente del avance de la investigación, aportó ideas valiosas y comentarios que enriquecieron el estudio realizado.

Enorme agradecimiento al Ing. Edson Salas Fortón, cuyas reflexiones y explicaciones durante la etapa experimental ayudaron a aclarar el panorama de la tesis.

Gracias al Ing. Álvaro Flores Boza, quien mostró mucho interés por la investigación y siempre tuvo frases alentadoras para los tesisistas.

Los investigadores agradecen a la Ing. María Callahui Ríos su valioso aporte a la consolidación técnica del estudio desarrollado.

Gracias infinitas a la señorita bióloga Nadia Choque Quispe, por su apoyo incondicional y permanente que ayudó a alcanzar los objetivos de esta tesis.

Gracias a la familia Mora Begazo, por su desinteresado apoyo a la investigación.

Gracias a los ingenieros Yordan Delgado Quispe y David Apaza León, amigos que brindaron su ayuda en la fase experimental de la investigación.

Los tesisistas también quedan agradecidos con el señor Juan Carlos Díaz Flores, que apoyó desinteresadamente he hizo que el trabajo sea menos esforzado en la etapa experimental.

El investigador Díaz queda agradecido con Chato y Fidelio, por el calor y compañía que le brindaron durante las largas horas de análisis y procesamiento de datos. Su recuerdo está siempre con él.



## Resumen

Se investigó la influencia de la sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones porcentuales de peso, mediante ensayos de índice de rebote y compresión axial sobre probetas cilíndricas de concreto curadas por inmersión. Para fabricar las probetas se empleó piedra chancada de 3/4" de la cantera de Huacarpay, arena de la cantera de Cunyac y cementos tipo IP y tipo V, y se estudió la influencia de la EFC sobre la consistencia de la mezcla fresca y resistencia a la compresión del concreto endurecido. Tras el procesamiento y análisis de resultados se pudo apreciar que, a medida que se incrementan los porcentajes de arena sustituida por escoria de cobre, el asentamiento de la mezcla sigue un patrón de crecimiento lineal en proporción directa con el porcentaje de escoria. Asimismo, se encontró que con un porcentaje de sustitución de 35% de agregado fino por escoria de cobre la resistencia a la compresión se incrementa 65,974 kg/cm<sup>2</sup> en probetas fabricadas con cemento tipo IP; y 88,789 kg/cm<sup>2</sup> en probetas fabricadas con cemento tipo V.

Finalmente, se determinó el valor real de la dispersión del esclerómetro que fue empleado en los ensayos, que es  $\pm 10\%$  cuando se prueban especímenes fabricados con cemento tipo IP, y  $\pm 9\%$  para probetas con cemento tipo V. También se encontraron ecuaciones, con su respectiva dispersión, que permiten calcular el valor de la resistencia del concreto para cualquier proporción de escoria de cobre dentro del rango experimental (0% a 50%).

**Palabras clave:** concreto, cemento, escoria de fundición de cobre, resistencia a la compresión, consistencia, asentamiento, curado, esclerometría, probeta.



## Abstract

The influence of substitution of fine aggregate by copper slag in percentage proportions of weight was investigated through sclerometer test and axial compression tests on cylindrical concrete specimens cured by immersion. To manufacture the test pieces, Huacarpay quarry 3/4" crushed stone, Cunyac quarry sand and IP and V types of cement were used, and the influence of the EFC on the consistency of fresh concrete and compressive strength of hardened concrete was studied. After processing and analyzing the results, it could be seen that the fresh concrete slump follows a linear growth pattern in direct proportion to the percentage of slag when the percentage of replacement of fine aggregate by slag increases. Also, it was found that with a substitution percentage of 35% of fine aggregate per copper slag, the compressive strength increases 65,974 kg/cm<sup>2</sup> in specimens made with IP type cement; and 88,789 kg/cm<sup>2</sup> in test pieces manufactured with cement type V.

Finally, the real value of the dispersion of the sclerometer that was used in the tests was determined, which is  $\pm 10\%$  when testing specimens manufactured with IP type cement, and  $\pm 9\%$  for specimens with type V cement. Equations were also found, with their respective dispersion, that allows calculating the value of the concrete resistance for any proportion of copper slag within the experimental range (0% to 50%).

**Keywords:** concrete, cement, copper slag, compressive strength, consistency, slump, curing, sclerometry, standard test cylinders.



## Introducción

Actualmente, predomina el interés de los profesionales de la construcción en obtener concretos con una resistencia a la compresión óptima —entiéndase por óptima condiciones técnicas y económicas que mejoran el desempeño del concreto y reducen su costo de producción—. Sin embargo, lograr una resistencia adecuada requiere el uso de materiales de buena calidad para la elaboración de las mezclas, y por lo general el afán en la calidad muchas veces genera mayores gastos en el intento por conseguir mejores resultados, lo cual se pone en evidencia al analizar los costos de obtención, producción e incluso transporte.

Tradicionalmente se prepara el concreto en base a una mezcla de cemento, agua, una parte de agregado grueso y una parte de agregado fino; algunas veces se recurre al empleo de aditivos, para lograr que el concreto adquiera algunas propiedades adicionales durante y después de su preparación.

Por otra parte, en Perú hay una elevada producción de cobre —Perú es el segundo productor mundial de cobre—, lo cual implica que también hay gran cantidad de desechos, entre ellos la escoria, que no son aprovechados. La escoria es un material de desecho que resulta de los procesos pirometalúrgicos realizados durante la obtención del cobre. Se estima que por cada tonelada de cobre se generan dos toneladas de escoria.

Este trabajo de investigación pretende demostrar que la sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso como componente del concreto incidirá de manera favorable sobre la resistencia a la compresión.

Para verificar las hipótesis se realizaron ensayos de compresión axial e índice de rebote, para estudiar la influencia de la presencia de la escoria de cobre sobre la resistencia a la compresión en el concreto. Asimismo, se evaluó el efecto de la escoria de cobre sobre la consistencia de la mezcla fresca por medio de la prueba de asentamiento empleando el cono de Abrams.

Finalmente, el estudio realizado constituye una propuesta de conservación del medio ambiente en beneficio de las personas y de los ecosistemas; es una propuesta de desarrollo sostenible dado que se propone la disposición útil de un material que usualmente es desechado de las factorías mineras y que, de no ser adecuadamente dispuesto, puede alterar de forma negativa las condiciones ambientales en perjuicio de las poblaciones. El contexto en que vivimos solicita la protección y preservación de las especies de flora y fauna.





## Índice general

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VI</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XXVIII</b>
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Identificación del problema.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.1. Descripción del problema .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.2. Formulación interrogativa del problema .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Justificación e importancia de la investigación .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.1. Justificación técnica .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.2. Justificación social.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.3. Justificación por viabilidad .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.4. Justificación por relevancia .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Limitaciones de la investigación .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3.1. Limitación espacial.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3.2. Limitación por condiciones técnicas y tipo de material .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3.3. Limitación por tiempo.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4. Objetivo de la investigación.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4.1. Objetivo general .....</b>	<b>5</b>
<b>1.4.2. Objetivos específicos.....</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Antecedentes de la tesis .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.2. Antecedentes a nivel internacional.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2. Aspectos teóricos pertinentes.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.1. Definición de concreto .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.2. Componentes del concreto .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.3. Cemento.....</b>	<b>11</b>



2.2.4. Agregados.....	17
2.2.5. Agua.....	25
2.2.6. Escoria de cobre.....	27
2.2.7. Curado del concreto.....	30
2.2.8. Ensayo de compresión axial del concreto.....	32
2.2.9. Ensayo de índice de rebote con esclerómetro del concreto.....	35
2.2.10. Consistencia del concreto.....	36
2.2.11. Carbonatación del concreto.....	38
2.2.12. pH del concreto.....	39
2.2.13. Diseño de mezclas.....	39
2.3. Hipótesis.....	41
2.3.1. Hipótesis general.....	41
2.3.2. Sub hipótesis.....	41
2.4. Definición de variables.....	42
2.4.1. Variables independientes.....	42
2.4.2. Variables dependientes.....	42
2.4.3. Cuadro de operacionalización de variables.....	44
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....</b>	<b>45</b>
3.1. Metodología de la investigación.....	45
3.1.1. Tipo de investigación.....	45
3.1.2. Nivel de la investigación.....	45
3.1.3. Método de la investigación.....	45
3.2. Diseño de la investigación.....	45
3.2.1. Diseño metodológico.....	45
3.2.2. Diseño de ingeniería.....	46
3.3. Población y muestra.....	47
3.3.1. Población.....	47
3.3.2. Muestra.....	47
3.3.3. Criterios de inclusión.....	49
3.4. Instrumentos.....	51
3.4.1. Instrumentos metodológicos o de recolección de datos.....	51
3.4.2. Instrumentos de ingeniería.....	61
3.5. Procedimientos de recolección de datos.....	72
3.5.1. Muestreo de los agregados.....	72
3.5.2. Granulometría de los agregados y de la escoria de cobre.....	74
3.5.3. Ensayo de peso específico y absorción de los agregados y de la escoria de cobre.....	79
3.5.4. Ensayo de peso unitario y contenido de vacíos de los agregados.....	85
3.5.5. Ensayo de resistencia a la abrasión o desgaste del agregado grueso.....	89
3.5.6. Ensayo de contenido de humedad de los agregados.....	92
3.5.7. Diseño de mezclas.....	94
3.5.8. Ensayo de asentamiento del concreto.....	95
3.5.9. Elaboración y curado de muestras cilíndricas de concreto.....	98
3.5.10. Ensayo de resistencia del concreto.....	102
3.5.11. Ensayos químicos sobre el concreto y la escoria de cobre.....	168
3.6. Procedimientos de análisis de datos.....	171



3.6.1. Determinación de la muestra representativa ..... 171

3.6.2. Análisis granulométrico de los agregados y de la escoria de cobre..... 172

3.6.3. Determinación del peso específico y absorción de los agregados y de la escoria de cobre 176

3.6.4. Determinación del peso unitario y contenido de vacíos de los agregados ..... 182

3.6.5. Resistencia a la abrasión o desgaste del agregado grueso..... 189

3.6.6. Determinación del contenido de humedad de los agregados ..... 190

3.6.7. Análisis del diseño de mezcla para un concreto con  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  ..... 191

3.6.8. Consistencia del concreto..... 204

3.6.9. Cuantificación de probetas cilíndricas de concreto..... 207

3.6.10. Determinación de la resistencia a la compresión del concreto ..... 207

3.6.11. Modelos de aproximación y patrones de tendencia..... 264

3.6.12. Análisis de la confiabilidad de la curva de tendencia..... 266

3.6.13. Análisis de la sobrevaloración y subvaloración de la resistencia del concreto ..... 279

3.6.14. Análisis de porcentajes residuales máximos ..... 281

3.6.15. Análisis predictivo para estimar la resistencia del concreto..... 281

3.6.16. Análisis químico del concreto y de la escoria de cobre ..... 292

3.6.17. Análisis de costos de producción ..... 297

**CAPÍTULO IV: RESULTADOS ..... 300**

4.1. Consistencia del concreto fresco..... 300

4.2. Resistencia del concreto fabricado con cementos tipo IP y tipo V..... 305

4.2.1. Resistencia a la compresión del concreto determinada mediante índice de rebote o esclerometría..... 305

4.2.2. Resistencia a la compresión del concreto determinada mediante compresión axial ..... 307

4.2.3. Incremento de la resistencia a la compresión del concreto con escoria de cobre ..... 309

4.3. Dispersión real del esclerómetro ..... 311

4.4. Ecuaciones para la estimación de la resistencia a la compresión del concreto ..... 312

4.4.1. Ecuaciones de tendencia para estimar la resistencia del concreto mediante el índice de rebote..... 312

4.4.2. Ecuaciones de tendencia para estimar la resistencia del concreto mediante compresión axial..... 313

**CAPÍTULO V: DISCUSIÓN ..... 314**

5.1. Contraste de resultados con referentes del marco teórico..... 314

5.2. Interpretación de los resultados encontrados en la investigación..... 315

5.3. Comentario de la demostración de la hipótesis ..... 318

5.4. Aporte de la investigación ..... 318

5.5. Incorporación de temas nuevos que se han presentado durante el proceso de la investigación que no estaba considerado dentro de los objetivos de la investigación ..... 320

**GLOSARIO ..... 322**

**ABREVIATURAS ..... 324**



<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>325</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>328</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>330</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>332</b>
<b>1. Matriz de consistencia .....</b>	<b>334</b>
<b>2. Análisis de costos de producción de concreto estándar con <math>f'c=210</math> kg/cm<sup>2</sup>.....</b>	<b>338</b>
<b>APÉNDICES.....</b>	<b>339</b>
<b>1. Curvas de conversión del esclerómetro Proceq modelo N/NR .....</b>	<b>340</b>



## Índice de tablas

<b>Tabla 1: Proporciones típicas en volumen absoluto de los componentes del concreto. ....</b>	<b>11</b>
<b>Tabla 2: Requisitos granulométricos del agregado fino. ....</b>	<b>18</b>
<b>Tabla 3: Composición química de las escorias de cobre por peso de elementos.....</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 4: Composición química de las escorias de cobre por porcentajes. ....</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 5: Cantidad de probetas cilíndricas de concreto que conforman la muestra empleada en la investigación.....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 6: Análisis granulométrico del agregado fino. ....</b>	<b>75</b>
<b>Tabla 7: Análisis granulométrico del agregado grueso.....</b>	<b>77</b>
<b>Tabla 8: Análisis granulométrico de la escoria de cobre. ....</b>	<b>78</b>
<b>Tabla 9: Peso específico y absorción del agregado fino. ....</b>	<b>81</b>
<b>Tabla 10: Peso específico y absorción del agregado grueso.....</b>	<b>83</b>
<b>Tabla 11: Peso específico y absorción de la escoria de cobre. ....</b>	<b>84</b>
<b>Tabla 12: Peso unitario y contenido de vacíos del agregado fino.....</b>	<b>87</b>
<b>Tabla 13: Peso unitario y contenido de vacíos del agregado grueso. ....</b>	<b>88</b>
<b>Tabla 14: Gradación de las muestras para el ensayo de abrasión. ....</b>	<b>90</b>
<b>Tabla 15: Ensayo de abrasión del agregado grueso. ....</b>	<b>91</b>
<b>Tabla 16: Contenido de humedad del agregado fino. ....</b>	<b>93</b>
<b>Tabla 17: Contenido de humedad del agregado grueso. ....</b>	<b>94</b>
<b>Tabla 18: Asentamiento para 7, 14 y 28 días de curado y diferentes porcentajes de EFC.....</b>	<b>97</b>
<b>Tabla 19: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 0% EFC.....</b>	<b>104</b>
<b>Tabla 20: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 5% EFC.....</b>	<b>104</b>
<b>Tabla 21: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 10% EFC.....</b>	<b>105</b>
<b>Tabla 22: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 15% EFC.....</b>	<b>105</b>
<b>Tabla 23: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 20% EFC.....</b>	<b>105</b>
<b>Tabla 24: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 25% EFC.....</b>	<b>106</b>
<b>Tabla 25: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 30% EFC.....</b>	<b>106</b>
<b>Tabla 26: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 35% EFC.....</b>	<b>106</b>
<b>Tabla 27: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 40% EFC.....</b>	<b>107</b>
<b>Tabla 28: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 50% EFC.....</b>	<b>107</b>
<b>Tabla 29: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 0% EFC.....</b>	<b>107</b>
<b>Tabla 30: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 5% EFC.....</b>	<b>108</b>
<b>Tabla 31: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 10% EFC.....</b>	<b>108</b>



**Tabla 32: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 15% EFC..... 108**

**Tabla 33: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 20% EFC..... 109**

**Tabla 34: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 25% EFC..... 109**

**Tabla 35: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 30% EFC..... 109**

**Tabla 36: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 35% EFC..... 110**

**Tabla 37: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 40% EFC..... 110**

**Tabla 38: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 50% EFC..... 110**

**Tabla 39: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 0% EFC..... 111**

**Tabla 40: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 5% EFC..... 111**

**Tabla 41: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 10% EFC..... 111**

**Tabla 42: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 15% EFC..... 112**

**Tabla 43: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 20% EFC..... 112**

**Tabla 44: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 25% EFC..... 112**

**Tabla 45: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 30% EFC..... 113**

**Tabla 46: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 35% EFC..... 113**

**Tabla 47: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 40% EFC..... 113**

**Tabla 48: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 50% EFC..... 114**

**Tabla 49: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 0% EFC..... 114**

**Tabla 50: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 5% EFC..... 114**

**Tabla 51: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 10% EFC..... 115**

**Tabla 52: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 15% EFC..... 115**

**Tabla 53: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 20% EFC..... 115**

**Tabla 54: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 25% EFC..... 116**

**Tabla 55: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 30% EFC..... 116**



**Tabla 56: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 35% EFC..... 116**

**Tabla 57: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 40% EFC..... 117**

**Tabla 58: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 50% EFC..... 117**

**Tabla 59: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 0% EFC..... 117**

**Tabla 60: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 5% EFC..... 118**

**Tabla 61: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 10% EFC..... 118**

**Tabla 62: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 15% EFC..... 118**

**Tabla 63: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 20% EFC..... 119**

**Tabla 64: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 25% EFC..... 119**

**Tabla 65: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 30% EFC..... 119**

**Tabla 66: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 35% EFC..... 120**

**Tabla 67: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 40% EFC..... 120**

**Tabla 68: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 50% EFC..... 120**

**Tabla 69: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 0% EFC..... 121**

**Tabla 70: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 5% EFC..... 121**

**Tabla 71: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 10% EFC..... 121**

**Tabla 72: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 15% EFC..... 122**

**Tabla 73: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 20% EFC..... 122**

**Tabla 74: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 25% EFC..... 122**

**Tabla 75: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 30% EFC..... 123**

**Tabla 76: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 35% EFC..... 123**

**Tabla 77: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 40% EFC..... 123**

**Tabla 78: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 50% EFC..... 124**

**Tabla 79: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 0% de EFC..... 127**





**Tabla 80: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 5% de EFC.**  
..... 127

**Tabla 81: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 10% de EFC.**  
..... 128

**Tabla 82: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 15% de EFC.**  
..... 128

**Tabla 83: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 20% de EFC.**  
..... 128

**Tabla 84: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 25% de EFC.**  
..... 129

**Tabla 85: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 30% de EFC.**  
..... 129

**Tabla 86: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 35% de EFC.**  
..... 129

**Tabla 87: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 40% de EFC.**  
..... 130

**Tabla 88: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 50% de EFC.**  
..... 130

**Tabla 89: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 0% de EFC.**  
..... 130

**Tabla 90: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 5% de EFC.**  
..... 131

**Tabla 91: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 10% de EFC.**  
..... 131

**Tabla 92: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 15% de EFC.**  
..... 131

**Tabla 93: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 20% de EFC.**  
..... 132

**Tabla 94: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 25% de EFC.**  
..... 132

**Tabla 95: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 30% de EFC.**  
..... 132

**Tabla 96: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 35% de EFC.**  
..... 133

**Tabla 97: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 40% de EFC.**  
..... 133

**Tabla 98: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 50% de EFC.**  
..... 133

**Tabla 99: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 0% de EFC.**  
..... 134

**Tabla 100: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 5% de EFC.**  
..... 134

**Tabla 101: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 10% de EFC.**  
..... 134

**Tabla 102: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 15% de EFC.**  
..... 135

**Tabla 103: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 20% de EFC.**  
..... 135





**Tabla 104: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 25% de EFC..... 135**

**Tabla 105: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 30% de EFC..... 136**

**Tabla 106: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 35% de EFC..... 136**

**Tabla 107: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 40% de EFC..... 136**

**Tabla 108: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 50% de EFC..... 137**

**Tabla 109: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 0% de EFC..... 137**

**Tabla 110: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 5% de EFC..... 137**

**Tabla 111: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 10% de EFC..... 138**

**Tabla 112: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 15% de EFC..... 138**

**Tabla 113: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 20% de EFC..... 138**

**Tabla 114: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 25% de EFC..... 139**

**Tabla 115: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 30% de EFC..... 139**

**Tabla 116: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 35% de EFC..... 139**

**Tabla 117: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 40% de EFC..... 140**

**Tabla 118: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 50% de EFC..... 140**

**Tabla 119: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 0% de EFC..... 140**

**Tabla 120: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 5% de EFC..... 141**

**Tabla 121: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 10% de EFC..... 141**

**Tabla 122: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 15% de EFC..... 141**

**Tabla 123: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 20% de EFC..... 142**

**Tabla 124: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 25% de EFC..... 142**

**Tabla 125: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 30% de EFC..... 142**

**Tabla 126: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 35% de EFC..... 143**

**Tabla 127: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 40% de EFC..... 143**



**Tabla 128: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 50% de EFC.**..... 143

**Tabla 129: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 0% de EFC.**..... 144

**Tabla 130: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 5% de EFC.**..... 144

**Tabla 131: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 10% de EFC.**..... 144

**Tabla 132: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 15% de EFC.**..... 145

**Tabla 133: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 20% de EFC.**..... 145

**Tabla 134: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 25% de EFC.**..... 145

**Tabla 135: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 30% de EFC.**..... 146

**Tabla 136: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 35% de EFC.**..... 146

**Tabla 137: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 40% de EFC.**..... 146

**Tabla 138: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 50% de EFC.**..... 147

**Tabla 139: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 0% EFC.**..... 148

**Tabla 140: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 5% EFC.**..... 149

**Tabla 141: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 10% EFC.**..... 149

**Tabla 142: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 15% EFC.**..... 149

**Tabla 143: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 20% EFC.**..... 150

**Tabla 144: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 25% EFC.**..... 150

**Tabla 145: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 30% EFC.**..... 150

**Tabla 146: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 35% EFC.**..... 151

**Tabla 147: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 40% EFC.**..... 151

**Tabla 148: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 50% EFC.**..... 151

**Tabla 149: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 0% EFC.**..... 152

**Tabla 150: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 5% EFC.**..... 152

**Tabla 151: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 10% EFC.**..... 152



**Tabla 152: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 15% EFC.**  
..... 153

**Tabla 153: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 20% EFC.**  
..... 153

**Tabla 154: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 25% EFC.**  
..... 153

**Tabla 155: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 30% EFC.**  
..... 154

**Tabla 156: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 35% EFC.**  
..... 154

**Tabla 157: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 40% EFC.**  
..... 154

**Tabla 158: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 50% EFC.**  
..... 155

**Tabla 159: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 0% EFC.**  
..... 155

**Tabla 160: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 5% EFC.**  
..... 155

**Tabla 161: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 10% EFC.**  
..... 156

**Tabla 162: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 15% EFC.**  
..... 156

**Tabla 163: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 20% EFC.**  
..... 156

**Tabla 164: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 25% EFC.**  
..... 157

**Tabla 165: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 30% EFC.**  
..... 157

**Tabla 166: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 35% EFC.**  
..... 157

**Tabla 167: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 40% EFC.**  
..... 158

**Tabla 168: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 50% EFC.**  
..... 158

**Tabla 169: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 0% EFC.**158

**Tabla 170: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 5% EFC.**159

**Tabla 171: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 10% EFC.**  
..... 159

**Tabla 172: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 15% EFC.**  
..... 159

**Tabla 173: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 20% EFC.**  
..... 160

**Tabla 174: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 25% EFC.**  
..... 160

**Tabla 175: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 30% EFC.**  
..... 160

**Tabla 176: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 35% EFC.**  
..... 161



**Tabla 177: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 40% EFC.**  
..... 161

**Tabla 178: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 50% EFC.**  
..... 161

**Tabla 179: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 0% EFC.**  
..... 162

**Tabla 180: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 5% EFC.**  
..... 162

**Tabla 181: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 10% EFC.**  
..... 162

**Tabla 182: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 15% EFC.**  
..... 163

**Tabla 183: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 20% EFC.**  
..... 163

**Tabla 184: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 25% EFC.**  
..... 163

**Tabla 185: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 30% EFC.**  
..... 164

**Tabla 186: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 35% EFC.**  
..... 164

**Tabla 187: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 40% EFC.**  
..... 164

**Tabla 188: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 50% EFC.**  
..... 165

**Tabla 189: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 0% EFC.**  
..... 165

**Tabla 190: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 5% EFC.**  
..... 165

**Tabla 191: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 10% EFC.**  
..... 166

**Tabla 192: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 15% EFC.**  
..... 166

**Tabla 193: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 20% EFC.**  
..... 166

**Tabla 194: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 25% EFC.**  
..... 167

**Tabla 195: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 30% EFC.**  
..... 167

**Tabla 196: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 35% EFC.**  
..... 167

**Tabla 197: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 40% EFC.**  
..... 168

**Tabla 198: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 50% EFC.**  
..... 168

**Tabla 199: pH del concreto con escoria de cobre sobre muestras con 30%, 35% y 40%.....** 171

**Tabla 200: Cantidades aproximadas de agregados obtenidas mediante cuarteo. ....** 171

**Tabla 201: Análisis granulométrico del agregado fino. ....** 172

**Tabla 202: Cálculo del módulo de finura del agregado fino.....** 173

**Tabla 203: Análisis granulométrico del agregado grueso.....** 174



**Tabla 204: Análisis granulométrico de la escoria de cobre. .... 175**

**Tabla 205: Peso específico y absorción de los agregados y de la EFC. .... 181**

**Tabla 206: Características físicas de los recipientes empleados..... 188**

**Tabla 207: Peso unitario y contenido de vacíos de los agregados. .... 188**

**Tabla 208: Contenido de humedad de los agregados. .... 191**

**Tabla 209: Características físicas de los agregados..... 192**

**Tabla 210: Características físicas de los cementos tipo IP y tipo V. .... 193**

**Tabla 211: Asentamientos recomendables para diferentes tipos de estructuras..... 194**

**Tabla 212: Requisitos aproximados de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado..... 195**

**Tabla 213: Correspondencia entre la relación agua/cemento y esfuerzo a compresión del concreto. .... 196**

**Tabla 214: Volumen de cemento necesario por metro cúbico de mezcla, por tipo de cemento. 197**

**Tabla 215: Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto, para diferentes módulos de finura del agregado fino. .... 198**

**Tabla 216: Resumen de resultados obtenidos sobre el análisis de los componentes del concreto. .... 199**

**Tabla 217: Resumen de pesos específicos de los componentes del concreto. .... 199**

**Tabla 218: Volumen de los componentes del concreto por metro cúbico. .... 200**

**Tabla 219: Volumen absoluto de agregado fino por tipo de cemento..... 200**

**Tabla 220: Peso del agregado fino por metro cúbico de concreto, por tipo de cemento. .... 200**

**Tabla 221: Pesos corregidos del agregado grueso, y del agregado fino por tipo de cemento, por unidad de volumen. .... 201**

**Tabla 222: Balance de agua en los agregados. .... 201**

**Tabla 223: Contribución de agua de los agregados..... 202**

**Tabla 224: Agua de mezcla final por tipo de cemento. .... 202**

**Tabla 225: Pesos corregidos de los componentes del concreto por metro cúbico de mezcla. .... 202**

**Tabla 226: Pesos corregidos de los componentes del concreto por metro cúbico de mezcla con 5% de desperdicio. .... 203**

**Tabla 227: Pesos corregidos de los componentes del concreto por volumen de probeta con 5% de desperdicio. .... 203**

**Tabla 228: Proporciones de los componentes del concreto respecto a la cantidad de cemento. 204**

**Tabla 229: Asentamiento de la mezcla fresca para 7, 14 y 28 días de curado y diferentes porcentajes de EFC. .... 204**

**Tabla 230: Coeficientes de correlación y determinación, datos % EFC – asentamiento, en probetas fabricadas con cementos tipo IP y tipo V. .... 206**

**Tabla 231: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 0% EFC, mediante esclerometría. .... 207**

**Tabla 232: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 5% EFC, mediante esclerometría. .... 208**

**Tabla 233: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 10% EFC, mediante esclerometría. .... 208**

**Tabla 234: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 15% EFC, mediante esclerometría. .... 208**

**Tabla 235: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 20% EFC, mediante esclerometría. .... 209**

**Tabla 236: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 25% EFC, mediante esclerometría. .... 209**



**Tabla 237: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 30% EFC, mediante esclerometría. .... 209**

**Tabla 238: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 35% EFC, mediante esclerometría. .... 210**

**Tabla 239: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 40% EFC, mediante esclerometría. .... 210**

**Tabla 240: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 50% EFC, mediante esclerometría. .... 210**

**Tabla 241: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 0% EFC, mediante esclerometría. .... 211**

**Tabla 242: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 5% EFC, mediante esclerometría. .... 211**

**Tabla 243: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 10% EFC, mediante esclerometría. .... 211**

**Tabla 244: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 15% EFC, mediante esclerometría. .... 212**

**Tabla 245: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 20% EFC, mediante esclerometría. .... 212**

**Tabla 246: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 25% EFC, mediante esclerometría. .... 212**

**Tabla 247: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 30% EFC, mediante esclerometría. .... 213**

**Tabla 248: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 35% EFC, mediante esclerometría. .... 213**

**Tabla 249: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 40% EFC, mediante esclerometría. .... 213**

**Tabla 250: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 50% EFC, mediante esclerometría. .... 214**

**Tabla 251: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 0% EFC, mediante esclerometría. .... 214**

**Tabla 252: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 5% EFC, mediante esclerometría. .... 214**

**Tabla 253: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 10% EFC, mediante esclerometría. .... 215**

**Tabla 254: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 15% EFC, mediante esclerometría. .... 215**

**Tabla 255: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 20% EFC, mediante esclerometría. .... 215**

**Tabla 256: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 25% EFC, mediante esclerometría. .... 216**

**Tabla 257: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 30% EFC, mediante esclerometría. .... 216**

**Tabla 258: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 35% EFC, mediante esclerometría. .... 216**

**Tabla 259: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 40% EFC, mediante esclerometría. .... 217**

**Tabla 260: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 50% EFC, mediante esclerometría. .... 217**





**Tabla 261: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 0% EFC, mediante esclerometría. .... 217**

**Tabla 262: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 5% EFC, mediante esclerometría. .... 218**

**Tabla 263: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 10% EFC, mediante esclerometría. .... 218**

**Tabla 264: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 15% EFC, mediante esclerometría. .... 218**

**Tabla 265: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 20% EFC, mediante esclerometría. .... 219**

**Tabla 266: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 25% EFC, mediante esclerometría. .... 219**

**Tabla 267: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 30% EFC, mediante esclerometría. .... 219**

**Tabla 268: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 35% EFC, mediante esclerometría. .... 220**

**Tabla 269: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 40% EFC, mediante esclerometría. .... 220**

**Tabla 270: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 50% EFC, mediante esclerometría. .... 220**

**Tabla 271: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 0% EFC, mediante esclerometría. .... 221**

**Tabla 272: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 5% EFC, mediante esclerometría. .... 221**

**Tabla 273: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 10% EFC, mediante esclerometría. .... 221**

**Tabla 274: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 15% EFC, mediante esclerometría. .... 222**

**Tabla 275: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 20% EFC, mediante esclerometría. .... 222**

**Tabla 276: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 25% EFC, mediante esclerometría. .... 222**

**Tabla 277: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 30% EFC, mediante esclerometría. .... 223**

**Tabla 278: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 35% EFC, mediante esclerometría. .... 223**

**Tabla 279: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 40% EFC, mediante esclerometría. .... 223**

**Tabla 280: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 50% EFC, mediante esclerometría. .... 224**

**Tabla 281: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 0% EFC, mediante esclerometría. .... 224**

**Tabla 282: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 5% EFC, mediante esclerometría. .... 224**

**Tabla 283: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 10% EFC, mediante esclerometría. .... 225**

**Tabla 284: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 15% EFC, mediante esclerometría. .... 225**



**Tabla 285: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 20% EFC, mediante esclerometría. .... 225**

**Tabla 286: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 25% EFC, mediante esclerometría. .... 226**

**Tabla 287: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 30% EFC, mediante esclerometría. .... 226**

**Tabla 288: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 35% EFC, mediante esclerometría. .... 226**

**Tabla 289: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 40% EFC, mediante esclerometría. .... 227**

**Tabla 290: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 50% EFC, mediante esclerometría. .... 227**

**Tabla 291: Resistencia a la compresión promedio mediante esclerometría, para cementos tipo IP y tipo V, para 7, 14 y 28 días de curado..... 228**

**Tabla 292: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 0% EFC, mediante compresión axial. .... 230**

**Tabla 293: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 5% EFC, mediante compresión axial. .... 230**

**Tabla 294: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 10% EFC, mediante compresión axial. .... 231**

**Tabla 295: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 15% EFC, mediante compresión axial. .... 231**

**Tabla 296: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 20% EFC, mediante compresión axial. .... 231**

**Tabla 297: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 25% EFC, mediante compresión axial. .... 232**

**Tabla 298: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 30% EFC, mediante compresión axial. .... 232**

**Tabla 299: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 35% EFC, mediante compresión axial. .... 232**

**Tabla 300: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 40% EFC, mediante compresión axial. .... 233**

**Tabla 301: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 50% EFC, mediante compresión axial. .... 233**

**Tabla 302: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 0% EFC, mediante compresión axial. .... 233**

**Tabla 303: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 5% EFC, mediante compresión axial. .... 234**

**Tabla 304: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 10% EFC, mediante compresión axial. .... 234**

**Tabla 305: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 15% EFC, mediante compresión axial. .... 234**

**Tabla 306: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 20% EFC, mediante compresión axial. .... 235**

**Tabla 307: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 25% EFC, mediante compresión axial. .... 235**

**Tabla 308: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 30% EFC, mediante compresión axial. .... 235**





**Tabla 309: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 35% EFC, mediante compresión axial. .... 236**

**Tabla 310: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 40% EFC, mediante compresión axial. .... 236**

**Tabla 311: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 50% EFC, mediante compresión axial. .... 236**

**Tabla 312: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 0% EFC, mediante compresión axial. .... 237**

**Tabla 313: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 5% EFC, mediante compresión axial. .... 237**

**Tabla 314: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 10% EFC, mediante compresión axial. .... 237**

**Tabla 315: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 15% EFC, mediante compresión axial. .... 238**

**Tabla 316: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 20% EFC, mediante compresión axial. .... 238**

**Tabla 317: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 25% EFC, mediante compresión axial. .... 238**

**Tabla 318: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 30% EFC, mediante compresión axial. .... 239**

**Tabla 319: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 35% EFC, mediante compresión axial. .... 239**

**Tabla 320: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 40% EFC, mediante compresión axial. .... 239**

**Tabla 321: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 50% EFC, mediante compresión axial. .... 240**

**Tabla 322: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 0% EFC, mediante compresión axial. .... 240**

**Tabla 323: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 5% EFC, mediante compresión axial. .... 241**

**Tabla 324: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 10% EFC, mediante compresión axial. .... 241**

**Tabla 325: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 15% EFC, mediante compresión axial. .... 241**

**Tabla 326: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 20% EFC, mediante compresión axial. .... 242**

**Tabla 327: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 25% EFC, mediante compresión axial. .... 242**

**Tabla 328: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 30% EFC, mediante compresión axial. .... 242**

**Tabla 329: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 35% EFC, mediante compresión axial. .... 243**

**Tabla 330: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 40% EFC, mediante compresión axial. .... 243**

**Tabla 331: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 50% EFC, mediante compresión axial. .... 243**

**Tabla 332: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 0% EFC, mediante compresión axial. .... 244**



**Tabla 333: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 5% EFC, mediante compresión axial. .... 244**

**Tabla 334: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 10% EFC, mediante compresión axial. .... 244**

**Tabla 335: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 15% EFC, mediante compresión axial. .... 245**

**Tabla 336: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 20% EFC, mediante compresión axial. .... 245**

**Tabla 337: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 25% EFC, mediante compresión axial. .... 245**

**Tabla 338: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 30% EFC, mediante compresión axial. .... 246**

**Tabla 339: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 35% EFC, mediante compresión axial. .... 246**

**Tabla 340: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 40% EFC, mediante compresión axial. .... 246**

**Tabla 341: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 50% EFC, mediante compresión axial. .... 247**

**Tabla 342: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 0% EFC, mediante compresión axial. .... 247**

**Tabla 343: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 5% EFC, mediante compresión axial. .... 247**

**Tabla 344: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 10% EFC, mediante compresión axial. .... 248**

**Tabla 345: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 15% EFC, mediante compresión axial. .... 248**

**Tabla 346: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 20% EFC, mediante compresión axial. .... 248**

**Tabla 347: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 25% EFC, mediante compresión axial. .... 249**

**Tabla 348: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 30% EFC, mediante compresión axial. .... 249**

**Tabla 349: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 35% EFC, mediante compresión axial. .... 249**

**Tabla 350: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 40% EFC, mediante compresión axial. .... 250**

**Tabla 351: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 50% EFC, mediante compresión axial. .... 250**

**Tabla 352: Resistencia a la compresión promedio de las probetas mediante ensayo de compresión axial. .... 251**

**Tabla 353: Tipos de falla en probetas cilíndricas de cementos tipo IP y tipo V, a diferentes tiempos de curado. .... 252**

**Tabla 354: Tipos de falla con más incidencia de acuerdo al tipo de cemento y tiempo de curado. .... 253**

**Tabla 355: Incremento de la resistencia a la compresión en concretos con cementos tipo IP y tipo V respecto al concreto patrón (0% EFC), mediante compresión axial. .... 254**

**Tabla 356: Coeficientes de correlación y de determinación, datos asentamiento – f’c, en probetas fabricadas con cementos tipo IP y tipo V, hasta 50% de EFC. .... 259**



**Tabla 357: Coeficientes de correlación y de determinación, datos asentamiento –  $f^c$ , hasta 35% de EFC. .... 259**

**Tabla 358: Coeficientes de correlación y de determinación, datos %EFC– $f^c$ , en probetas fabricadas con cementos tipo IP y tipo V, hasta 50% de EFC. .... 263**

**Tabla 359: Coeficientes de correlación y de determinación, datos %EFC– $f^c$ , en probetas fabricadas con cementos tipo IP y tipo V, hasta 35% de EFC. .... 264**

**Tabla 360: Nivel de correlación entre los valores de resistencia a la compresión mediante compresión axial y esclerometría. .... 267**

**Tabla 361: Porcentajes residuales mediante aproximación exponencial, con cemento tipo IP y 7 días de curado. .... 273**

**Tabla 362: Porcentajes residuales mediante aproximación exponencial, con cemento tipo V y 7 días de curado. .... 273**

**Tabla 363: Porcentajes residuales mediante aproximación exponencial, con cemento tipo IP y 14 días de curado. .... 274**

**Tabla 364: Porcentajes residuales mediante aproximación exponencial, con cemento tipo V y 14 días de curado. .... 274**

**Tabla 365: Porcentajes residuales mediante aproximación exponencial, con cemento tipo IP y 28 días de curado. .... 275**

**Tabla 366: Porcentajes residuales mediante aproximación exponencial, con cemento tipo V y 28 días de curado. .... 275**

**Tabla 367: Porcentajes residuales mediante aproximación cúbica, con cemento tipo IP y 7 días de curado. .... 276**

**Tabla 368: Porcentajes residuales mediante aproximación cúbica, con cemento tipo V y 7 días de curado. .... 277**

**Tabla 369: Porcentajes residuales mediante aproximación cúbica, con cemento tipo IP y 14 días de curado. .... 277**

**Tabla 370: Porcentajes residuales mediante aproximación cúbica, con cemento tipo V y 14 días de curado. .... 278**

**Tabla 371: Porcentajes residuales mediante aproximación cúbica, con cemento tipo IP y 28 días de curado. .... 278**

**Tabla 372: Porcentajes residuales mediante aproximación cúbica, con cemento tipo V y 28 días de curado. .... 279**

**Tabla 373: Porcentajes residuales máximos respecto a la resistencia experimental, mediante aproximación exponencial. .... 280**

**Tabla 374: Porcentajes residuales máximos respecto a la resistencia experimental, mediante aproximación cúbica. .... 280**

**Tabla 375: Porcentajes residuales máximos finales para establecer la dispersión real entre métodos de medición de la resistencia a la compresión del concreto. .... 281**

**Tabla 376: Porcentajes residuales máximos y mínimos por tipo de cemento y tiempo de curado en ensayo de índice de rebote. .... 284**

**Tabla 377: Comparación de resultados experimentales y estimados en probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, mediante esclerometría. .... 286**

**Tabla 378: Comparación de resultados experimentales y estimados en probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, mediante esclerometría. .... 287**

**Tabla 379: Porcentajes residuales máximos y mínimos por tipo de cemento y tiempo de curado en ensayo de compresión axial. .... 290**

**Tabla 380: Comparación de resultados experimentales y estimados en probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, mediante compresión axial. .... 291**



<b>Tabla 381: Comparación de resultados experimentales y estimados en probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, mediante compresión axial.....</b>	<b>292</b>
<b>Tabla 382: pH del concreto con escoria de cobre. ....</b>	<b>296</b>
<b>Tabla 383: Costo de 1 m<sup>3</sup> de concreto con cemento tipo IP y 35% de EFC.....</b>	<b>298</b>
<b>Tabla 384: Costo de 1 m<sup>3</sup> de concreto con cemento tipo V y 35% de EFC. ....</b>	<b>298</b>
<b>Tabla 385: Resultados promedio del asentamiento y clasificación del concreto según su consistencia. ....</b>	<b>301</b>
<b>Tabla 386: Coeficientes de correlación de Pearson %EFC–asentamiento.....</b>	<b>303</b>
<b>Tabla 387: Resultados finales de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas.....</b>	<b>308</b>
<b>Tabla 388: Incremento de la resistencia a la compresión del concreto en la proporción óptima de escoria de cobre para ambos tipos de cemento. ....</b>	<b>309</b>
<b>Tabla 389: Dispersión real del esclerómetro en función de las ecuaciones de tendencia exponencial y cúbica por cada tipo de cemento. ....</b>	<b>312</b>
<b>Tabla 390: Matriz de consistencia del proyecto de investigación. ....</b>	<b>334</b>
<b>Tabla 391: Costo de 1 m<sup>3</sup> de concreto con cemento tipo IP y 100% de AF.....</b>	<b>338</b>
<b>Tabla 392: Costo de 1 m<sup>3</sup> de concreto con cemento tipo V y 100% de AF.....</b>	<b>338</b>

## Índice de figuras

Figura 1: Escoria de fundición de cobre. ....	27
Figura 2: Tipos de falla de las probetas de concreto. ....	34
Figura 3: Partes del esclerómetro analógico. ....	35
Figura 4: Clasificación del concreto según su consistencia. ....	38
Figura 5: Dimensiones del cono de Abrams. ....	61
Figura 6: Balanza digital. ....	62
Figura 7: Briquetas de 15 cm x 30 cm. ....	62
Figura 8: Mezcladora de media bolsa de cemento de capacidad. ....	63
Figura 9: Poza de curado. ....	63
Figura 10: Martillo de goma. ....	64
Figura 11: Varillas de compactación de mezcla. ....	64
Figura 12: Máquina de compresión axial marca Humboldt. ....	65
Figura 13: Esclerómetro analógico marca Proceq. ....	66
Figura 14: Juego de tamices. ....	66
Figura 15: Peachímetro digital. ....	67
Figura 16: Máquina de Los Ángeles. ....	67
Figura 17: Horno de precisión. ....	68
Figura 18: Cono de consistencia y apisonador. ....	68
Figura 19: Wincha de mano o cinta métrica. ....	68
Figura 20: Escobilla de acero. ....	69
Figura 21: Cucharón metálico. ....	69
Figura 22: Jarra con graduación en litros. ....	69
Figura 23: Baldes de plástico de 20 litros. ....	70
Figura 24: Carretilla tipo boogie. ....	70
Figura 25: Nivel de mano. ....	70
Figura 26: Alicata universal. ....	71
Figura 27: Espátula y badilejo. ....	71
Figura 28: Martillo, llave de tuercas y destornilladores. ....	71
Figura 29: Muestra de material para los ensayos. ....	72
Figura 30: Mezcla y preparación del agregado. ....	73
Figura 31: Muestra representativa del agregado en laboratorio. ....	73
Figura 32: Tamizado del agregado fino en máquina sacudidora. ....	74
Figura 33: Agregado fino retenido en los tamices de la serie. ....	74
Figura 34: Preparación de los tamices de la serie gruesa. ....	76
Figura 35: Agregado grueso retenido en cada tamiz. ....	76
Figura 36: Escoria de cobre retenida en cada tamiz. ....	78
Figura 37: Verificación del estado saturado superficialmente seco. ....	80
Figura 38: Extracción de aire del picnómetro con agua y muestra. ....	80
Figura 39: Preparación del agregado grueso para ensayo. ....	82
Figura 40: Secado superficial del agregado grueso saturado. ....	82
Figura 41: Verificación del estado saturado superficialmente seco de la escoria de cobre. ....	84
Figura 42: Peso unitario suelto del agregado fino. ....	86
Figura 43: Peso unitario compactado del agregado fino. ....	86
Figura 44: Peso unitario suelto del agregado grueso. ....	88
Figura 45: Peso unitario compactado del agregado grueso. ....	88



Figura 46: Agregado resultante del ensayo de abrasión..... 91

Figura 47: Lavado del agregado resultante del ensayo de abrasión..... 91

Figura 48: Contenido de humedad del agregado fino..... 92

Figura 49: Contenido de humedad del agregado grueso..... 94

Figura 50: Colocación de mezcla en el cono de Abrams..... 96

Figura 51: Medición del asentamiento de la mezcla..... 96

Figura 52: Limpieza y preparación de los moldes..... 99

Figura 53: Preparación del concreto en mezcladora..... 100

Figura 54: Colocación y compactación en el molde..... 100

Figura 55: Codificación de muestras empleada..... 100

Figura 56: Desmolde de probetas cilíndricas de concreto..... 101

Figura 57: Poza de curado de probetas de concreto..... 101

Figura 58: Retícula de 3x3 para ensayo de índice de rebote..... 103

Figura 59: Ensayo de índice de rebote sobre probetas de concreto..... 103

Figura 60: Registro de dimensiones y peso de probetas..... 125

Figura 61: Colocación de probetas en la máquina de compresión..... 125

Figura 62: Ensayo de compresión axial de probetas..... 126

Figura 63: Probeta de concreto luego de la falla..... 126

Figura 64: Supervisión de ensayos por parte del asesor de tesis..... 126

Figura 65: Verificación de ensayos por parte de los dictaminantes..... 126

Figura 66: Medición del pH del concreto con escoria de cobre..... 170

Figura 67: Curva granulométrica del agregado fino de Cunyac..... 173

Figura 68: Curva granulométrica del agregado grueso de Huacarpay..... 174

Figura 69: Curva granulométrica de la escoria de cobre..... 175

Figura 70: Desarrollo del asentamiento de la mezcla, fabricada con cemento tipo IP, con el incremento de escoria de cobre..... 205

Figura 71: Desarrollo del asentamiento de la mezcla, fabricada con cemento tipo V, con el incremento de escoria de cobre..... 206

Figura 72: Incremento porcentual de f'c respecto al patrón, con cemento tipo IP y 7, 14 y 28 días de curado..... 255

Figura 73: Incremento porcentual de f'c respecto al patrón, con cemento tipo V y 7, 14 y 28 días de curado..... 256

Figura 74: Curva granulométrica en el porcentaje óptimo (35%) de sustitución de agregado fino por escoria de cobre..... 257

Figura 75: Desarrollo del asentamiento y resistencia a la compresión del concreto con cemento tipo IP y 7 días de curado..... 260

Figura 76: Desarrollo del asentamiento y resistencia a la compresión del concreto con cemento tipo IP y 14 días de curado..... 260

Figura 77: Desarrollo del asentamiento y resistencia a la compresión del concreto con cemento tipo IP y 28 días de curado..... 261

Figura 78: Desarrollo del asentamiento y resistencia a la compresión del concreto con cemento tipo V y 7 días de curado..... 261

Figura 79: Desarrollo del asentamiento y resistencia a la compresión del concreto con cemento tipo V y 14 días de curado..... 262

Figura 80: Desarrollo del asentamiento y resistencia a la compresión del concreto con cemento tipo V y 28 días de curado..... 262

Figura 81: Curvas de ajuste de tendencia sobre datos de esclerometría y compresión axial de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado..... 268





**Figura 82: Curvas de ajuste de tendencia sobre datos de esclerometría y compresión axial de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado. .... 268**

**Figura 83: Curvas de ajuste de tendencia sobre datos de esclerometría y compresión axial de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado. .... 269**

**Figura 84: Curvas de ajuste de tendencia sobre datos de esclerometría y compresión axial de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado..... 269**

**Figura 85: Curvas de ajuste de tendencia sobre datos de esclerometría y compresión axial de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado..... 270**

**Figura 86: Curvas de ajuste de tendencia sobre datos de esclerometría y compresión axial de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado..... 270**

**Figura 87: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, mediante índice de rebote. .... 282**

**Figura 88: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, mediante índice de rebote. .... 282**

**Figura 89: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, mediante índice de rebote. .... 283**

**Figura 90: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, mediante índice de rebote. .... 283**

**Figura 91: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, mediante índice de rebote. .... 283**

**Figura 92: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, mediante índice de rebote. .... 284**

**Figura 93: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, mediante compresión axial. .... 288**

**Figura 94: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, mediante compresión axial. .... 288**

**Figura 95: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, mediante compresión axial. .... 289**

**Figura 96: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, mediante compresión axial. .... 289**

**Figura 97: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, mediante compresión axial. .... 289**

**Figura 98: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, mediante compresión axial. .... 290**

**Figura 99: Reacción del ácido nítrico con la escoria de cobre..... 292**

**Figura 100: Reacción del ferricianuro de potasio con la escoria de cobre. .... 293**

**Figura 101: Reacción del ácido clorhídrico con la escoria de cobre. .... 294**

**Figura 102: Reacción de la fenolftaleína y el concreto con escoria de cobre. .... 295**

**Figura 103: Medición del pH del concreto con 35% de escoria de cobre..... 296**

**Figura 104: Desarrollo del asentamiento promedio de la mezcla, fabricada con cemento tipo IP, con el incremento de escoria de cobre. .... 302**

**Figura 105: Desarrollo del asentamiento promedio de la mezcla, fabricada con cemento tipo V, con el incremento de escoria de cobre. .... 302**

**Figura 106: Coeficientes de correlación de Pearson del % EFC–asentamiento, en concretos fabricados con cementos tipo IP y tipo V [0%–50% de EFC]..... 303**

**Figura 107: Coeficientes de correlación de Pearson del asentamiento–f’c, en concretos fabricados con cementos tipo IP y tipo V [0%–35% de EFC]..... 304**

**Figura 108: Resistencia a la compresión mediante esclerometría en concreto con cemento tipo IP a 7, 14 y 28 días de curado. .... 305**



<b>Figura 109: Resistencia a la compresión mediante esclerometría en concreto con cemento tipo V a 7, 14 y 28 días de curado. ....</b>	<b>306</b>
<b>Figura 110: Resistencia mediante compresión axial en concreto con cemento tipo IP a 7, 14 y 28 días de curado. ....</b>	<b>307</b>
<b>Figura 111: Resistencia mediante compresión axial en concreto con cemento tipo V a 7, 14 y 28 días de curado. ....</b>	<b>307</b>
<b>Figura 112: Incremento porcentual promedio de <math>f'c</math> respecto al patrón con cemento tipo IP... ..</b>	<b>310</b>
<b>Figura 113: Incremento porcentual promedio de <math>f'c</math> respecto al patrón con cemento tipo V... ..</b>	<b>310</b>
<b>Figura 114: Coeficientes de correlación de Pearson del % EFC-<math>f'c</math>, en concretos fabricados con cementos tipo IP y tipo V [0%-35% de EFC]. ....</b>	<b>311</b>







## Capítulo I: Planteamiento del problema

### 1.1. Identificación del problema

#### 1.1.1. Descripción del problema

Según reportes actuales, Perú es el segundo mayor productor de cobre en el mundo. Industrias, como la electrónica, requieren cada vez más cobre para sostener sus enormes índices de producción. Por eso, la actividad minera y metalúrgica debe producir grandes volúmenes de cobre para satisfacer la demanda; pero el proceso de producción de cobre genera gran cantidad de escoria, material que de no ser dispuesto de manera apropiada podría ser una peligrosa fuente de contaminación.

La escoria de cobre, como elemento residual de la industria minera, tiene múltiples usos. Sin embargo, poco se ha investigado sobre su potencial empleo como componente del concreto y actualmente no se aprovecha dicho residuo en el rubro construcción. Así se está perdiendo gran cantidad de material que podría ser empleado como sustituto del agregado fino. El tema es importante, sobre todo porque en el ámbito nacional y local no se han realizado estudios que permitan conocer los beneficios de la inclusión de la escoria de cobre en el concreto.

El problema radica en el desconocimiento de los efectos de la incorporación de escoria de cobre sobre la resistencia a la compresión del concreto. También hay desconocimiento respecto a sus efectos sobre la consistencia de la mezcla.

El estudio experimental y analítico realizado en esta tesis ha permitido conocer una proporción apropiada de escoria de cobre que debe ser incluida en sustitución del agregado fino, para obtener un concreto con una resistencia a la compresión óptima y satisfactoria.

#### 1.1.2. Formulación interrogativa del problema

##### 1.1.2.1. Formulación interrogativa del problema general

¿Cómo variará comparativamente la resistencia de un concreto con  $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ , con sustitución de agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso, en función de su resistencia a la compresión y consistencia, elaborado con cementos tipo IP y tipo V, mediante pruebas de índice de rebote y compresión axial de probetas sometidas a curado por inmersión, respecto a un concreto patrón?



### 1.1.2.2. Formulación interrogativa de los problemas específicos

#### Problema específico N° 1

¿Cómo se comportará la resistencia a la compresión de un concreto que se podría obtener con la sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporción de peso?

#### Problema específico N° 2

¿Cómo variará la resistencia del concreto con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso a los 7, 14 y 28 días de curado por inmersión, comparado con un concreto patrón?

#### Problema específico N° 3

¿Se obtendrá mejor consistencia en el concreto con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones porcentuales de peso, comparado con un concreto estándar?

#### Problema específico N° 4

¿Cuál será la relación óptima entre el porcentaje en peso del agregado fino que será sustituido por escoria de cobre en el concreto y la resistencia a la compresión?

#### Problema específico N° 5

¿Cuál será el incremento de resistencia máximo que aportará la sustitución de agregado fino por escoria de cobre respecto a un concreto patrón con  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ ?

## 1.2. Justificación e importancia de la investigación

### 1.2.1. Justificación técnica

La inclusión de escoria de cobre permite emplear un material abundante y poco aprovechado en la fabricación del concreto, por eso se ha evaluado su incidencia en la resistencia a la compresión. Además, por su campo de aplicación este proyecto de investigación contribuye al desarrollo de las ramas de Tecnología del concreto y Construcciones dentro de la Ingeniería Civil, porque se ha logrado establecer un procedimiento de sustitución de agregado fino por escoria de cobre en proporciones apropiadas, para mejorar las propiedades resistivas del concreto, es decir, resistencias más elevadas respecto a patrones elaborados con agregado fino y agregado grueso únicamente.



### **1.2.2. Justificación social**

La utilización de EFC permite mejorar las propiedades resistentes y consistentes cuando es empleada como componente del concreto, lo cual es un aporte importante al trabajo de los ingenieros civiles y por consiguiente beneficia a la población que percibe los resultados del desempeño de los profesionales de la construcción. También contribuye a la formación de los estudiantes porque constituye un valioso antecedente de futuras investigaciones relacionadas con el estudio del concreto y sus propiedades.

Finalmente, el empleo de la escoria pirometalúrgica permite dar un uso ecológico y sostenible a los desechos resultantes de la producción del cobre como materiales potencialmente utilizables en el rubro construcción, de esa manera se reduciría la cantidad de residuos que, de no ser dispuestos apropiadamente, podrían ser fuente de contaminación ambiental que perjudicaría a la población y al entorno natural (flora y fauna) adyacentes a los puntos de extracción del mineral, así se ve beneficiado el medio ambiente.

### **1.2.3. Justificación por viabilidad**

Para evaluar la resistencia a la compresión del concreto elaborado con escoria de cobre como sustituta del agregado fino se requirió elaborar probetas cilíndricas que fueron sometidas a pruebas de índice de rebote y compresión axial; también se evaluó la consistencia de la mezcla fresca. Todas las tareas que necesitó desarrollar la investigación fueron realizadas en el medio local: la prueba de resistencia a la compresión se realizó en la máquina de compresión axial, en laboratorio; también se realizó la prueba de resistencia del concreto mediante el empleo de un esclerómetro; y la prueba de consistencia del concreto fresco se realizó con el cono de Abrams en el mismo lugar donde se fabricó la mezcla. Los ensayos de agregados se hicieron con ayuda de tamices, horno, balanza, máquina de Los Ángeles, etc., también en laboratorio. Además, los componentes del concreto son fáciles de conseguir en el medio local.

La mayor parte de las herramientas e instrumentos empleados fueron provistos por el Laboratorio de Suelos, Concretos y Asfaltos de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Andina del Cusco. Por todo lo anterior, la investigación es totalmente viable.

### **1.2.4. Justificación por relevancia**

La importancia de la investigación de la influencia de la escoria de cobre sobre la resistencia del concreto radica en que permitió comprobar los beneficios del empleo de dicho material en



la fabricación de concretos que podrían ser empleados en la construcción de diferentes tipos de estructuras.

Este trabajo de investigación contribuye al establecimiento de técnicas detalladas, precisas y económicas para el cálculo de la proporción adecuada de escoria de cobre en el concreto.

### **1.3. Limitaciones de la investigación**

#### **1.3.1. Limitación espacial**

La etapa experimental y analítica de la tesis se desarrolló íntegramente en la ciudad del Cusco. La fabricación y curado de las probetas cilíndricas de concreto se realizó en el patio de un predio de esta ciudad, donde también se hicieron los ensayos de consistencia; las pruebas aplicadas a los materiales y los ensayos de resistencia del concreto se efectuaron en el laboratorio de Suelos y Concreto de la Facultad, en el local principal de la UAC.

#### **1.3.2. Limitación por condiciones técnicas y tipo de material**

El diseño de mezclas se realizó únicamente empleando el procedimiento y recomendaciones del método propuesto por el comité 211 del ACI.

La resistencia del concreto patrón fue  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup> para cada tipo de cemento.

El *slump* no debe ser menor a 5 cm, que garantiza una mezcla para usos estructurales.

El trabajo de investigación se realizó únicamente con dos tipos de cemento: tipo IP y tipo V.

Asimismo, se contempló la sustitución de agregado fino por escoria de cobre en proporciones porcentuales de peso.

Se empleó agregado grueso de la cantera de Huacarpay con TMN de 3/4 de pulgada y agregado fino de la cantera de Cunyac.

Los porcentajes de agregado fino que será sustituido por escoria de cobre fueron: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% y 50%.

La escoria de cobre fue comprada en Lima, de comerciantes minoristas que no dieron detalles de su lugar de producción ni de sus condiciones físicas ni químicas.

El agua de mezcla y el agua de curado se obtuvieron directamente de la red pública de agua potable.



### 1.3.3. Limitación por tiempo

Para determinar la resistencia a la compresión del concreto se establecieron tiempos de curado de las probetas, fabricadas con los dos tipos de cemento, de 7, 14 y 28 días. La consistencia se estudió midiendo el asentamiento de la mezcla fresca el mismo día de la fabricación del concreto.

## 1.4. Objetivo de la investigación

### 1.4.1. Objetivo general

Analizar comparativamente el comportamiento de la resistencia de un concreto  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  con sustitución de agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso en función de su resistencia a la compresión y consistencia, elaborado con cementos tipo IP y tipo V, mediante pruebas de índice de rebote y compresión axial de probetas sometidas a curado por inmersión, respecto a un concreto patrón.

### 1.4.2. Objetivos específicos

#### Objetivo específico N° 1

Determinar la resistencia a la compresión en el concreto con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso.

#### Objetivo específico N° 2

Determinar la resistencia a la compresión del concreto con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso a los 7, 14 y 28 días de curado por inmersión.

#### Objetivo específico N° 3

Analizar la consistencia del concreto con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso, respecto a un concreto estándar.

#### Objetivo específico N° 4

Determinar el porcentaje de peso óptimo de agregado fino que será sustituido por escoria de cobre para obtener un concreto de mejor resistencia a la compresión comparado con un concreto  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  estándar.



**Objetivo específico N° 5**

Determinar el incremento de resistencia a la compresión del concreto con escoria de cobre en sustitución del agregado fino respecto a un concreto patrón con  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ .



## Capítulo II: Marco teórico

### 2.1. Antecedentes de la tesis

#### 2.1.1. Antecedentes a nivel nacional

– **“Influencia del porcentaje de escorias de cobre en la resistencia a la compresión, penetración de cloruros y ataque por sulfatos en un concreto adicionado”**, realizado por el Dr. Nelson Williams Farro Pérez, de la Universidad Nacional de Trujillo en el año 2009.

El objetivo de la investigación fue evaluar la calidad protectora del concreto al acero de refuerzo frente al ataque de cloruros. Para ello se emplearon concretos de relación agua cemento de 0,40; 0,45; 0,50; 0,55 y 0,60, curados a 3 y 7 días por inmersión en agua saturada de cal. Se llegó a la conclusión de que los concretos con a/c de 0,40 y 0,45 presentaron tiempos más largos de inicio de corrosión; por otro lado, los concretos con a/c de 0,55 y 0,60 presentaron tiempos más cortos de inicio de corrosión.

– **“Estudio experimental del empleo de materiales de desecho de procesos mineros en aplicaciones prácticas con productos cementicios”**, ejecutado por Gerson Alfredo Anicama Acosta, de la Pontificia Universidad Católica del Perú, en la ciudad de Lima en 2010.

La investigación se realizó con el objetivo de analizar un grupo de 3 muestras de relave minero y verificar mediante ensayos experimentales la factibilidad del uso de dichos materiales en la fabricación de concreto; además, se buscó proponer aplicaciones prácticas para el concreto obtenido, para que pueda usarse en poblaciones adyacentes a las empresas mineras.

Se arribó a la conclusión de que las adiciones de relave en proporciones menores a 5% no afectan las características físicas principales de los concretos; adiciones mayores al 15% influyen negativamente y reducen las características resistentes de los concretos convencionales. El empleo de materiales de desecho de actividades mineras contribuye a la conservación del medio ambiente ya que la producción de cemento genera mucha contaminación por su consumo de combustibles fósiles y liberación de CO<sub>2</sub>. Asimismo, los relaves en las proporciones trabajadas no incorporan contenido de aire significativo a las mezclas de concreto; los relaves en las proporciones trabajadas no hacen variar significativamente el asentamiento del concreto.





– **“Estudio experimental para determinar patrones de correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en concreto simple”**, realizado por Gabriela Valencia Elguera y Miguel Ángel Ibarra Navarro, de la Pontificia Universidad Católica del Perú, en la ciudad de Lima, en el año 2013.

El objetivo principal de la tesis fue realizar un estudio que permitió determinar patrones de comportamiento entre los resultados del ensayo de pulso ultrasónico y del ensayo de compresión de elementos de concreto simple. También se buscó determinar la influencia del tamaño máximo nominal del agregado grueso y de la relación agua/cemento en la velocidad de pulso ultrasónico.

Se llegó a la conclusión de que el ensayo de pulso ultrasónico demostró tener altos coeficientes de determinación que confirmaron la dependencia entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso ultrasónico. También se comprobó que la influencia del tamaño máximo nominal del agregado grueso en la velocidad de pulso ultrasónico es directamente proporcional al tamaño del agregado; y se determinó que la relación agua/cemento es inversamente proporcional.

### **2.1.2. Antecedentes a nivel internacional**

– **“Uso de escoria de cobre en cementos”**, realizado por Sebastián Andrés Orizola Gómez, de la Universidad de Chile, en la ciudad de Santiago de Chile, en 2006.

El trabajo de investigación tuvo como objetivo principal el estudio de las propiedades puzolánicas de la escoria proveniente del proceso de refinación del cobre; asimismo se analizó el comportamiento de la escoria de cobre adicionado en la fabricación de cementos hidráulicos de acuerdo a la normativa chilena, evaluando la factibilidad técnica de utilizar la escoria de cobre en cementos hidráulicos.

Se llegó a la conclusión de que las resistencias mecánicas desarrolladas por los cementos fabricados superaban los requisitos mínimos establecidos por la normativa chilena para los cementos de grado corriente y de alta resistencia. También se pudo establecer que la resistencia mecánica de los concretos con adición de escoria de cobre disminuye al aumentar el porcentaje de adición.



– **“Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón”**, elaborado por Iván Alejandro Oyarzun Kneer, de la Universidad Austral de Chile, en la ciudad de Valdivia, en el año 2013.

El trabajo tuvo como objetivo principal elaborar una revisión bibliográfica para mostrar la fabricación hormigón con escoria de cobre, enfocado en la aplicación tecnológica, para ayudar a reducir el desecho de estos residuos que generan alto impacto ambiental.

Entre las principales conclusiones se señala que la escoria de cobre, al ser utilizada en la fabricación del concreto, confiere en algunos casos propiedades favorables al concreto respecto al fabricado con áridos tradicionales; el aumento de la densidad favorece el comportamiento de elementos estructurales, donde el peso propio cumple un rol importante en los diseños. Asimismo, se comprobó que dar un uso adecuado a la escoria de cobre favorecería al ecosistema alrededor de las fundiciones; además, se reduciría la extracción de material pétreo para obras civiles que también generan impacto en el medio ambiente.

– **“Efecto en la resistencia de las escorias de fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón”**, realizado por Patricio Cendoya, de la Universidad de Concepción, en Chile, en el año 2009.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es el estudio experimental de la resistencia a la flexotracción de hormigones fabricados con un árido fino obtenido a partir de la combinación de arena con escoria de cobre en distintas proporciones en volumen (25%, 40% y 50%), para dos relaciones de agua cemento (0,45 y 0,52). Se busca establecer una relación entre la adición de escoria de cobre y la trabajabilidad en el hormigón fresco, la densidad y resistencia a la flexotracción en el hormigón endurecido.

Se concluyó que la resistencia a la flexotracción y compresión del hormigón se incrementó en todos los casos estudiados, en función del porcentaje de incorporación de la escoria de cobre. También se concluye que la principal ventaja de la escoria de cobre, desde el punto de vista de la resistencia, es el incremento de la capacidad de carga con respecto al hormigón de referencia. Además, se pudo apreciar que la incorporación de escoria de cobre afecta la trabajabilidad de la mezcla; esto se debe a que las partículas de la escoria de cobre tienen una textura más lisa que la de las arenas empleadas.



## 2.2. Aspectos teóricos pertinentes

### 2.2.1. Definición de concreto

La lingüista Martha Hildebrandt (2003, pág. 121) explica de manera sencilla, pero bastante didáctica, que en Perú y en otros países de América se llama **concreto** lo que en España se conoce como **hormigón**, el cual es el material de construcción constituido por una mezcla de piedras menudas, arena y cemento; también indica que cuando dicha mezcla está reforzada por barras de acero o hierro, en América se llama concreto armado y en España se conoce como hormigón armado o cemento armado.

El concreto es un producto artificial compuesto que consiste de un medio ligante denominado pasta, dentro del cual se encuentran embebidas partículas de un medio ligado denominado agregado (Rivva, 2000, pág. 8).

El concreto es un material semejante a la piedra que se obtiene mediante una mezcla cuidadosamente proporcionada de cemento, arena y grava u otro agregado, y agua; después, esta mezcla se endurece en formaletas con la forma y dimensiones deseadas. El cuerpo del material consiste en agregado fino y grueso. El cemento y el agua interactúan químicamente para unir las partículas de agregado y conformar una masa sólida. Es necesario agregar agua, además de aquella que se requiere para la reacción química, con el fin de darle a la mezcla la trabajabilidad adecuada que permita llenar las formaletas y rodear el acero de refuerzo embebido, antes de que inicie el endurecimiento. Se pueden obtener concretos en un amplio rango de propiedades ajustando apropiadamente las proporciones de los materiales constitutivos (Nilson, 1999, pág. 1).

También puede definirse el concreto como un material pétreo, artificial, obtenido de la mezcla, en proporciones determinadas, de cemento, agregados y agua. El cemento y el agua forman una pasta que rodea a los agregados, constituyendo un material heterogéneo. Algunas veces se añaden ciertas sustancias, llamadas aditivos o adicionantes, que mejoran o modifican algunas propiedades del concreto (González & Robles, 2005, pág. 31).

Para producir concreto se debe partir de un diseño de mezcla, el cual consiste en la selección de los constituyentes disponibles (cemento, agregados, agua y aditivos) y su dosificación en cantidades relativas para producir, tan económicamente como sea posible, una masa volumétrica con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera la propiedades de resistencia, durabilidad, masa unitaria, estabilidad de volumen y



apariencia adecuadas (Asociación Colombiana de Productores de Concreto [ASOCRETO], 2010, pág. 1).

### 2.2.2. Componentes del concreto

Básicamente, el concreto resulta de la mezcla de un aglomerante que es el cemento, agregado grueso o piedra, agregado fino o arena, y agua. Algunas veces se le añade aditivos que le confieren al concreto algunas propiedades adicionales.

El cemento, el agua y la arena constituyen el mortero cuya función es unir las diversas partículas de agregado grueso llenando los vacíos entre ellas. En teoría, el volumen de mortero sólo debería llenar el volumen entre partículas. En la práctica, este volumen es mayor por el uso de una mayor cantidad de mortero para asegurar que no se formen vacíos (Harmsen, 2005, pág. 11).

La tecnología del concreto moderna define para este material cuatro componentes: cemento, agua, agregados y aditivos como elementos activos, y el aire como elemento pasivo. Si bien la definición tradicional consideraba a los aditivos como un elemento opcional, en la práctica moderna mundial estos constituyen un ingrediente normal, por cuanto está científicamente demostrada la conveniencia de su empleo en mejorar condiciones de trabajabilidad, resistencia y durabilidad (Pasquel, 1998, pág. 11).

**Tabla 1: Proporciones típicas en volumen absoluto de los componentes del concreto.**

Aire	1% a 3%
Cemento	7% a 15%
Agua	15% a 22%
Agregados	60% a 75%

Fuente: (Pasquel, 1998, pág. 15).

### 2.2.3. Cemento

El cemento es un material que tiene las propiedades de adhesión y cohesión, capaz de aglomerar en una sola masa sólida partículas conocidas como agregados, finos o gruesos, otorgando resistencia y durabilidad a la masa obtenida. En el medio local se emplean sobre todo los cementos hidráulicos como base de los concretos estructurales que son empleados en edificaciones y diferentes tipos de estructuras. Para fraguar y endurecerse, el cemento necesita de la interacción química con el agua, para alcanzar un estado de características sólidas debido



a las reacciones de hidratación de sus constituyentes, dando como resultado productos hidratados mecánicamente resistentes.

El más famoso es el cemento Portland, el cual es un material grisáceo finamente pulverizado, conformado fundamentalmente por silicatos de calcio y aluminio. Las materias primas usuales a partir de las cuales se fabrica son calizas que proporcionan el CaO y arcillas y esquistos que proveen el SiO<sub>2</sub> y el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Estos materiales se muelen, se mezclan, se funden en hornos hasta obtener el llamado *clinker*, y se enfrían y se muelen de nuevo para lograr la finura requerida (Nilson, 1999, pág. 28).

Las especificaciones técnicas garantizan la cantidad y tipo de cemento adecuados que se ha de emplear, para alcanzar los requisitos que se desea obtener en el concreto. En Perú, la totalidad de los cementos empleados son cementos Portland, los cuales cumplen con los requisitos establecidos en la Norma ASTM C150, o cementos combinados que cumplen con la Norma ASTM C595 (Rivva, 2000, pág. 28).

El cemento tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia del agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación (ASOCRETO, 2010, pág. 19).

#### **2.2.3.1. Principales componentes del cemento**

Según Pasquel (1998, pág. 22), tras el proceso de formación del *clinker* y molienda final se obtienen los compuestos que definen el comportamiento del cemento hidratado.

##### **a) Silicato Tricálcico (3CaO.SiO<sub>2</sub> – Alita)**

Define la resistencia inicial (en la primera semana) y tiene mucha importancia en el calor de hidratación.

##### **b) Silicato Dicálcico (2CaO.SiO<sub>2</sub> - Belita)**

Define la resistencia a largo plazo y tiene incidencia menor en el calor de hidratación.

##### **c) Aluminato Tricálcico (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**

Aisladamente no tiene trascendencia en la resistencia, pero con los silicatos condiciona el fraguado violento actuando como catalizador, por lo que es necesario añadir yeso en el proceso (3% - 6%) para controlarlo. Por su estabilidad química, es responsable de la resistencia del cemento a ambientes agresivos, como agua de mar y aguas servidas, ya que al reaccionar con



estos produce Sulfoaluminatos con propiedades expansivas; pero es débil ante el ataque de sulfatos, por lo que hay que limitar su contenido.

**d) Aluminio-Ferrito Tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  - Celita)**

Tiene trascendencia en la velocidad de hidratación y secundariamente en el calor de hidratación.

**e) Óxido de Magnesio ( $\text{MgO}$ )**

Pese a ser un componente menor, tiene importancia pues para contenidos mayores del 5% trae problemas de expansión en la pasta hidratada y endurecida.

**f) Óxidos de Potasio y Sodio ( $\text{K}_2\text{O}\cdot\text{Na}_2\text{O}$  - Álcalis)**

Tienen importancia para casos especiales de reacciones químicas con ciertos agregados, y los solubles en agua contribuyen a producir eflorescencias con agregados calcáreos.

**g) Óxidos de Manganeso y Titanio ( $\text{Mn}_2\text{O}_3\cdot\text{TiO}_2$ )**

El primero no tiene significación especial en las propiedades del cemento, salvo en su coloración, que tiende a ser marrón si se tienen contenidos mayores del 3%. Se ha observado que en casos donde los contenidos superan el 5% se obtiene disminución de resistencia a largo plazo. El segundo influye en la resistencia, reduciéndola para contenidos superiores a 5%. Para contenidos menores, no tiene mayor trascendencia.

De los compuestos mencionados, los silicatos y aluminatos constituyen los componentes mayores, pero no necesariamente los más trascendentes, pues algunos de los componentes menores tienen mucha importancia para ciertas condiciones de uso de los cementos.

### **2.2.3.2. Mecanismo de hidratación del cemento**

Hidratación es el conjunto de las reacciones químicas que se producen entre el agua y los componentes del cemento, que originan el paso del estado plástico al endurecido, con las propiedades inherentes a los nuevos productos generados. Al reaccionar con el agua, los componentes mencionados en el apartado anterior forman hidróxidos e hidratos de Calcio complejos. Además, la velocidad con que se desarrolla la hidratación es directamente proporcional a la finura del cemento e inversamente proporcional al tiempo, por eso inicialmente es muy rápida y disminuye con el transcurso de los días, y nunca se llega a detener.

Durante el proceso de hidratación, la reacción con el agua ocasiona que cada partícula de cemento se disperse en millones de partículas de productos de hidratación, desapareciendo los



constituyentes iniciales debido a la reacción química. Es un proceso exotérmico que genera flujo de calor hacia el exterior, a lo cual se denomina calor de hidratación.

En función de la temperatura, el tiempo y la relación entre la cantidad de agua y cemento que reaccionan, se definen estados por los cuales atraviesa la mezcla durante el proceso de hidratación.

#### **2.2.3.2.1. Estado plástico**

El estado plástico se origina luego de la mezcla del cemento con el agua, lo cual produce una pasta moldeable. A menor valor de la relación agua/cemento, la concentración de partículas de cemento en la pasta compactada es mayor y como consecuencia se tiene que la estructura de los productos de la hidratación es mucho más resistente. El yeso incorporado contrarresta la velocidad de las reacciones químicas y se produce lo que se denomina período latente o de reposo, donde las reacciones se ralentizan, pudiendo oscilar entre los 40 y 120 minutos.

#### **2.2.3.2.2. Fraguado inicial**

Etapas que dura aproximadamente tres horas, donde se aceleran las reacciones químicas en la pasta de cemento y empieza el endurecimiento y la pérdida de la plasticidad, lo cual puede medirse en términos de la resistencia a la deformación. En este estado se hace más prominente el proceso exotérmico, donde se genera el calor de hidratación a consecuencia de las reacciones químicas.

#### **2.2.3.2.3. Fraguado final**

Etapas que se presenta tras la fase de fraguado inicial, que se caracteriza por un endurecimiento apreciable y deformaciones permanentes. El gel muestra una estructura constituida por el ensamble definitivo de sus partículas endurecidas que ya no pueden modificarse.

#### **2.2.3.2.4. Endurecimiento**

El endurecimiento inicia junto al fraguado final. En este estado, las características resistentes del concreto se incrementan con el tiempo, donde se produce principalmente la hidratación permanente de los silicatos de calcio, que en teoría continúa de manera indefinida.

Es el estado final de la pasta, donde se evidencian totalmente las influencias de la composición del cemento.



### **2.2.3.3. Tipos de cemento**

Debido a que en Perú la fabricación de cemento Portland está sujeta a una serie de normas nacionales e internacionales, se puede establecer una clasificación en función de las propiedades que presenta.

#### **2.2.3.3.1. Cemento tipo I**

Material de uso general, donde no se requiere propiedades especiales. Es el principal componente de las obras civiles en el medio local.

#### **2.2.3.3.2. Cemento tipo II**

Tiene moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación. Se recomienda su utilización en estructuras sometidas a ambientes agresivos y/o vaciados masivos, sobre todo en zonas cálidas.

#### **2.2.3.3.3. Cemento tipo III**

Cemento que tiene como principal característica un desarrollo rápido de resistencia con elevado calor de hidratación. Su empleo es recomendado cuando las estructuras requieren su pronta puesta en servicio; también cuando se realiza vaciado en zonas de clima frío.

#### **2.2.3.3.4. Cemento tipo IV**

Cemento que tiene como propiedad un bajo calor de hidratación, por eso se recomienda su uso en vaciados masivos. También es requerido para vaciados en zonas de clima cálido.

#### **2.2.3.3.5. Cemento tipo V**

Cemento muy importante para este trabajo de investigación. Muy recomendable para ser utilizado en ambientes muy agresivos por su alta resistencia a los sulfatos. Se utiliza en concretos expuestos a la acción severa de sulfatos, principalmente donde el suelo y el agua subterránea tienen alta concentración de sulfatos.

Desarrolla resistencia más lentamente que el cemento tipo I. La alta resistencia a los sulfatos del cemento tipo V se debe a su bajo contenido de aluminato tricálcico que no excede el 5%. Su baja relación agua-cemento y baja permeabilidad son fundamentales para el adecuado desempeño de cualquier estructura expuesta al ataque de sulfatos. Incluso el cemento tipo V,





igual que otros tipos de cementos, no es resistente a ácidos y a otras sustancias altamente corrosivas.

La ASTM C150 (AASHTO M85) establece un enfoque físico y químico (ASTM C452 ensayo de expansión), para garantizar la resistencia a los sulfatos del cemento tipo V.

#### **2.2.3.3.6. Cemento tipo IP**

El cemento Portland tipo IP es utilizado en la construcción de estructuras en las cuales se debe cuidar ciertos aspectos del concreto como la resistencia, durabilidad, permeabilidad, etc., así como el calor de hidratación y plasticidad que puede manifestar la mezcla fresca. Se obtiene a través de la pulverización uniforme e íntima del *clinker* Portland y puzolana, con adición de sulfato de calcio (ASOCRETO, 2010, pág. 27).

El cemento Portland tipo IP es un material al cual se le añade puzolana, para modificar algunas propiedades en estado endurecido de la mezcla, en proporciones que varían entre 15% y 40% de la masa total (Pasquel, 1998, pág. 38).

De acuerdo a la NTP 334.090, el cemento tipo IP es un cemento hidráulico que tiene un contenido de puzolana por encima del 40% respecto a la masa de cemento adicionado.

Este tipo de cemento fue empleado en el trabajo de tesis, para experimentar con su comportamiento resistente luego de ser mezclado con escoria de cobre.

#### **2.2.3.4. Puzolana**

La NTP 334.090 define a la puzolana como un material silíceo o silíceo y aluminoso, que por sí mismo puede tener poco o ningún valor cementicio, pero que, finamente dividido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio, a temperaturas comunes, para formar compuestos que poseen propiedades cementicias.

Las puzolanas son materiales casi exclusivamente silíceos, de textura fina, que se activan en contacto con la cal de hidrólisis de los silicatos del *clinker*, que se encuentran en disolución en la fase líquida de la pasta de cemento (Porrero et al., 2009, pág. 97).

Las puzolanas pueden ser de origen natural (rocas volcánicas, esquistos, tierras diatomáceas, arcillas, pizarras, etc.) o artificial (cenizas volantes y microsílíce).



Entre las principales ventajas técnicas que ofrecen los cementos adicionados con puzolana se puede mencionar (ASOCRETO, 2010, pág. 28):

- Reducción del costo del conglomerante.
- Mejor trabajabilidad, menor segregación y menor exudación.
- Menor calor durante la hidratación y fraguado, y una consiguiente menor tendencia a la fisuración (agrietamiento).
- Mayor resistencia a la compresión a edades avanzadas y mayor resistencia en general a largo plazo.
- Menor permeabilidad.
- Mayor durabilidad en general frente a ataque de sulfatos y a la reacción expansiva álcali/agregado.
- Mejora la adherencia entre agregados y reduce la porosidad y absorción del concreto.

Las desventajas del uso de puzolanas como componente del cemento incluyen una menor resistencia inicial, un tiempo de curado más largo, incremento en los requerimientos de agua, y problemas derivados del manejo de un material adicional (Rivva, 2000, pág. 32).

#### **2.2.4. Agregados**

Los agregados son elementos inertes con características resistentes que son aglomerados por el gel o pasta de cemento, para formar una estructura sólida.

La denominación de inertes es relativa; los agregados no tienen reacciones químicas directas con el agua o el cemento al momento de producir la pasta, pero sus características físicas y químicas inciden de manera importante en todas las propiedades del cemento y posteriormente en el producto final.

Los agregados componen en promedio las 3/4 partes del concreto, y su calidad es muy importante para alcanzar los objetivos propuestos en el diseño de mezcla. Usualmente están compuestos por partículas minerales de arenisca, granito, cuarzo, basalto o combinaciones de ellos.

Entre sus principales características físicas importantes para el diseño de mezclas destacan el porcentaje de absorción y su resistencia a la abrasión.

Asimismo, una combinación apropiada de arena y piedra logrará una granulometría que proporcionará un masa unitaria máxima, con lo cual el volumen de espacios entre partículas

será mínimo y se requerirá menos pasta para pegar y llenar los vacíos, así se tendrá un concreto con mejores características técnicas y económico (ASOCRETO, 2010, págs. 64, 65).

#### 2.2.4.1. Agregado fino o arena

El agregado fino es el material que resulta de la desintegración natural o artificial de las rocas. La mayoría de autores indican que se considera como agregado fino aquel que logra pasar el tamiz estandarizado de 3/8 de pulgada.

Harmsen (2005, pág. 12) sostiene que el agregado fino debe ser durable, fuerte, limpio, duro y libre de materias impuras como polvo, limo, pizarra, álcalis y materias orgánicas. No debe tener más de 5% de arcilla o limos ni más de 1.5% de materias orgánicas. Sus partículas deben tener un tamaño menor a 1/4" y su gradación debe satisfacer los requisitos propuestos en la norma ASTM C33-99<sup>a</sup>.

**Tabla 2: Requisitos granulométricos del agregado fino.**

<b>Tamiz estándar</b>	<b>% en peso del material que pasa el tamiz</b>
3/8"	100
#4	95 a 100
#8	80 a 100
#16	50 a 85
#30	25 a 60
#50	10 a 30
#100	2 a 10

Fuente: (Harmsen, 2005, pág. 12).

#### 2.2.4.2. Agregado grueso o piedra

Se define como agregado grueso al material que es retenido en el tamiz NTP 4,75 mm (#4) y que cumple con los límites y características establecidos en la Norma ASTM C33-99a (Rivva, 2000, pág. 182).

Igual que el agregado fino, no debe contener más de un 5% de arcillas y finos ni más de 1,5% de materia orgánica, carbón, etc.



El agregado grueso puede ser piedra partida en chancadora o grava zarandeada de los lechos de los ríos o yacimientos naturales. Para concreto ciclópeo se puede emplear piedra de hasta 15 y 20 cm (Harmsen, 2005, pág. 13).

Es recomendable que las partículas tengan un perfil anguloso y una textura rugosa que asegure una buena adherencia con la mezcla.

### **2.2.4.3. Propiedades o características físicas de los agregados**

#### **2.2.4.3.1. Granulometría o gradación**

Granulometría se refiere a la constitución del conglomerado de agregado, fino o grueso o la combinación de ambos, por la distribución del tamaño de partículas que lo conforman.

La gradación del agregado es importante porque define varias características del concreto e influye en su calidad. La granulometría del agregado fino tiene mayor influencia en la mezcla debido a que tiene mayor superficie específica que el agregado grueso.

Lo importante es emplear agregados que mantengan constante su curva granulométrica, a través de los sucesivos despachos de material, evitando con ello cambios sorpresivos o bruscos en el comportamiento de la mezcla.

La granulometría incide en las resistencias mecánicas porque se relaciona con la densidad y compacidad de los agregados componentes del concreto. También incide en la trabajabilidad, que depende además de la forma y textura de los granos (ASOCRETO, 2010, pág. 65).

Sin embargo, Neville & Brooks (2010, pág. 62) afirman que, en efecto, la granulometría es muy importante porque afecta la trabajabilidad del concreto, pero la resistencia es independiente de la gradación del agregado. Además, una resistencia elevada requerirá de la máxima compactación posible con una razonable cantidad de trabajo y una mezcla apropiada.

#### **2.2.4.3.2. Módulo de finura**

El módulo de finura es un índice que sirve para determinar características granulométricas de los agregados. Por lo general se aplica a las arenas, aunque su sustento teórico se extiende a cualquier material granular (ASOCRETO, 2010, pág. 70). Es un índice del mayor o menor grosor del conjunto de partículas de un agregado (Rivva, 2000, pág. 166).

El valor del módulo de finura es mayor cuando las partículas del agregado son gruesas, y decrece cuando las partículas son pequeñas.



El módulo de finura se define como la suma de los porcentajes retenidos acumulados de la serie estándar hasta el tamiz # 100, dicha suma dividida entre 100 (Pasquel, 1998, pág. 91). La serie empleada es 3", 1 ½", 3/4", 3/8", # 4, # 8, # 16, # 30, # 50 y # 100 (Rivva, 2000, pág. 166).

El módulo de finura adecuado de una arena para producir concreto dentro de una granulometría aceptable debe estar entre 2,3 y 3,1, donde un valor menor de 2,0 indica arena fina, 2,5 arena media y más de 3,0 arena gruesa (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2009, pág. 71).

#### 2.2.4.3.3. Humedad o condiciones de saturación

La humedad en los agregados se refiere a la cantidad de agua que existe dentro y fuera de la partícula que conforma el material. La estructura interna de una partícula de agregado, sea fino o grueso, presenta poros o vacíos que pueden ser ocupados por aire o por agua, lo cual depende de las condiciones físicas que caracterizan el ambiente donde se encuentra el elemento.

La humedad en los agregados es un factor importante a tener en cuenta cuando se realiza un diseño de mezclas pues determina la cantidad de agua que será necesaria para producir un concreto.

El contenido de humedad o agua se obtiene de la diferencia del peso del agregado en su estado actual o habitual de humedad y su peso secado en el horno.

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{Peso muestra en condiciones habituales} - \text{Peso muestra seca}}{\text{Peso muestra seca}} \times 100$$

Se puede enumerar cuatro condiciones de saturación:

1. **Seco:** cuando no existe agua dentro de una partícula. Usualmente esta condición se logra en laboratorio y es poco frecuente hallarla en condiciones naturales.
2. **Secado al aire o semiseco:** cuando la partícula no presenta humedad superficial y contiene alguna cantidad de agua en su interior. También se logra esta condición cuando una partícula seca se pone en contacto con el agua durante cierto tiempo que no es suficiente para que los poros internos se saturen por completo.
3. **Saturado superficialmente seco:** cuando no hay presencia de humedad en la superficie de las partículas, pero los vacíos internos se encuentran totalmente ocupados por agua.
4. **Saturado superficialmente húmedo:** cuando hay humedad sobre las partículas y los poros se encuentran totalmente saturados, es decir, cuando en el medio interior y exterior de las partículas hay presencia de agua.



#### 2.2.4.3.4. Porosidad

La porosidad es el volumen de espacios vacíos o poros en la estructura interna de una partícula y es una de las propiedades más importantes porque determina el comportamiento de otras características físicas de los agregados.

La porosidad del agregado tiene influencia sobre la estabilidad química, resistencia a la abrasión, resistencias mecánicas, propiedades elásticas, peso específico, absorción y permeabilidad de las partículas, donde todas estas propiedades tienden a ser menores conforme aumenta la porosidad del agregado (Rivva, 2000, pág. 137).

Los poros saturables son aquellos que están conectados con el exterior, mientras que los no saturables son los que están en el interior de las partículas y no están conectados con la superficie (ASOCRETO, 2010, pág. 78).

#### 2.2.4.3.5. Contenido de vacíos

El contenido de vacíos es un concepto que contempla la masa del agregado como una unidad, donde los vacíos son los espacios no ocupados que existen entre las partículas que conforman el material.

El peso unitario, compacidad y contenido de humedad son las propiedades que dependen directamente del contenido de vacíos de la masa del agregado.

El porcentaje de vacíos es la medida del volumen expresado en porcentaje de los espacios entre las partículas de agregados. Depende también del acomodo entre partículas, por lo que su valor es relativo como en el caso del peso unitario (Pasquel, 1998, pág. 76).

$$\% \text{ vacíos} = \frac{(S \times W) - M}{S \times W} \times 100$$

Donde:

S: peso específico de masa.

W: densidad del agua.

M: peso unitario compactado seco.



#### 2.2.4.3.6. Absorción

Absorción es la capacidad de los agregados de llenar con agua los vacíos al interior de las partículas. El fenómeno se produce por capilaridad y no siempre se llenan por completo los poros porque siempre queda aire atrapado (Pasquel, 1998, pág. 76).

Absorción es la cantidad de agua retenida dentro de los poros o microporos que existen dentro de una partícula sin contemplar el medio exterior de los agregados.

La capacidad de absorción de los agregados es la relación entre el incremento de peso de una muestra secada en el horno y sumergida durante 24 horas y su peso en estado saturado superficialmente seco ( $P_{ss}$ ).

$$\% \text{ absorción} = \frac{P_{ss} - P_{seco}}{P_{seco}}$$

El concepto de absorción está ligado al de porosidad de las partículas que componen el agregado.

#### 2.2.4.3.7. Peso específico

El peso específico, que también se expresa como densidad, es el peso del volumen absoluto de la masa sólida del agregado y resulta de dividir el peso entre el volumen total de las partículas sin tomar en cuenta los espacios vacíos entre ellas. Es una propiedad importante cuando se desea limitar el peso del concreto.

Además, el peso específico es un indicador de calidad, en cuanto que los valores elevados corresponden a materiales de buen comportamiento, mientras que el peso específico bajo generalmente corresponde a agregados absorbentes y débiles, caso en que es recomendable efectuar pruebas adicionales.

Existen tres formas de expresarlo de acuerdo a las condiciones de saturación del agregado:

##### a. Peso específico de masa ( $P_{em}$ )

$$P_{em} = \frac{A}{B - C}$$





Donde:

A: peso en el aire de la muestra secada en el horno.

B: peso en el aire de la muestra saturada superficialmente seca.

C: peso en el agua de la muestra saturada.

**b. Peso específico de masa saturada con superficie seca ( $P_{esss}$ )**

$$P_{esss} = \frac{B}{B - C}$$

**c. Peso específico aparente ( $P_{ea}$ ) o nominal**

$$P_{ea} = \frac{A}{A - C}$$

En el campo de tecnología del concreto, el peso específico aparente es el más importante pues determina la cantidad de agregado requerido para elaborar un volumen unitario de concreto ya que los poros interiores de las partículas de agregado ocuparán un volumen dentro del concreto y porque el agua que existe dentro de los poros saturables no forma parte del agua de mezcla —agua de mezcla es el agua de hidratación del cemento y el agua libre que con el cemento produce la pasta aglutinante y lubricante de los agregados— (ASOCRETO, 2010, pág. 80).

**2.2.4.3.8. Peso unitario**

El peso unitario o peso volumétrico es la relación que existe entre el peso de un material dentro de un recipiente de dimensiones conocidas y el volumen de dicho recipiente.

Resulta de dividir el peso de las partículas que componen el agregado entre el volumen total que ocupan, incluyendo los vacíos. Al considerar los espacios entre partículas se ve influenciado por la manera en que se estas acomodan, lo cual convierte al peso unitario en un parámetro hasta cierto punto relativo (Pasquel, 1998, pág. 74).

$$PA = PT - PM$$



Donde:

PA: peso del agregado, suelto o compactado.

PT: peso total del agregado, suelto o compactado, más el recipiente.

PM: peso del recipiente.

Es un parámetro importante cuando se hace el diseño de mezclas porque permite convertir pesos en volúmenes y viceversa cuando se analiza la influencia de los agregados dentro de la mezcla.

Respecto a su método de ensayo, cuando el agregado se deja caer desde cierta altura y se acomoda por simple efecto de la gravedad en el recipiente se denomina peso unitario suelto; cuando la colocación del material se hace por capas compactadas con ayuda de una varilla metálica se denomina peso unitario compactado (ASOCRETO, 2010, pág. 81).

#### **2.2.4.3.9. Superficie específica**

Superficie específica es el área superficial de una partícula. Sin embargo, se considera superficie específica del agregado a la suma de todas las áreas superficiales de cada partícula que lo conforma.

Conceptualmente, al ser más finas las partículas se incrementa la superficie específica y el agregado necesita más pasta para recubrir el área superficial total; sucede lo contrario si es más grueso (Pasquel, 1998, pág. 94).

La consistencia del concreto disminuye conforme la superficie específica se incrementa. Por tanto, no es posible variar la superficie específica del agregado sin variar la consistencia (Rivva, 2000, pág. 169).

#### **2.2.4.4. Propiedades o características mecánicas o resistentes de los agregados**

##### **2.2.4.4.1. Dureza**

La dureza de un agregado es su resistencia al desgaste por abrasión o erosión y es una propiedad que depende de la constitución mineralógica y química, estructura interna y procedencia de las partículas.

La dureza de los agregados influye decisivamente en la resistencia de los concretos, sobre todo la del agregado grueso. Por eso, se ha establecido un método de ensayo que permite cuantificar



la resistencia a la abrasión del agregado grueso conocido como ensayo de abrasión, que se realiza empleando la máquina de Los Ángeles.

#### **2.2.4.4.2. Resistencia**

Resistencia es la capacidad de asimilar la aplicación de fuerzas externas de compresión, corte, tracción y flexión. La resistencia en compresión está inversamente relacionada con la porosidad y la absorción y directamente con el peso específico (Pasquel, 1998, pág. 78).

Los agregados condicionan el comportamiento resistente del concreto, y es el agregado grueso es el que determina en gran medida la resistencia del concreto, principalmente por el tamaño de sus partículas dentro de la mezcla. Asimismo, la resistencia del concreto no puede ser mayor que la resistencia de sus agregados.

#### **2.2.4.4.3. Tenacidad**

En general, tenacidad es la resistencia al impacto y es un parámetro más cualitativo que cuantitativo.

La tenacidad o resistencia a la falla por impacto depende de la roca de origen e incide mucho en el manejo de los agregados porque si las partículas son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría y además podría afectarse la calidad del concreto que con ellos se elabore (ASOCRETO, 2010, pág. 83).

### **2.2.5. Agua**

El agua es un elemento importante en la preparación de mezclas y en el curado del concreto. De ella depende en gran medida que el concreto alcance la resistencia esperada en el diseño.

En consecuencia, es preciso que el agua empleada esté libre de partículas o elementos que la contaminen. Convencionalmente, se recomienda que el agua de mezcla sea potable; en el caso del agua de curado no hay tanta rigurosidad en cuanto a su pureza, pero es recomendable que esté limpia.

#### **2.2.5.1. Agua de mezcla**

El agua que se emplea para la elaboración de mezclas debe cumplir algunos requisitos que le permitirán una adecuada combinación química sin presentar problemas debido a presencia de sustancias que pueden dañar o alterar el concreto.



En general, se puede emplear como aguas de mezcla las que se consideren potables, o las que por experiencia se conozca que pueden ser utilizadas en la preparación de concreto. El agua de mezcla deberá estar libre de sustancias que la hagan no potable como colorantes, aceites y azúcares. En conclusión, el agua usada para preparar la mezcla no debe contener sustancias que puedan afectar desfavorablemente el proceso de fraguado o la resistencia, durabilidad y apariencia del concreto terminado, o atacar los refuerzos metálicos en el interior de los elementos estructurales.

El agua presente en la mezcla de concreto reacciona químicamente con el material cementante para lograr la formación de gel; y permitir que el conjunto de la masa adquiera las propiedades que en estado no endurecido faciliten una adecuada manipulación y colocación de la misma, y es estado endurecido la conviertan en un producto de las propiedades y características deseadas (Rivva, 2000, pág. 254).

#### **2.2.5.2. Agua de curado**

Se llama agua de curado al agua que se emplea para mantener hidratado al cemento que conforma el concreto durante la etapa final del fraguado y durante los días iniciales de la etapa de endurecimiento. La finalidad del agua de curado es asegurar que los productos del proceso de hidratación de las moléculas de cemento llenen de manera óptima los espacios que inicialmente estaban ocupados por el agua de mezcla dentro del mortero.

Obviamente, el agua que cumple los requisitos para ser agua de mezcla también puede ser usada como agua de curado.

Algunas veces la cristalinidad no es importante y cualquier agua, incluso alguna de calidad ligeramente inferior a la de mezcla es aceptable para el curado, aunque de todos modos es esencial que esté libre de sustancias que puedan atacar al concreto (Neville & Brooks, 2010, pág. 75).

En la evaluación de las impurezas que contienen las aguas de curado se deben tener las siguientes dos consideraciones (ASOCRETO, 2010, pág. 49):

- Que no manchen la superficie del concreto.
- Que no ataquen ni deterioren el concreto.

## 2.2.6. Escoria de cobre

### 2.2.6.1. Definición de escoria de cobre

Se define por escoria a aquella fase de características vítreas que contiene las sustancias inútiles de un mineral resultantes de cualquier proceso metalúrgico que involucre fundiciones. Las escorias de cobre son un desecho industrial producto de los procesos pirometalúrgicos de producción del cobre.

Elías (2009, pág. 477) sostiene que la producción de cobre implica que por 1 kg de metal se generen aproximadamente 650 kg de residuos potencialmente peligrosos.

- |  |               |
|--|---------------|
| - Relaves (50% polvo fino + 50% agua)    | 80,0 t/t Cu.  |
| - Escoria de fundición                   | 1,8 t/t Cu.   |
| - Ripios, lodos de proceso y lixiviación | 190,0 t/t Cu. |
| - Estéril de mina                        | 377,0 t/t Cu. |

Generalmente, las escorias de cobre son óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y sílice ( $\text{SiO}_2$ ); existen otros elementos que no superan el 20%, por lo que no se toman en cuenta. Por su parte, las impurezas ejercen un papel negativo en sus propiedades, como su conductividad eléctrica, térmica, su color, su dureza y demás; las cuales se pueden clasificar en tres grupos: impurezas de fácil eliminado (Zn, Fe, O y S), impurezas que se eliminan parcialmente (As, Sb, Bi y Ni), e impurezas que no se eliminan (Au, Ag) (Lovera, Arias, & Coronado, 2004, pág. 26).



Fuente: Propia.

**Figura 1: Escoria de fundición de cobre.**



En los procesos pirometalúrgicos, se diseñan escorias mediante la adición de fundentes al metal fundido, para la refinación del metal (Oyarzun, 2013, pág. 15).

Durante el proceso de refinación del cobre se emplean escorias fayolíticas compuestas por silicatos de hierro ( $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ ). Los componentes de la escoria disminuyen el punto de fusión del cobre ( $1200^\circ\text{C}$ ), lo cual es ventajoso para el proceso de refinación (López, 2008, pág. 1).

### **2.2.6.2. Fundamento pirometalúrgico de obtención del cobre**

El proceso de obtención del cobre comprende la fusión de concentrados en bruto fundidos a temperaturas de entre  $1150^\circ\text{C}$  a  $1250^\circ\text{C}$ , a partir de lo cual se producen dos fases líquidas inmiscibles: escoria (óxido) y eje o mata rica en cobre (sulfuro) (Comisión Chilena del Cobre, 2004, pág. 208)

La inclusión de sílice, aparte del que se incluye en estado natural con la materia prima, en el proceso de fundición tiene como propósito conglomerar en una masa de textura vítrea los residuos separados del cobre.

La escoria de cobre tiene una composición física y química que depende de la materia prima y de la tecnología de fundición empleada. Cuando el enfriamiento de la escoria es rápido, su estructura colapsa y su textura es vítrea y amorfa (Elías, 2009).

Una carga primigenia de fusión está constituida por los sulfuros y óxidos de hierro y de cobre. Dicha carga contiene, además, otros óxidos como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  y sobre todo  $\text{SiO}_2$ , que puede estar contenido en el concentrado inicial, pero que puede ser agregado como fundente (Comisión Chilena del Cobre, 2004, pág. 209).

### **2.2.6.3. Composición química de la escoria de cobre**

De manera más precisa, se puede decir que la escoria es una solución de óxidos fundidos como el  $\text{FeO}$  de la oxidación de  $\text{Fe}$ ,  $\text{SiO}_2$  del flujo y óxido de impurezas del concentrado. Comúnmente se encuentran el óxido ferroso ( $\text{FeO}$ ), óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), cal ( $\text{CaO}$ ) y magnesia ( $\text{MgO}$ ) (Davenport, King, Schlesinger, & Biswas, 2002, pág. 59).

La Tabla 3 y la Tabla 4 muestran la composición química de la escoria de cobre por las concentraciones por peso y por la presencia en porcentajes de sustancias o compuestos que la constituyen.

**Tabla 3: Composición química de las escorias de cobre por peso de elementos.**

Elemento	Composición (gr/t)
SiO <sub>2</sub>	27-30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-4,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40-50
CaO	0-1,8
MgO	0,2-0,8
S	0,2-0,5
Pb	0,08-20
Zn	0,7-1,5
Ni	20-50
Cd	30-160
Bi	90-150
Se	10-50
Cl	≤ 30
Sílica libre	No contiene

Fuente: (Biswas &amp; Davenport, 1993)

**Tabla 4: Composición química de las escorias de cobre por porcentajes.**

Tipo de óxido	Formulación	Porcentaje (%)
Óxido de hierro	FeO, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	30-40
Óxido de silicio	SiO <sub>2</sub>	25-40
Óxido de aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hasta 10
Óxido de calcio	CaO	Hasta 10

Fuente: (Biswas &amp; Davenport, 1993)

#### 2.2.6.4. Clasificación de la escoria de cobre

Existen dos tipos de escoria de cobre: las enfriadas al aire tienen color negro, textura vítrea y baja capacidad de absorción de agua; y las escorias fundidas enfriadas en agua con perfiles amorfos, granulados y alta capacidad de absorción (Onuaguluchi, 2012, págs. 11-12).

Por su proceso de obtención, las escorias en general, entre ellas la de cobre, se clasifican en:

- **Escorias de vertedero**, cuya obtención se realiza por el enfriamiento lento en los vertederos de acumulación.
- **Escorias granalladas o granuladas**, que se obtienen a través de la aceleración de su proceso de enfriamiento con agua.
- **Escorias de flotación**, que se obtienen mediante un proceso de flotación de escorias con contenido remanente de cobre de un anterior proceso.





### **2.2.6.5. La escoria de cobre en el medio local**

La escoria de fundición de cobre, al igual que otros tipos de escorias, proviene de los procesos de extracción de materia prima y fundición pirometalúrgica. Así, las empresas mineras y metalúrgicas dedicadas a la producción de cobre producen grandes cantidades de escoria que son dispuestas de la manera que cada factoría ve por conveniente.

En la actualidad, alrededor del 90% de la escoria de cobre que se genera en el Perú es comprada por China y sacada del país por los principales puertos, de acuerdo a reportes de las empresas mineras. Sin embargo, el 10% restante, que referido a toneladas es una cantidad bastante grande, es comercializado por empresas que venden la escoria en cantidades pequeñas para usos diversos.

Uno de los usos más frecuentes es su empleo mediante chorro a presión para arenar vidrios en usos domésticos. También suele usarse para pulir y limpiar metales.

En las últimas décadas se ha estado empleando algunos tipos de escoria en la fabricación de cementos y se ha investigado su comportamiento como agregado en pavimentos y como componente del concreto.

### **2.2.7. Curado del concreto**

El curado es un factor importante para lograr que la mezcla endurecida alcance una resistencia aceptable con el transcurrir del tiempo, lo cual se consigue compensando la pérdida de humedad debida al calor de hidratación, evaporación superficial y condiciones ambientales, manteniendo el concreto en un ambiente húmedo que asegure una apropiada reacción del cemento con el agua.

El objetivo principal del curado es mantener el concreto saturado, o lo más próximo posible a la saturación, hasta que los espacios que inicialmente estaban saturados de agua se llenen hasta un nivel deseado con los productos de la hidratación del cemento (ASOCRETO, 2010, pág. 49).

Rivva (2000, pág. 12) define al curado como el período durante el cual el concreto es mantenido en condiciones de humedad y temperatura tales como para lograr la hidratación del cemento en la magnitud que se desea para alcanzar la resistencia seleccionada.

Con un curado adecuado también se mejoran las resistencias mecánicas, se logra impermeabilidad, se incrementa la resistencia al desgaste y la abrasión y se alcanza mayor durabilidad (Porrero et al., 2009, pág. 219).



Abanto (1996, pág. 235) sostiene que para evitar riesgos, el concreto debe protegerse de las pérdidas de humedad al menos durante siete días, donde el concreto alcanza el 70% de su resistencia, y, en trabajos más delicados, hasta catorce días. Sin embargo, por lo general lo anterior no puede realizarse en la práctica debido al tamaño de los elementos de concreto o por las condiciones propias de la obra.

El agua que se utiliza en la mezcla, generalmente, es apta para el curado, sin embargo, la causa más común de las manchas en las superficies del concreto es por la presencia de una alta concentración relativa de hierro o materias orgánicas. Asimismo, bajas concentraciones de estas impurezas pueden causar manchas si el agua fluye lentamente sobre el concreto y se evapora. No existe ningún método práctico y confiable que relacione las posibilidades de manchas con los contenidos de impurezas orgánicas o de hierro contenido en el agua.

La temperatura es un factor muy importante ya que su aumento durante el curado acelera las reacciones químicas de la hidratación, lo cual afecta en forma benéfica la resistencia a edades tempranas del concreto, pero con consecuencias adversas en la resistencia posterior (ASOCRETO, 2010, pág. 124). Asimismo, es importante tomar en cuenta los efectos del viento y la radiación solar en la evaporación del agua de mezcla.

### 2.2.7.1. Métodos de curado

#### 2.2.7.1.1. Curado por contacto con agua

Se refiere a que los elementos de concreto se ponen en contacto directo con el agua mediante diversos métodos. Los más empleados son:

- **Curado por inmersión o anegamiento:** es la forma más común cuando se trata de especímenes de ensayo. La mayoría de veces no se puede efectuar por las dimensiones e imposibilidad de mover un elemento de concreto.
- **Curado por aspersion o rociado:** es la forma más fácil de humedecer un elemento de concreto, sobre todo en obra, empleando mangueras o recipientes.
- **Curado por contacto con materiales húmedos o que retienen humedad:** recurre al uso de telas o textiles, tierra común, arena, aserrín o paja y pastos que, al ser colocados en contacto con la superficie del concreto, proveen de humedad durante cierto tiempo. Es importante cuidar que los materiales empleados estén exentos de sustancias que pueden atacar al concreto.



### 2.2.7.1.2. Curado por confinamiento o aislamiento

Son métodos que no requieren la utilización de agua y que consisten en aislar el concreto mediante diferentes materiales con la finalidad de evitar la pérdida de humedad, sobre todo por evaporación. Lo más comunes son:

- **Curado por aislamiento con materiales impermeables:** se realiza a través de la colocación de láminas de plástico o papeles impermeables alrededor del concreto, con la finalidad de evitar la pérdida de humedad por evaporación por efecto de la variación de temperatura.
- **Curado por fluidos que forman membranas aislantes:** consiste en cubrir completamente los elementos de concreto con materiales resistentes a la solubilidad en agua, como ceras, parafina o materiales bituminosos y químicos que no afecten la calidad del concreto.

### 2.2.8. Ensayo de compresión axial del concreto

Por lo general, toda estructura es concebida bajo la suposición de que el concreto solamente puede resistir esfuerzos de compresión, por efectos propios o externos; debido a ello, el ensayo de resistencia a la compresión es la prueba de calidad estándar que permite determinar si un concreto es bueno o no.

El concreto simple es resistente a la compresión, pero es débil en tensión, lo cual es un limitante de su capacidad como elemento estructural; para lograr un comportamiento efectivo, se colocan refuerzos de acero embebidos en el concreto. La resistencia a la compresión es un parámetro importante porque permite entender la relación acción-respuesta de un espécimen bajo distintas condiciones, lo cual puede interpretarse mediante una curva esfuerzo-deformación (González & Robles, 2005, pág. 32).

Harmsen (2005, pág. 21) describe la prueba de resistencia a la compresión del concreto como un parámetro que es obtenido a través del ensayo de un cilindro estándar de 6" (15 cm) de diámetro y 12" (30 cm) de altura. El espécimen debe permanecer en el molde 24 horas después del vaciado y posteriormente debe ser curado bajo agua hasta el momento del ensayo. El procedimiento estándar requiere que la probeta tenga 28 días de vida para ser ensayada, sin embargo, este período puede alterarse si se requieren análisis específicos. Durante la prueba, el cilindro es cargado a un ritmo uniforme de  $2,45 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$ . La resistencia a la compresión,  $f'_c$ , se define como el promedio de la resistencia de, como mínimo, dos probetas tomadas de la



misma muestra probadas a los 28 días. El procedimiento se describe en detalle en las normas ASTM C192M-95 y C39-96.

La resistencia a la compresión obtenida de tales ensayos se conoce como resistencia del cilindro  $f'_c$  y es la principal propiedad especificada para propósitos de diseño (Nilson, 1999, pág. 34).

### 2.2.8.1. Esfuerzo

Teóricamente, el esfuerzo es la acción de una fuerza aplicada por unidad de área, cuyas unidades SI son  $\text{N/m}^2$ .

$$\text{esfuerzo} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}} = \frac{F}{A}$$

El esfuerzo ingenieril —o esfuerzo nominal— se define como la relación de la carga aplicada ( $P$ ) al área transversal original ( $A_0$ ) del espécimen, expresado comúnmente para análisis en  $\text{kg/cm}^2$  (Kalpakjian & Schmid, 2008, pág. 65).

$$\text{esfuerzo ingenieril, } \sigma = \frac{P}{A_0}$$

Ante un esfuerzo de compresión, el material se comprime y las fuerzas actúan hacia dentro del objeto.

### 2.2.8.2. Deformación

Teóricamente, la deformación se define como la relación entre el cambio de longitud y la longitud original; es adimensional. Es una medida de cuánto se ha deformado un objeto (Giancoli, 2006, pág. 239).

$$\text{deformación} = \frac{\text{cambio en longitud}}{\text{longitud original}} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Asimismo, la deformación ingenieril se define como el cociente de la diferencia de la longitud instantánea del espécimen ( $l$ ) menos la longitud inicial ( $l_0$ ) entre la longitud inicial (Kalpakjian & Schmid, 2008, pág. 67).

$$\text{deformación ingenieril, } e = \frac{(l - l_0)}{l_0}$$

El esfuerzo se aplica al material por agentes externos, mientras que la deformación es la respuesta del material al esfuerzo (Giancoli, 2006, pág. 239).

Cuando la carga se incrementa, el espécimen empieza a sufrir una deformación permanente o plástica luego de cierto nivel de esfuerzo, donde el esfuerzo y la deformación ya no son proporcionales, como lo eran en la región elástica. Ese esfuerzo se conoce como esfuerzo de fluencia ( $Y$ ) del material (Kalpakjian & Schmid, 2008, pág. 67).

En la región elástica, la deformación es directamente proporcional al esfuerzo, lo cual se conoce como módulo de elasticidad ( $E$ ) o módulo de Young.

$$\text{módulo de elasticidad, } E = \frac{\sigma}{e}$$

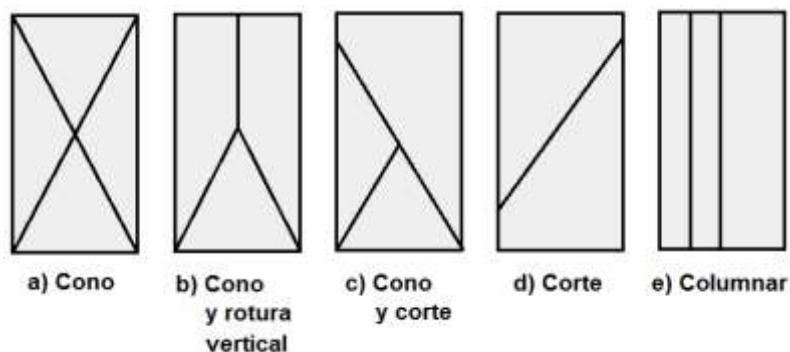
### 2.2.8.3. Falla de especímenes de concreto

Al llegar al esfuerzo último que puede tolerar, el elemento de concreto colapsa. Ese colapso es conocido como falla o fractura y se han establecido algunos patrones referenciales de comparación, para analizar de manera visual el comportamiento de algún concreto.

Existen patrones de comparación que permiten determinar el tipo de falla que presenta una probeta de concreto cuando es sometida a compresión. Esta investigación adoptó como referencia el patrón de fallas mostrado en la figura siguiente.

En probetas cuya relación de esbeltez ( $h/D$ ) es 2 la falla se manifiesta según planos inclinados con respecto a la dirección de la carga, porque la fricción que se genera entre el espécimen y los platos de carga restringe los movimientos laterales (ASOCRETO, 2010, pág. 127).

Usualmente, las fallas se presentan en forma de cono o combinaciones de esta con otros tipos de colapso. En la Figura 2 se presentan los tipos de falla más comunes; algunos son menos frecuentes que otros, pero mucho depende de la calidad del concreto que se pone a prueba.



Fuente: (ASOCRETO, 2010, pág. 128).

**Figura 2: Tipos de falla de las probetas de concreto.**

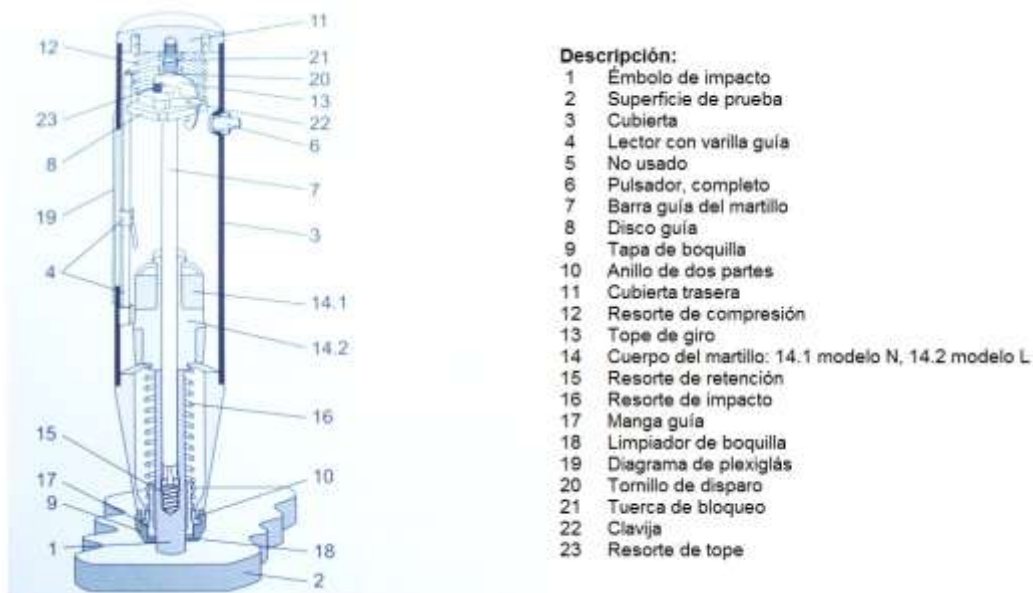
### 2.2.9. Ensayo de índice de rebote con esclerómetro del concreto

El ensayo de índice de rebote, también conocido prueba de esclerometría, es un ensayo no destructivo que permite estimar la resistencia a la compresión del concreto. La metodología de aplicación se describe en ASTM C805 y en NTP 339.181.

Los resultados de la prueba de esclerometría son medidas aproximadas de la resistencia a la compresión susceptibles a cierta dispersión, porque dependen de factores como la energía almacenada en el resorte, velocidad de aplicación del instrumento, ángulo de aplicación del instrumento sobre la superficie, dimensiones de la masa.

El ensayo de índice de rebote del concreto se realiza con la ayuda de un aparato de llamado esclerómetro, martillo de impacto o martillo de Schmidt, inventado en 1948 por el físico e ingeniero suizo Ernest Schmidt, el cual es un instrumento que sirve para medir la dureza de los cuerpos —su nombre proviene del griego *skleros*, que significa dureza—.

El esclerómetro es capaz de registrar el rebote de cierta masa que impacta sobre la superficie del concreto. Al producirse el impacto, parte de la energía cinética que trae la masa se convierte en deformación de la superficie de concreto; el remanente es lo que da lugar al rebote, por lo que es evidente que, a mayor rebote mayor dureza superficial y, presumiblemente, mayor resistencia del concreto (Porrero et al., 2009, pág. 363).



Fuente: (Proceq S.A., 2013, pág. 18).

**Figura 3: Partes del esclerómetro analógico.**



No obstante la comodidad para realizar el ensayo *in situ*, aspectos como la edad del concreto, humedad en la superficie y avance del frente de carbonatación inciden en los resultados. La forma y tamaño de los especímenes también influyen, así como aspectos más generales como el operador del aparato y la correcta ubicación de los puntos de prueba.

Asimismo, se debe tener cuidado durante la obtención de resultados, porque usualmente se tienen lecturas muy bajas o elevadas respecto a una dispersión de amplitud relativamente estrecha. Por ejemplo, puede que el punto de aplicación coincida con el lugar donde hay un poro o vacío interior, o donde hay una partícula dura o piedra dentro del concreto, lo cual daría lugar a lecturas poco coherentes con el resto de resultados.

El ensayo de índice de rebote no siempre puede ser relacionado con la resistencia del concreto. Para ello se requeriría una minuciosa calibración por correlación contra el concreto que se desea evaluar (Porrero et al., 2009, pág. 365).

Según la NTP 339.181, el uso de este método para estimar la resistencia requiere del establecimiento de una correlación entre el esfuerzo y el número de rebote. La correlación se establecerá para una mezcla de concreto dada y un aparato dado, sobre el rango de resistencias del concreto que sea de interés. Para estimar la resistencia durante la construcción, establecer la correlación realizando ensayos de número de rebote en probetas de concreto versus la resistencia última de las mismas probetas o de probetas compañeras.

Este estudio realizó la correlación entre los resultados del ensayo de esclerometría y los resultados de resistencia del concreto mediante compresión axial de probetas, lo cual se explica detalladamente en los apartados 3.6.11., 3.6.12., 3.6.13. y 3.6.14.

En cuanto a la **metodología de ensayo**, la NTP 339.181 indica que se debe descartar los datos que difieran del promedio de las 10 lecturas por encima o por debajo de 6 unidades. Se determina un nuevo promedio y si hay más de dos lecturas que difieren del promedio en 6 unidades, se desechan todos los datos y se deberá determinar los números de rebote en 10 nuevas ubicaciones dentro del área de ensayo.

#### **2.2.10. Consistencia del concreto**

La consistencia está definida, en términos simples, como el nivel de humedecimiento de la mezcla, que depende principalmente de la cantidad de agua usada (Abanto, 1996, pág. 47).





Consistencia es el grado de deformabilidad del concreto fresco y se mide con ayuda de un instrumento denominado cono de Abrams —nombre de su inventor— y una mesa de sacudidas o con una barra de penetración, que es el método más apropiado para ser realizado en campo.

También se refiere al estado de fluidez, es decir, qué tan dura (seca) o blanda (fluida) es una mezcla de concreto fresco cuando se encuentra en estado plástico, por lo cual se dice que es el grado de humedad de la mezcla (Sánchez, 2001, pág. 111).

#### **2.2.10.1. Ensayo de asentamiento del concreto**

La consistencia del concreto fresco se determina en función del asentamiento de la mezcla. El molde necesario para realizar la prueba de asentamiento de la mezcla es conocido comúnmente como cono de Abrams.

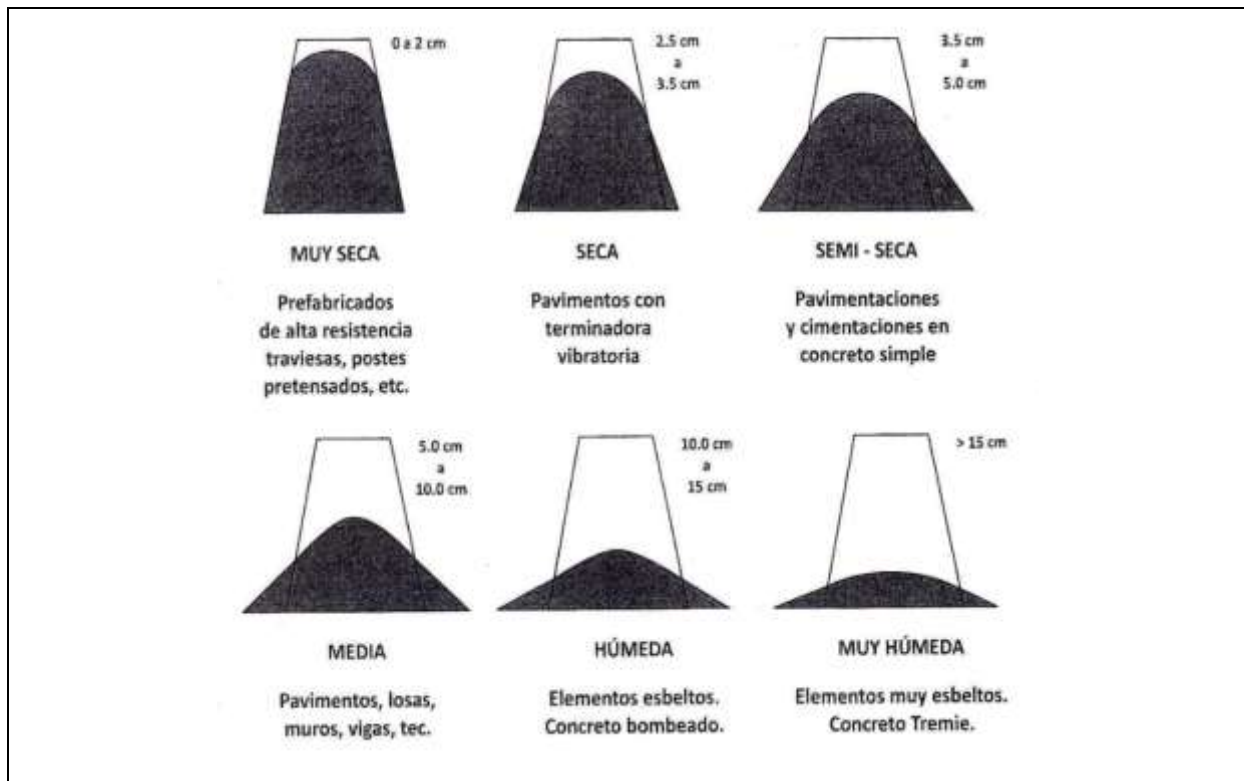
El asentamiento, conocido también como *slump test*, es una forma de medir la cantidad de agua que existe en la mezcla y ayuda a determinar, en cierta forma, la trabajabilidad del material cuando se encuentra en estado plástico.

Nilson (1999, págs. 31, 32) indica que el ensayo de asentamiento consiste en emplear un molde metálico con la forma de un cono truncado de 12 pulgadas (30 cm) de altura donde se introduce concreto fresco. Cuando se llena, se levanta el molde cuidadosamente y el asentamiento de la mezcla se mide como la diferencia de altura entre el molde y la pila de concreto. Los concretos utilizados en la construcción de edificios tienen asentamientos que varían generalmente entre 2 pulgadas y 6 pulgadas.

Si se toma en cuenta las dimensiones del cono de Abrams y se mide el descenso experimentado, se obtiene una valoración cuantitativa de la plasticidad de la masa en términos del asiento registrado. Dado que la tosquedad del ensayo, así como su dudosa reproducibilidad, invalida la precisión del milímetro y obliga a la admisión de una tolerancia de  $\pm 1$  cm, se definen como grados de consistencia los determinados por los siguientes asientos (Páez, 1986, pág. 153):

- Consistencia seca, cuando el asiento es inferior a 2 cm.
- Consistencia plástica, cuando el asiento está entre 3 y 5 cm.
- Consistencia blanda, cuando el asiento está entre 6 y 9 cm.
- Consistencia fluida, cuando el asiento está entre 10 y 15 cm.
- Consistencia líquida, cuando el asiento es superior a 16 cm.

Otros autores clasifican al concreto fresco relacionando el asentamiento y la consistencia con el uso que se dé a la mezcla.



Fuente: (ASOCRETO, 2010, pág. 105).

**Figura 4: Clasificación del concreto según su consistencia.**

### 2.2.11. Carbonatación del concreto

La carbonatación es un fenómeno donde se produce carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$  o piedra caliza) cuando el hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) que se encuentra en la pasta o gel reacciona con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en presencia de agua, con lo cual se produce pérdida de volumen en el concreto.

Por lo general, durante su desarrollo la carbonatación genera micro fisuras por donde ingresa  $\text{CO}_2$ ; a medida que la carbonatación avanza, más  $\text{CO}_2$  ingresa por las fisuras y se producen nuevas micro fisuras más profundas que hacen que el frente de carbonatación avance y podría alcanzar al acero de refuerzo en elementos de concreto armado.

La carbonatación se presenta en la superficie del concreto y su profundidad dependerá de la porosidad de la pasta. Esta reacción conduce al descascaramiento superficial (ASOCRETO, 2010, pág. 140).



El proceso de carbonatación produce una disminución del pH alcalino del concreto (de 12 a 14) en las soluciones de los poros, por lo cual el estado de pasivación del acero de refuerzo ya no puede mantenerse. La carbonatación consiste en un deterioro superficial del concreto que no llega a afectar toda la masa, pero tiene mucha importancia (Porrero et al., 2009, pág. 405).

El fenómeno de carbonatación influye mucho en el ensayo de esclerometría porque el carbonato de calcio que se formó y llenó los vacíos adyacentes a la capa exterior otorga al concreto mayor dureza en la superficie, lo cual puede llevar a mediciones erróneas de la resistencia y por eso los rangos de dispersión son elevados.

En el ítem 3.6.16.4. hay más detalles acerca de la carbonatación del concreto y la metodología de su verificación.

### **2.2.12. pH del concreto**

El pH es el potencial de hidrógeno, o potencial de hidrogeniones, que se refiere a la concentración de iones de hidrógeno que están presentes en determinadas sustancias. El pH es la medida de la alcalinidad, neutralidad o acidez de una solución.

El pH es sumamente importante, sobre todo cuando se habla de concreto armado. El concreto es altamente básico y su pH varía entre 12 y 13, aunque usualmente se considera que es 12,5. En esas condiciones el concreto crea un medio o fase que asegura la protección del acero de refuerzo contra la corrosión.

Una capa de óxido pasivo se forma sobre la superficie del acero de refuerzo, la cual permanece estable en el ambiente altamente alcalino. Cuando el pH disminuye, la capa pasiva deja de ser estable y cuando está por debajo de 9,5, empieza el fenómeno de corrosión, donde una de las consecuencias es la aparición de agrietamientos en el concreto (Valdez & Schorr, 2013, pág. 218).

### **2.2.13. Diseño de mezclas**

Diseño de mezclas se refiere al proceso por el cual se calculan las cantidades apropiadas de cada uno de los componentes del concreto (cemento, agregados, agua y, de ser el caso, aditivos), con la finalidad de obtener un material con ciertas características previamente definidas.



El objetivo principal del diseño de mezclas es establecer una combinación económica de materiales para lograr un concreto que satisfaga determinados requerimientos técnicos en estado fresco como en estado endurecido, para lo cual es necesario conocer las características individuales de sus componentes y los fenómenos de interacción entre ellos.

Las principales exigencias que se deben cumplir para lograr una dosificación apropiada en estado fresco son las de maleabilidad y economía, y para concreto endurecido son las de resistencia, durabilidad, acabado y a veces el peso volumétrico (ASOCRETO, 2010, pág. 183).

### **2.2.13.1. Datos necesarios para el diseño de mezclas**

#### **2.2.13.1.1. Datos de la obra**

El paso previo a un diseño de mezclas es revisar detalles generales y técnicos sobre la obra o estructura que se va a construir. Los datos de obra que se deben conocer son:

- Tipo de obra.
- Condiciones y uso a que estará expuesta la estructura.
- Ubicación de la obra, para determinar sus condiciones ambientales, zona sísmica y distancia, en caso tenga que evaluarse distancias de transporte de materiales.
- Revisión de aspectos técnicos: planos y memorias de cálculo.

#### **2.2.13.1.2. Datos de los materiales**

Cuando se han revisado los aspectos generales de la obra, se procede a la selección de los materiales más apropiados para la fabricación del concreto. Es imprescindible conocer los siguientes datos de los materiales componentes de la mezcla:

- Granulometría de los agregados.
- Módulo de finura del agregado fino.
- Tamaño máximo y tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- Peso específico del cemento que se utilizará.
- Peso específico de los agregados.
- Capacidad de absorción de los agregados.
- Peso unitario suelto y peso unitario compactado de los agregados.
- Contenido de humedad de los agregados en las condiciones en las cuales se fabrica la mezcla.



### 2.2.13.2. Métodos de diseño de mezclas

Pasquel (1998, págs. 185-203) menciona los siguientes métodos para el diseño de mezclas:

- Método tradicional ACI 211.
- Métodos basados en curvas teóricas.
- Métodos basados en curvas empíricas.
- Método del módulo de finura total.

La metodología del diseño de mezclas según el comité 211 del ACI (American Concrete Institute) se explica secuencial y detalladamente en el apartado 3.6.7., la cual propone una dosificación típica por el método de volúmenes absolutos y asume que el concreto está expuesto al ataque de agentes externos (sin aire incorporado) y no se incluye el uso de aditivos.

## 2.3. Hipótesis

### 2.3.1. Hipótesis general

La resistencia a la compresión y la consistencia de un concreto  $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$  elaborado con cementos tipo IP y tipo V, mediante pruebas de índice de rebote y compresión axial de testigos sometidos a curado por inmersión, mejorará con la sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporción de peso, comparado con un concreto patrón.

### 2.3.2. Sub hipótesis

#### Sub hipótesis N° 1

Se optimizará la resistencia a compresión del concreto con la sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones porcentuales de peso.

#### Sub hipótesis N° 2

La resistencia del concreto con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso se incrementará a los 7, 14 y 28 días del curado por inmersión.

#### Sub hipótesis N° 3

La consistencia del concreto, en términos del asentamiento, con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporción de peso será superior a la del concreto patrón con  $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ .



#### **Sub hipótesis N° 4**

A mayor porcentaje en peso de la escoria de cobre respecto al peso del agregado fino que se sustituirá en el concreto, se logrará una mayor resistencia a la compresión.

#### **Sub hipótesis N° 5**

Un concreto con resistencia a la compresión óptima, superior a un concreto patrón  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup>, se obtendrá con un porcentaje de sustitución de agregado fino por escoria de cobre de menos del 30%.

### **2.4. Definición de variables**

#### **2.4.1. Variables independientes**

##### **Concreto con sustitución de agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso**

Es el concreto fabricado para esta investigación, donde se fue reemplazando de manera progresiva el agregado fino por escoria de cobre en proporciones porcentuales de peso, para analizar posteriormente su influencia en las propiedades resistentes y consistentes del concreto.

##### **Indicadores:**

- Cantidad de cemento Portland tipo IP en peso (kg).
- Cantidad de cemento Portland tipo V en peso (kg).
- Cantidad de agregado fino en peso (kg).
- Cantidad de agregado grueso en peso (kg).
- Cantidad de agua en volumen (litros).
- Cantidad de escoria de cobre en peso (kg).

#### **2.4.2. Variables dependientes**

##### **Propiedades resistentes del concreto endurecido**

Se trata del análisis de la incidencia de la sustitución del agregado fino por escoria de cobre sobre la resistencia del concreto endurecido.



**Indicador:**

– Resistencia a la compresión ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), que depende de la fuerza ( $\text{kg-f}$ ) y del área ( $\text{cm}^2$ ).

**Propiedades consistentes del concreto fresco**

Se refiere al análisis de la consistencia del concreto fresco con la sustitución del agregado fino por escoria de cobre.

**Indicador:**

– Consistencia del concreto fresco, determinada por el asentamiento expresado en pulgadas.



2.4.3. Cuadro de operacionalización de variables

TIPO	VARIABLE	NIVEL	INDICADOR	INSTRUMENTO
<b>Independiente</b>  X1	Concreto con sustitución de agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso.	Cemento.	– Cantidad de cemento Portland tipo IP (kg).	– Guías de observación de laboratorio.  – Formatos de evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del agregado.  – Formatos de evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la escoria de cobre.
		Agregado fino.	– Cantidad de cemento Portland tipo V (kg).	
		Agregado grueso.	– Cantidad de agregado fino (kg).	
		Agua.	– Cantidad de agregado grueso (kg).	
		Escoria de fundición de cobre.	– Cantidad de agua (litros).	
<b>Dependiente</b>  Y1	Propiedades resistentes del concreto endurecido.	Resistencia a los 7 días.	Resistencia a la compresión del concreto (kg/cm <sup>2</sup> ).	– Guías de observación de laboratorio. – Formatos de evaluación de resistencia a la compresión.
		Resistencia a los 14 días.		
		Resistencia a los 28 días.		
	Y2	Propiedades de consistencia del concreto fresco.	Asentamiento o <i>slump</i> .	Asentamiento del concreto fresco (altura en pulgadas).

Fuente: Propia.





## Capítulo III: Metodología

### 3.1. Metodología de la investigación

#### 3.1.1. Tipo de investigación

Por su enfoque, este trabajo de tesis es de tipo cuantitativo debido a que cuantifica un fenómeno para demostrar una hipótesis mediante valores numéricos asociados de la consistencia en función del asentamiento, y de la resistencia a la compresión del concreto medidos mediante pruebas de índice de rebote y compresión axial.

#### 3.1.2. Nivel de la investigación

El nivel de este trabajo de investigación es correlacional, porque se quiere demostrar el grado de relación entre el uso de escoria de cobre y la variación de la consistencia y de la resistencia a la compresión del concreto (Hernández, Fernández, & Baptista, 2006, pág. 104).

#### 3.1.3. Método de la investigación

Este estudio emplea el método hipotético-deductivo porque está planteando una hipótesis, la cual se demuestra o descarta en base a procesos deductivos relacionados con las variables, indicadores y objetivos.

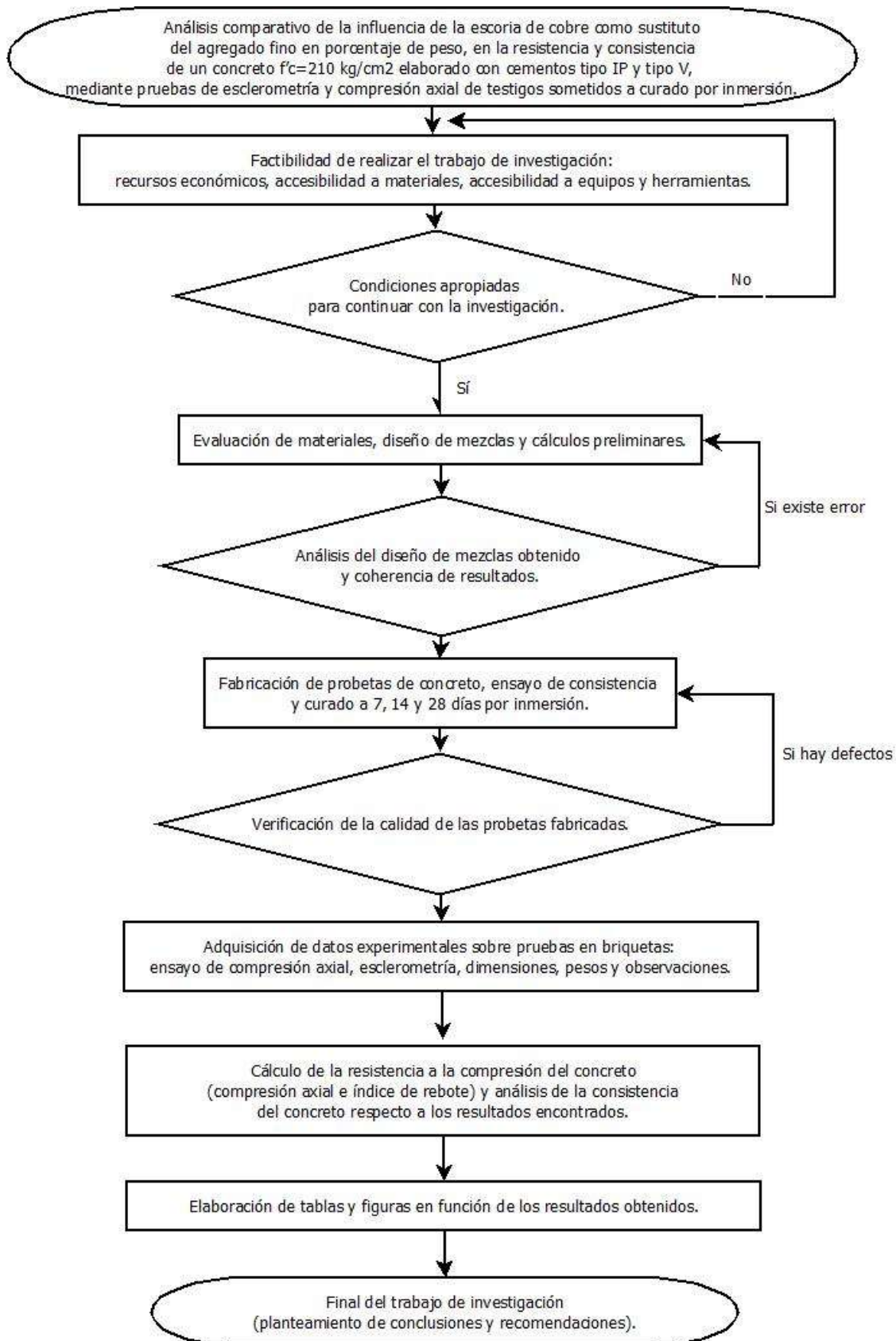
### 3.2. Diseño de la investigación

#### 3.2.1. Diseño metodológico

Esta investigación emplea un diseño experimental, porque se desea conocer los efectos de la incorporación de escoria de cobre, en diferentes proporciones respecto al peso del agregado fino, sobre la resistencia y la consistencia del concreto fabricado con cementos tipo IP y tipo V.

Los valores de resistencia a la compresión hallados mediante pruebas de compresión axial e índice de rebote, así como las cantidades halladas para la consistencia mediante el cono de Abrams, son cotejados respecto a una muestra patrón de cemento sin escoria de cobre.

### 3.2.2. Diseño de ingeniería



Fuente: Propia.



### **3.3. Población y muestra**

#### **3.3.1. Población**

##### **3.3.1.1. Descripción de la población**

Esta investigación considera como población todas las probetas cilíndricas elaboradas con cementos tipo IP y tipo V con incorporación de escoria de cobre en sustitución de agregado fino en proporciones de peso, elaboradas en la provincia de Cusco.

##### **3.3.1.2. Cuantificación de la población**

La población en esta investigación son las 360 probetas cilíndricas elaboradas con cementos tipo IP y tipo V con incorporación de escoria de cobre en sustitución de agregado fino en proporciones de peso, elaboradas en la provincia de Cusco.

#### **3.3.2. Muestra**

##### **3.3.2.1. Descripción de la muestra**

Se considera como muestra para esta investigación todas las probetas cilíndricas elaboradas con cementos tipo IP y tipo V con incorporación de escoria de cobre en sustitución de agregado fino en proporciones de peso, elaboradas en la provincia de Cusco.

##### **3.3.2.2. Cuantificación de la muestra**

La muestra para este trabajo de investigación son todas las probetas cilíndricas elaboradas con cementos tipo IP y tipo V con incorporación de escoria de cobre en sustitución de agregado fino en proporciones de peso, elaboradas en la provincia de Cusco. En el caso de esta tesis, se considera como muestra las 360 briquetas fabricadas, ya que el número de especímenes es mayor que 50 (Castro, 2003, pág. 69) y la población es finita.

##### **3.3.2.3. Método de muestreo**

Esta investigación emplea un método de muestreo no probabilístico, ya que se conoce plenamente la cantidad de elementos que constituyen la muestra (Hernández et al, 2006, pág. 262).



Asimismo, luego de identificar plenamente a los especímenes objeto de estudio, no se requieren métodos estadísticos o probabilísticos para determinar el número de muestras.

#### **3.3.2.4. Criterios de evaluación de muestra**

La muestra del trabajo de investigación se evaluó y estableció en función de la cantidad de probetas cilíndricas necesarias para determinar de manera fiable la resistencia a la compresión de concretos fabricados con cementos tipo IP y tipo V, con incorporación de escoria de cobre en proporción de peso como sustituta del agregado fino, mediante pruebas de compresión axial e índice de rebote. La determinación de la resistencia a la compresión del concreto se realiza, por una parte, con ayuda de la máquina de compresión axial, y por otra, empleando un esclerómetro.

La consistencia se evalúa sobre la mezcla fresca y está en función de los componentes del concreto y depende principalmente de la cantidad de agua.

Este estudio determinó que se fabriquen seis (6) probetas (briquetas) por cada porcentaje de escoria de cobre que sustituyó al agregado fino en proporciones de peso. Lo anterior tuvo que efectuarse tres veces debido a que se estableció como parámetros de experimentación tiempos de curado de 7, 14 y 28 días. Además, todo lo anterior tuvo que realizarse dos veces porque la investigación contempló la experimentación con dos tipos de cemento: tipo IP y tipo V. La cantidad total estimada de especímenes necesarios para realizar los ensayos de manera confiable es 360 probetas.

En la Tabla 5 se aprecia de manera detallada la cantidad de especímenes considerados como muestra en esta investigación. La cantidad de probetas cilíndricas que fueron empleadas para realizar el análisis experimental está en función de las proporciones porcentuales de escoria de cobre que sustituyeron al agregado fino, de los tiempos de curado por inmersión y de los tipos de cemento empleados en la fabricación del concreto.

**Tabla 5: Cantidad de probetas cilíndricas de concreto que conforman la muestra empleada en la investigación.**

Tipo de cemento	% EFC	Cantidad de probetas de acuerdo al tiempo de curado			Total por proporción de EFC
		7 días	14 días	28 días	
IP	0%	6	6	6	18
	5%	6	6	6	18
	10%	6	6	6	18
	15%	6	6	6	18
	20%	6	6	6	18
	25%	6	6	6	18
	30%	6	6	6	18
	35%	6	6	6	18
	40%	6	6	6	18
	50%	6	6	6	18
V	0%	6	6	6	18
	5%	6	6	6	18
	10%	6	6	6	18
	15%	6	6	6	18
	20%	6	6	6	18
	25%	6	6	6	18
	30%	6	6	6	18
	35%	6	6	6	18
	40%	6	6	6	18
	50%	6	6	6	18

**Total= 360**

Fuente: Propia.

### 3.3.3. Criterios de inclusión

Esta tesis considera como criterios de inclusión lo siguiente:

- 1) Que las probetas (briquetas) sean de sección circular, de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro (12 pulgadas x 6 pulgadas).
- 2) Que las probetas estén fabricadas con cementos tipo IP y tipo V.
- 3) Que las probetas tengan períodos de curado de 7, 14 y 28 días.
- 4) Que las probetas sean elaboradas con escoria de cobre hasta un máximo de 50% del peso del agregado fino en un concreto de referencia o patrón.
- 5) Que las probetas hayan sido elaboradas en la provincia de Cusco.



- 6) Que el agregado fino sea de la cantera de Cunyac.
- 7) Que el agregado grueso provenga de la cantera de Huacarpay.
- 8) Que los porcentajes de sustitución de agregado fino por escoria de cobre sean: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% y 50%.
- 9) Que el agua de mezcla sea agua potable, igual que el agua de curado.



3.4. Instrumentos

3.4.1. Instrumentos metodológicos o de recolección de datos

Se emplearon guías de observación de laboratorio y de campo para la recolección de datos en todas las etapas de la investigación.

3.4.1.1. Ficha de equipos e instrumentos empleados



Equipos e instrumentos empleados

Form fields for: Responsable: \_\_\_\_\_, Fecha: \_\_\_\_\_ Temperatura: \_\_\_\_\_, Lugar: \_\_\_\_\_, Observaciones: \_\_\_\_\_

Table with 7 columns: Nº, Equipo / instrumento, Cantidad, Marca, Código, Estado, Observaciones. It contains 15 empty rows for data entry.

Fuente: Propia.

## 3.4.1.2. Ficha de ensayo granulométrico de los agregados

**Granulometría de los agregados**

Responsable \_\_\_\_\_

Lugar: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Observaciones: \_\_\_\_\_

**Granulometría del agregado fino**

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)
3/8"	9,50	
# 4	4,75	
# 8	2,36	
# 16	1,18	
# 30	0,60	
# 50	0,30	
# 100	0,15	
# 200	0,08	
Fondo	0,00	

**Granulometría de la escoria de cobre**

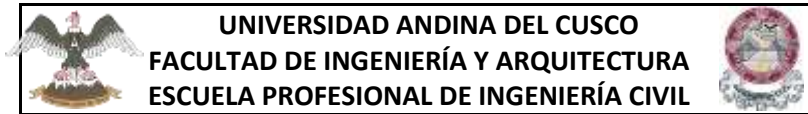
Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)
3/8"	9,50	
# 4	4,75	
# 8	2,36	
# 16	1,18	
# 30	0,60	
# 50	0,30	
# 100	0,15	
# 200	0,08	
Fondo	0,00	

**Granulometría del agregado grueso**

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)
3 1/2"	90,00	
3"	75,00	
2 1/2"	63,00	
2"	50,00	
1 1/2"	37,50	
1"	25,00	
3/4"	19,00	
1/2"	12,50	
3/8"	9,50	
# 4	4,75	
Fondo	0,00	

Fuente: Propia.



**3.4.1.3. Ficha del ensayo de peso específico y absorción de los agregados****Peso específico y absorción del agregado fino, agregado grueso  
y escoria de cobre**

Responsable: \_\_\_\_\_

Lugar: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Observaciones: \_\_\_\_\_

**Peso inicial de agregado fino =**

Detalle	Peso (gr)
A1	
A2	
B	
C	
S	

**Peso inicial de escoria de cobre =**

Detalle	Peso (gr)
A1	
A2	
B	
C	
S	

Donde:

A1 = Peso en el aire de la muestra secada en el horno.

A2 = Peso de la muestra secada en el horno que se introdujo en el picnómetro.

B = Peso del picnómetro lleno con agua.

C = Peso del picnómetro con la muestra y agua hasta la marca de calibración.

S = Peso de la muestra saturada superficialmente seca.

**Peso inicial agregado grueso =**

Detalle	Peso (gr)
A	
B	
C	

Donde:

A = Peso en el aire de la muestra secada en el horno.

B = Peso en el aire de la muestra saturada superficialmente seca.

C = Peso en el agua de la muestra saturada.

Fuente: Propia.



3.4.1.4. Ficha del ensayo de peso unitario y contenido de vacíos de los agregados



Peso unitario del agregado fino y grueso

Responsable: \_\_\_\_\_

Lugar: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Recipiente	Peso (kg)	Altura (cm)	Ancho (cm)
Molde Proctor			
Briquetera			

Muestra	PTS (kg)	PTC (kg)
Agregado fino		
Agregado grueso		

Donde:

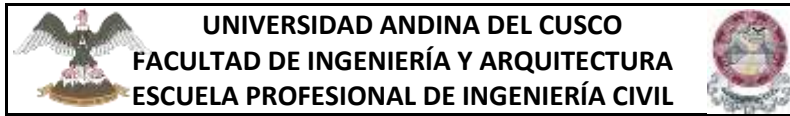
PTS: peso total suelto (peso del molde + peso del agregado suelto).

PTC: Peso total compactado (peso del molde + peso del agregado compactado).

Fuente: Propia.



3.4.1.5. Ficha del ensayo de resistencia a la abrasión del agregado grueso



Desgaste del agregado grueso

Responsable: \_\_\_\_\_

Lugar: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Observaciones: \_\_\_\_\_

Peso	Peso retenido por tamiz (gr)				
					Nº 12
P1					
P2					

Donde:

- P1: peso inicial total de la muestra seca (gr).
- P2: peso final de la muestra seca retenida en el tamiz Nº 12 (gr).

Fuente: Propia.



3.4.1.6. Ficha del ensayo de contenido de humedad de los agregados



Contenido de humedad de los agregados

Responsable: \_\_\_\_\_

Lugar: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Agregado fino:

Descripción	Peso (gr)
P1	
P2	
P <sub>recipiente</sub>	

Agregado grueso:

Descripción	Peso (gr)
P1	
P2	
P <sub>recipiente</sub>	

Donde:

P1: peso de la muestra húmeda más peso del recipiente.

P2: peso de la muestra seca más peso del recipiente.

P<sub>recipiente</sub>: peso del recipiente.

Fuente: Propia.



3.4.1.7. Ficha del ensayo de consistencia del concreto

**UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Asentamiento del concreto

Responsable: \_\_\_\_\_

Lugar: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Observaciones: \_\_\_\_\_

Tipo de cemento	% EFC	Asentamiento del concreto fresco (pulgada)		
		7 días de curado	14 días de curado	28 días de curado
IP	0%			
	5%			
	10%			
	15%			
	20%			
	25%			
	30%			
	35%			
	40%			
	50%			
V	0%			
	5%			
	10%			
	15%			
	20%			
	25%			
	30%			
	35%			
	40%			
	50%			

Fuente: Propia.



3.4.1.8. Ficha de características físicas de las briquetas



Características físicas de las probetas

Responsable: \_\_\_\_\_

Lugar: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Tipo de cemento:

Cantidad de escoria de cobre (%):

Tiempo de curado (días):

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	

Fuente: Propia.

3.4.1.9. Ficha del ensayo de compresión axial del concreto



Ensayo de compresión axial de probetas

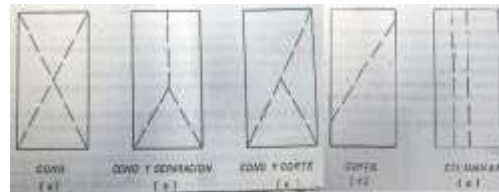
Responsable: \_\_\_\_\_

Lugar: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Tipo de cemento:

Cantidad de escoria de cobre (%):

Tiempo de curado (días):



Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla	Observaciones

Fuente: Propia.



3.4.1.10. Ficha del ensayo de índice de rebote del concreto



Prueba de índice de rebote en probetas

Responsable: \_\_\_\_\_
Fecha: \_\_\_\_\_ Temperatura: \_\_\_\_\_
Lugar: \_\_\_\_\_

Tipo de cemento:
Cantidad de escoria de cobre (%):
Tiempo de curado (días):

Table with 3 columns: Espécimen, Disparo, Lectura. Contains 27 rows of data for 3 specimens.

Table with 3 columns: Espécimen, Disparo, Lectura. Contains 27 rows of data for 3 specimens.

Fuente: Propia.



### 3.4.2. Instrumentos de ingeniería

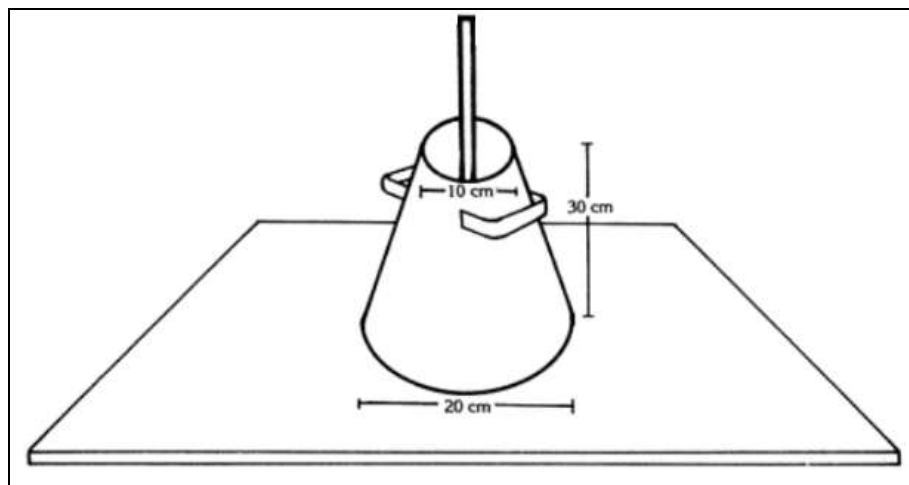
#### 3.4.2.1. Instrumentos de campo

##### 3.4.2.1.1. Cono de Abrams

El cono de Abrams es un instrumento estandarizado, cuyas dimensiones están descritas en ASTM C143, que sirve para realizar pruebas de asentamiento o revenimiento en concreto fresco. El asentamiento es un índice muy útil que permite establecer ciertos criterios sobre la mezcla, como la consistencia y la trabajabilidad

Sin embargo el cono tiene limitaciones, ya que es útil solamente para concretos con agregados pétreos, tamaños máximos menores a 5 centímetros y con relativa plasticidad, caracterizada por asentamientos entre unos 2 y 17 centímetros (Porrero et al., 2009, pág. 47).

El cono de Abrams tiene la forma de un cono invertido truncado, y está hecho íntegramente de metal.



Fuente: (Sánchez, 2001, pág. 112).

**Figura 5: Dimensiones del cono de Abrams.**

##### 3.4.2.1.2. Balanza de precisión

La balanza es un instrumento que sirve para medir el peso de los objetos. Actualmente se dispone de balanzas digitales con precisiones que oscilan entre el décimo y el milésimo.



Fuente: Propia.

**Figura 6: Balanza digital.**

#### **3.4.2.1.3. Briqueteras**

Las briqueteras son moldes metálicos de forma cilíndrica cuyas dimensiones están normadas por ASTM C470. La base del molde es cerrado por una placa que debe ser colocada apropiadamente para impedir la salida y de la mezcla y pérdida de agua por escurrimiento. Las dimensiones más usadas en Perú son las de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura (6 pulgadas y 12 pulgadas, respectivamente).



Fuente: Propia.

**Figura 7: Briqueteras de 15 cm x 30 cm.**

#### **3.4.2.1.4. Mezcladora**

La mezcladora es un aparato electromecánico metálico con ruedas de caucho que se emplea para realizar una mezcla uniforme y adecuada de los materiales durante la preparación del concreto.



Fuente: Propia.

**Figura 8: Mezcladora de media bolsa de cemento de capacidad.**

#### **3.4.2.1.5. Poza de curado**

Este estudio empleó una poza de perímetros rectos y de forma rectangular para el curado de las probetas.

Para construir dicha poza, se excavó en el suelo un hoyo de 3,80 metros de largo, 1,60 metros de ancho y 0,55 metros de profundidad. Para impermeabilizar las superficies de la poza de curado se colocó una capa doble de plástico grueso. A medida que se introdujeron las briquetas, se empezó a llenar de agua en la proporción adecuada.



Fuente: Propia.

**Figura 9: Poza de curado.**

#### 3.4.2.1.6. Martillos de goma

Los martillos de goma permiten una adecuada compactación del concreto fresco que es introducido en un molde. Los golpes sobre las briqueteras llenas de mezcla permiten la reacomodación adecuada de los materiales que conforman el concreto y de esa manera consolidar el elemento y prevenir la formación de vacíos.



Fuente: Propia.

**Figura 10: Martillo de goma.**

#### 3.4.2.1.7. Varillas de acero

Para chuzar el concreto introducido en las briqueteras se emplearon varillas de acero, de acuerdo a ASTM C31. Cada varilla es de acero de 5/8 de pulgada de diámetro y tiene una longitud de 60 cm; para compactar de forma adecuada el concreto, la varilla tiene una punta semiesférica.



Fuente: Propia.

**Figura 11: Varillas de compactación de mezcla.**

### 3.4.2.2. Instrumentos de laboratorio

#### 3.4.2.2.1. Máquina de compresión axial

La máquina de compresión axial es un instrumento de laboratorio estático, que sustenta su funcionamiento en la presión que ejerce un pistón hidroneumático accionado por electricidad sobre una probeta o testigo de concreto. El aparato permite hallar de manera experimental la fuerza máxima necesaria antes de que el elemento puesto a prueba colapse o falle.



Fuente: Propia.

**Figura 12: Máquina de compresión axial marca Humboldt.**

#### 3.4.2.2.2. Esclerómetro

El esclerómetro es un instrumento de ensayo no destructivo que permite medir la resistencia a la compresión de algún elemento. Su funcionamiento se basa en el disparo de una sonda metálica sobre una superficie; al impactar con el elemento la sonda o martillo rebota y el esclerómetro marca un valor que establece su resistencia.

En el caso de esclerómetros analógicos, se requiere de una curva de correlación para hallar la resistencia a la compresión en función del valor establecido por la marca de medición hallado tras el disparo.



Fuente: Propia.

**Figura 13: Esclerómetro analógico marca Proceq.**

#### 3.4.2.2.3. Juego de tamices

Para realizar los ensayos de granulometría de los agregados y abrasión se requiere el uso de tamices con aberturas estandarizadas de acuerdo a la serie establecida en ASTM C136. Además, los tamices deben cumplir con la NTP 350.001.

Se debe montar los tamices de forma que no haya pérdida de material durante el tamizado.



Fuente: Propia.

**Figura 14: Juego de tamices.**



#### 3.4.2.2.4. Peachímetro

El peachímetro o medidor de pH permite establecer la alcalinidad o acidez de una sustancia. En la actualidad se dispone de equipos digitales.



Fuente: Propia.

**Figura 15: Peachímetro digital.**

#### 3.4.2.3. Equipos y herramientas de uso común y de uso breve

En el desarrollo de la tesis también se utilizaron diferentes herramientas y equipo de laboratorio en algunas pruebas. En algunos casos se emplearon objetos y enseres de uso cotidiano en el desarrollo de la parte experimental. En otros casos, el empleo de equipo y herramientas fue breve y no requiere una descripción detallada ni definiciones teóricas porque son, en la mayoría de casos, materiales de uso común.



Fuente: Propia.

**Figura 16: Máquina de Los Ángeles.**



Fuente: Propia.

**Figura 17: Horno de precisión.**



Fuente: Propia.

**Figura 18: Cono de consistencia y apisonador.**



Fuente: Propia.

**Figura 19: Wincha de mano o cinta métrica.**





Fuente: Propia.

**Figura 20: Escobilla de acero.**



Fuente: Propia.

**Figura 21: Cucharón metálico.**



Fuente: Propia.

**Figura 22: Jarra con graduación en litros.**



Fuente: Propia.

**Figura 23: Baldes de plástico de 20 litros.**



Fuente: Propia.

**Figura 24: Carretilla tipo *boogie*.**



Fuente: Propia.

**Figura 25: Nivel de mano.**



Fuente: Propia.

**Figura 26: Alicates universal.**



Fuente: Propia.

**Figura 27: Espátula y badilejo.**



Fuente: Propia.

**Figura 28: Martillo, llave de tuercas y destornilladores.**

### 3.5. Procedimientos de recolección de datos

#### 3.5.1. Muestreo de los agregados

##### a. Equipos utilizados y materiales

- Agregados: 40 kg aproximadamente de arena, y 80 kg aproximadamente de piedra chancada de 3/4 de pulgada.
- Brocha.
- Regla de madera.
- Espátula.
- Balanza de precisión.
- Bolsa o saco (costal).

##### b. Procedimiento

Se desarrollaron los procedimientos de acuerdo a NTP 400.010 y ASTM D75.

##### b.1. Toma de muestra en campo

Se compró una porción de agregado de una distribuidora de materiales de construcción cercana al lugar donde se realizó la fabricación de las probetas y se llevó al laboratorio para realizar las pruebas correspondientes.



Fuente: Propia.

**Figura 29: Muestra de material para los ensayos.**

## b.2. Toma de muestra en laboratorio o cuarteo de material

- Se echó el material sobre una superficie sólida, plana y limpia, y se mezcló con ayuda de una pala.
- Con la pala se apiló el agregado y se extendió el material hasta que adquirió una forma circular regular de espesor uniforme.
- Posteriormente se tomó la regla y se hicieron dos divisiones diametrales que formaron cuatro partes iguales de agregado.
- Tras inspeccionar el resultado, se tomaron las dos partes diametralmente opuestas que tenían características similares en cuanto a tamaño y textura del material. Las partes restantes fueron desechadas.
- Finalmente, con las partes elegidas se procedió a repetir la secuencia anterior una vez más, para obtener una cantidad representativa y apropiada para los ensayos en laboratorio.



Fuente: Propia.

**Figura 30: Mezcla y preparación del agregado.**



Fuente: Propia.

**Figura 31: Muestra representativa del agregado en laboratorio.**

## c. Toma de datos

Luego de aplicar la secuencia descrita anteriormente, se logró obtener una muestra de agregado de partículas uniformes (respecto al agregado inicial) que garantizaron un adecuado análisis en laboratorio de acuerdo a lo que indican las normas y reglamentos que establecen los requisitos de agregado para la elaboración de concreto.



### 3.5.2. Granulometría de los agregados y de la escoria de cobre

#### 3.5.2.1. Granulometría del agregado fino

##### a. Equipos utilizados y materiales

- 2 kilogramos de agregado obtenidos mediante el método del cuarteo.
- Balanza de precisión.
- Brocha.
- Serie de tamices para granulometría de los agregados finos: N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y N° 200. También se utilizó el fondo.

##### b. Procedimiento

- Se introdujo el material en el tamiz más grande de la serie (tamiz N° 4) y se colocó la tapa.
- Para asegurar un correcto tamizado se colocó la pila de tamices debidamente acoplados, para evitar pérdidas de material, en la máquina sacudidora.
- Posteriormente, con mucho cuidado se retiraron los tamices de la máquina y se obtuvo el peso de material retenido en cada tamiz con la balanza de precisión.



Fuente: Propia.

**Figura 32: Tamizado del agregado fino en máquina sacudidora.**



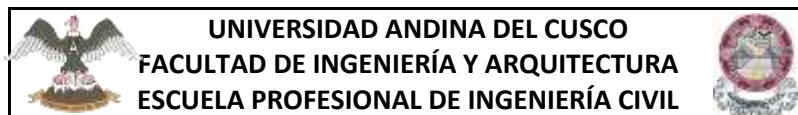
Fuente: Propia.

**Figura 33: Agregado fino retenido en los tamices de la serie.**

### c. Toma de datos

Los datos obtenidos del ensayo de granulometría al que fue sometido el agregado fino se muestran en la tabla que sigue.

**Tabla 6: Análisis granulométrico del agregado fino.**



#### Granulometría del agregado fino

Responsable: Juan Díaz y Miguel Bravo

Fecha: 13/07/2016 Temperatura: 19 °C

Lugar: Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC

Observaciones: \_\_\_\_\_

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)
# 4	4,75	0,0
# 8	2,36	31,1
# 16	1,18	319,2
# 30	0,60	653,9
# 50	0,30	747,3
# 100	0,15	123,4
# 200	0,08	93,0
Fondo	0,00	32,1

Fuente: Propia.

### 3.5.2.2. Granulometría del agregado grueso

#### a. Equipos utilizados y materiales

- 5 kilogramos de agregado obtenidos mediante el método del cuarteo descrito en 3.5.2.1.
- Balanza de precisión.
- Brocha.
- Serie de tamices para granulometría de los agregados gruesos: 3 ½'', 3'', 2 ½'', 2'', 1 ½'', 1'', ¾'', ½'', 3/8'', N° 4. También se utilizó el fondo.

## b. Procedimiento

- De manera similar al procedimiento experimental realizado con el agregado fino, primero se introdujo el material en el tamiz más grande de la serie indicada (tamiz 3 ½'') y se colocó la tapa.
- Después, para realizar un tamizado apropiado se colocó la pila de tamices, debidamente acoplados para evitar pérdidas de material, en la máquina sacudidora y se inició el tamizado durante un tiempo apropiado.
- Finalmente se apagó la máquina sacudidora, se retiraron los tamices cuidadosamente, se colocó el material retenido en cada tamiz en un recipiente limpio y se obtuvo el peso empleando la balanza de precisión.



Fuente: Propia.

**Figura 34: Preparación de los tamices de la serie gruesa.**



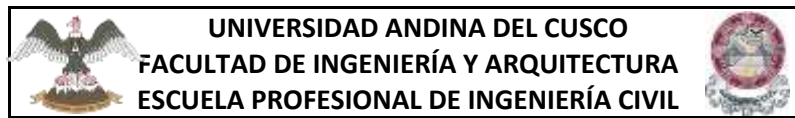
Fuente: Propia.

**Figura 35: Agregado grueso retenido en cada tamiz.**

## c. Toma de datos

Del ensayo de granulometría al que fue sometido el agregado grueso se obtuvieron los valores experimentales que completan la tabla que se muestra a continuación:



**Tabla 7: Análisis granulométrico del agregado grueso.****Granulometría del agregado grueso**Responsable: Juan Díaz y Miguel BravoFecha: 13/07/2016 Temperatura: 19 °CLugar: Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC

Observaciones: \_\_\_\_\_

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)
3 1/2"	90,00	0,00
3"	75,00	0,00
2 1/2"	63,00	0,00
2"	50,00	0,00
1 1/2"	38,10	0,00
1"	25,00	669,60
3/4"	19,00	1562,70
1/2"	12,50	1506,40
3/8"	9,00	652,20
# 4	4,75	394,70
Fondo	0,00	214,40

Fuente: Propia.

**3.5.2.3. Granulometría de la escoria de cobre (EFC)****a. Equipos utilizados y materiales**

– 2,5 kilogramos de escoria de cobre obtenidos mediante el método del cuarteo descrito en el ítem 3.5.1.

– Balanza de precisión.

– Brocha.

– Serie de tamices que se utilizan para granulometría de los agregados finos: N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y N° 200. También se utilizó el fondo.

**b. Procedimiento**

– Para el análisis granulométrico de la escoria de cobre se repitió el procedimiento del ensayo granulométrico del agregado fino descrito en 3.5.2.1.



Fuente: Propia.

**Figura 36: Escoria de cobre retenida en cada tamiz.**

**c. Toma de datos**

Las cantidades obtenidas del ensayo granulométrico al que fue sometido la escoria de cobre se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 8: Análisis granulométrico de la escoria de cobre.**

**Granulometría de la escoria de cobre**

Responsable: Juan Díaz y Miguel Bravo  
Fecha: 19/07/2016 Temperatura: 18 °C  
Lugar: Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC  
Observaciones: \_\_\_\_\_

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)
# 4	4,75	0,90
# 8	2,36	332,00
# 16	1,18	1588,90
# 30	0,60	546,10
# 50	0,30	30,20
# 100	0,15	1,40
# 200	0,08	0,30
Fondo	0,00	0,20

Fuente: Propia.



### **3.5.3. Ensayo de peso específico y absorción de los agregados y de la escoria de cobre**

#### **3.5.3.1. Peso específico y absorción del agregado fino**

##### **a. Equipos utilizados y materiales**

- Balanza de precisión.
- Picnómetro (fiola) de 500 ml.
- Molde cónico metálico (cono de consistencia).
- Apisonador de metal.
- Horno.
- 1204 gramos de agregado fino (arena).

##### **b. Procedimiento**

- Se anotó el peso del picnómetro con agua hasta el nivel de 500 ml.
- Por el método del cuarteo se obtuvo una muestra de 1204,0 gr de material que logró pasar el tamiz N° 4. Se puso la muestra en el horno a temperatura constante de 110 °C durante 24 horas. Luego se dejó enfriar a temperatura ambiente y se sumergió el agregado en un balde con agua por 24 horas para lograr que se sature.
- Pasado el tiempo de inmersión se vertió el agua cuidadosamente, para evitar perder material arcilloso o fino.
- El material saturado fue colocado en una bandeja de metal limpia. Las normas y reglamentos establecen que el material debe secarse introduciéndose en un horno a 60 °C, removiendo la muestra de manera constante. En laboratorio de la Facultad no se cuenta con un horno dedicado a esa tarea; debido a ello el agregado fino saturado fue colocado en una bandeja de metal limpia que se puso a fuego moderado en una cocina a gas; se removió uniformemente la arena. Se procuró controlar en todo momento que no se exceda el estado saturado superficialmente seco.
- Cuando la muestra estuvo en condiciones aparentes para continuar con la prueba, se puso una porción en el cono de consistencia hasta rebasar la parte superior o base menor. Se verificó que el cono estuviera firmemente apoyado sobre una superficie lisa metálica por su base mayor,

para evitar pérdidas de material al momento de apisonar. Luego, con ayuda de la barra compactadora se dieron 25 golpes sobre la superficie libre del material contenido en el cono.

– El procedimiento anterior se realizó tres veces y se observó si se presentaba alguna de las siguientes condiciones, de acuerdo a la guía de laboratorio vigente de la Facultad:

i) Si se queda con forma tronco-cónica, tiene más humedad que la correspondiente al estado saturado superficialmente seco.

ii) Si se queda con forma cónica terminada en punta, sin desmoronarse, tiene la humedad correspondiente al estado saturado superficialmente seco.

iii) Si se desmorona, tiene menos humedad que la correspondiente al estado saturado superficialmente seco.

– Se realizó la prueba hasta verificar que se cumplió con el ítem ii).

– Comprobado el estado saturado superficialmente seco del agregado fino, se pesaron 602,0 gr de muestra y fueron colocados en el picnómetro; otros 602,0 gr se pusieron a secar en el horno.

– Se vertió agua en el picnómetro, hasta llegar a la marca de 500 ml aproximadamente, y empleando la bomba de vacíos se succionó el aire remanente contenido en los espacios intermoleculares de las partículas de arena. Se succionó hasta que dejaron de salir burbujas.

– Se completó con agua hasta los 500 ml del marcador del picnómetro, y se anotó el peso.

– También se anotó el peso de la muestra que fue secada en el horno.



Fuente: Propia.

**Figura 37: Verificación del estado saturado superficialmente seco.**



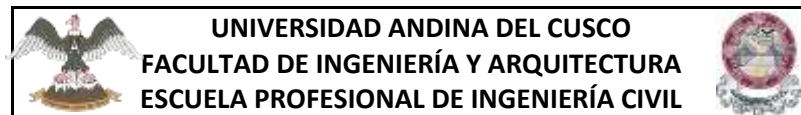
Fuente: Propia.

**Figura 38: Extracción de aire del picnómetro con agua y muestra.**

### c. Toma de datos

Se procedió a determinar experimentalmente cada uno de los parámetros, los cuales se denominan A, B, C y S, necesarios para calcular el peso específico y la absorción del agregado fino.

**Tabla 9: Peso específico y absorción del agregado fino.**



**Peso específico y absorción del agregado fino**

Responsable: Juan Díaz y Miguel Bravo

Fecha: 19/07/2016 Temperatura: 21 °C

Lugar: Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC

Observaciones: \_\_\_\_\_

- A = 591,9 gr (peso de la muestra secada en el horno).
- A = 582,7 gr (peso de la muestra secada en el horno que se introdujo en el picnómetro).

B = 657,3 gr (peso del picnómetro con agua).

C = 1032,5 gr (peso del picnómetro la muestra y agua hasta la marca de calibración).

$S = \frac{1204,0}{2} = 602,0$  gr (peso de la muestra saturada superficialmente seca).

Fuente: Propia.

### 3.5.3.2. Peso específico y absorción del agregado grueso

#### a. Equipos utilizados y materiales

- Balanza de precisión.
- Canastilla metálica.
- Balde y recipientes.
- Horno.
- Franela y retazos de tela.

## b. Procedimiento

- Se tomó una muestra representativa del agregado grueso. Dicha muestra se lavó en un balde y se puso a secar en el horno a temperatura constante de 110 °C durante 12 horas.
- Cuando el material fue retirado del horno, se lo dejó enfriar a temperatura ambiente.
- Luego la muestra fue sumergida en agua, para lograr su saturación.
- Al cabo de 24 horas de inmersión, se retiró el agregado del agua.
- Con la franela o trapo, se quitó la humedad de las partículas de la muestra hasta que estuvo seca al tacto, con una coloración opaca que indicaba que se encontraba en estado saturado superficialmente seco.
- En esas condiciones, se anotó el peso del material y se procedió a introducirlo dentro de la canastilla metálica, la cual fue sumergida por completo dentro de un balde con agua. La canastilla fue conectada a la balanza y se obtuvo el peso sumergido de la muestra.
- La muestra que fue sumergida fue retirada del agua y puesta a secar en el horno a temperatura constante de 110 °C durante 16 horas.
- Se sacó el material del horno, se dejó enfriar durante una hora y se volvió a pesar.



Fuente: Propia.

**Figura 39: Preparación del agregado grueso para ensayo.**





Fuente: Propia.

**Figura 40: Secado superficial del agregado grueso saturado.**

### c. Toma de datos

Con el material listo para el ensayo, se determinaron experimentalmente los parámetros que fueron empleados en el cálculo del peso específico y absorción del agregado grueso.

**Tabla 10: Peso específico y absorción del agregado grueso.**

 <b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b> 	
<b>Peso específico y absorción del agregado grueso</b>	
Responsable:	<b>Juan Díaz y Miguel Bravo</b>
Fecha:	<b>19/07/2016</b> Temperatura: <b>21 °C</b>
Lugar:	<b>Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC</b>
Observaciones:	_____

$A = 3563,7$  (muestra inicial) –  $571,8$  ( $571,8$  gr es el peso del recipiente).

$A = 2991,9$  gr (peso de la muestra secada en el horno).

$B = 3022,7$  gr (peso de la muestra secada con el trapo).

$C = 1895,9$  gr (peso de la muestra sumergida en agua en la canastilla).

Fuente: Propia.

### 3.5.3.3. Peso específico y absorción de la escoria de cobre

#### a. Equipos utilizados y materiales

- 1200 gramos de escoria de cobre.
- Se empleó lo mismo que en 3.5.3.1.

#### b. Procedimiento

- El procedimiento es el mismo que se desarrolló para el agregado fino, que se describió en el apartado 3.5.3.1.





Fuente: Propia.

**Figura 41: Verificación del estado saturado superficialmente seco de la escoria de cobre.**

### c. Toma de datos

Se preparó una muestra de 1200 gramos de material, que se dividió en dos partes iguales de 600 gramos cada una. Se obtuvo los siguientes datos:

**Tabla 11: Peso específico y absorción de la escoria de cobre.**

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b>	
<b>Peso específico y absorción de la escoria de cobre</b>		
Responsable:	<u>Juan Díaz y Miguel Bravo</u>	
Fecha:	<u>20/07/2016</u>	Temperatura: <u>20 °C</u>
Lugar:	<u>Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC</u>	
Observaciones:	_____	

$A = 599,3$  gr (peso de la muestra secada en el horno).  
 $A = 598,7$  gr (peso de la muestra secada en el horno luego que se introdujo en el picnómetro).

$B = 657,7$  gr.

$C = 1075,8$  gr ( $T^\circ = 15,4$  °C).

$S = \frac{1200}{2} = 600$  gr.

Fuente: Propia.





### **3.5.4. Ensayo de peso unitario y contenido de vacíos de los agregados**

#### **3.5.4.1. Peso unitario y contenido de vacíos del agregado fino**

##### **a. Equipos utilizados y materiales**

- Porción de agregado fino.
- Balanza de precisión, con aproximación al 0,1% del peso de la muestra.
- Molde Proctor de 10 cm de diámetro y 16,5 cm de altura.
- Varilla de acero de 5/8'' de diámetro, de 60 cm de longitud.
- Horno.
- Cinta métrica o wincha de mano.

##### **b. Procedimiento**

Se tomó una cantidad apropiada de material para el ensayo, la cual se puso a secar en el horno a temperatura de 110 °C durante 12 horas.

El ensayo se realiza de dos maneras, para determinar el peso unitario suelto y el peso unitario compactado del material.

##### **b.1. Peso unitario suelto del agregado fino**

- Primero, se determinaron las dimensiones del molde, con lo cual fue posible calcular su volumen. También se anotó el peso del elemento. Es preciso aclarar que en el ensayo del peso unitario suelto del agregado fino se empleó un molde Proctor.
- Luego, se colocó el material en el molde hasta colmarlo. Se procuró que la altura de caída, al introducir el agregado fino, no supere los 5 cm a partir de su abertura superior.
- Empleando la varilla, se eliminó el exceso de material y se enrasó la muestra al nivel del borde superior del molde.
- Se procedió a anotar el peso del molde con el material.

## b.2. Peso unitario compactado del agregado fino

- Igual que en el procedimiento del peso unitario suelto, se anotaron las dimensiones y el peso del recipiente.
- Se colocó el material dentro del molde, sólo hasta un tercio de altura del recipiente; se procuró en todo momento que la altura de caída no sea mayor a 5 cm del borde superior. Se dieron algunos golpes con el martillo de goma, para garantizar un correcto acomodo del agregado, mientras que con la varilla de acero se daban 25 golpes, para compactar el material.
- Se repitió el proceso anterior en las dos terceras partes restantes, con las cuales se llenó el recipiente.
- Luego de compactar la última capa, se puso material hasta colmar el molde; después, se igualó al ras la parte superior del recipiente con ayuda de la varilla.
- Finalmente, se utilizó la balanza de precisión para obtener el peso del molde con el material compactado.



Fuente: Propia.

**Figura 42: Peso unitario suelto del agregado fino.**



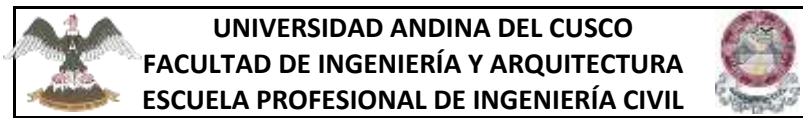
Fuente: Propia.

**Figura 43: Peso unitario compactado del agregado fino.**

## c. Toma de datos

Experimentalmente se encontró que:

Tabla 12: Peso unitario y contenido de vacíos del agregado fino.

**Peso unitario y contenido de vacíos del agregado fino**

Responsable: Juan Díaz y Miguel Bravo  
Fecha: 15/07/2016 Temperatura: 19 °C  
Lugar: Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC  
Observaciones: \_\_\_\_\_

Recipiente	PM <sub>p</sub> (kg)	Altura (cm)	Ancho (cm)
Molde Proctor	5,195	16,50	10,00

Muestra	PT <sub>s</sub> (kg)	PT <sub>c</sub> (kg)
Agregado fino	7,380	7,620

Donde:

PT<sub>s</sub>: peso total suelto (peso del molde + peso del agregado suelto).

PT<sub>c</sub>: Peso total compactado (peso del molde + peso del agregado compactado).

PM<sub>p</sub>: Peso total compactado (peso del molde + peso del agregado compactado).

Fuente: Propia.

**3.5.4.2. Peso unitario y contenido de vacíos del agregado grueso****a. Equipos utilizados y materiales**

- Porción de agregado grueso.
- Briquetera de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura.
- Respecto a lo demás, se empleó lo mismo que en 3.5.4.1.

**b. Procedimiento**

Con el agregado grueso se realizó el mismo procedimiento que en 3.5.4.1. La única diferencia fue que se trabajó con una briquetera en lugar del molde Proctor.



Fuente: Propia.

**Figura 44: Peso unitario suelto del agregado grueso.**





Fuente: Propia.

**Figura 45: Peso unitario compactado del agregado grueso.**

**c. Toma de datos**

Tras realizar las mediciones, se encontraron los siguientes datos:

**Tabla 13: Peso unitario y contenido de vacíos del agregado grueso.**

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b>	
---	---	---

**Peso unitario y contenido de vacíos del agregado grueso**

Responsable: Juan Díaz y Miguel Bravo  
 Fecha: 15/07/2016 Temperatura: 19 °C  
 Lugar: Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC

Recipiente	PM <sub>B</sub> (kg)	Altura (cm)	Ancho (cm)
Briquetera	4,100	30,00	15,00

Muestra	PT <sub>s</sub> (kg)	PT <sub>c</sub> (kg)
Agregado grueso	11,750	12,500

Donde:

PT<sub>s</sub>: peso total suelto (peso del molde + peso del agregado suelto).

PT<sub>c</sub>: Peso total compactado (peso del molde + peso del agregado compactado).

PM<sub>B</sub>: Peso total compactado (peso del molde + peso del agregado compactado).

Fuente: Propia.



### 3.5.5. Ensayo de resistencia a la abrasión o desgaste del agregado grueso

#### a. Equipos utilizados y materiales

- Serie de tamices: 3'', 2½'', 2'', 1½'', 1'', ¾'', ½'', ⅜'', ¼'', N° 4 y N° 8.
- Tamiz N° 12, que se utilizó para determinar el desgaste del material.
- Máquina de abrasión de Los Ángeles.
- Esferas de acero de 48 mm de diámetro, con pesos entre 390 gr y 445 gr (la cantidad de esferas depende de la cantidad de material y del tamaño de las partículas).
- Horno, de temperatura constante de 110 °C.
- Balde o recipiente.
- Bandejas metálicas.
- Balanza de precisión de capacidad superior a los 10 kg y con sensibilidad de 0,1% respecto al peso de la muestra ensayada.
- Máquina sacudidora para tamizado de agregados.
- Porción representativa de agregado grueso obtenida de acuerdo a lo indicado en 3.5.1.

#### b. Procedimiento

Se procedió de acuerdo a lo establecido en la NTP 400.019.

- Se seleccionó una cantidad apropiada de material; se lavó en un balde para eliminar partículas finas adheridas a las partículas de agregado grueso.
- La muestra lavada se puso a secar en el horno a 110 °C durante 12 horas.
- Luego, se tamizó el material con ayuda de la máquina sacudidora.
- Se verificó las cantidades retenidas en cada tamiz, y se seleccionó la cantidad de agregado y el número de esferas necesarias para realizar el ensayo de abrasión, de acuerdo a la tabla siguiente.

**Tabla 14: Gradación de las muestras para el ensayo de abrasión.**

GRADACIÓN		A	B	C	D
DIÁMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL A USAR (gr)			
QUE PASA	RETENIDO				
1½"	1"	1250			
1"	¾"	1250			
¾"	½"	1250	2500		
½"	⅜"	1250	2500		
⅜"	¼"			2500	
¼"	Nº 4			2500	
Nº 4	Nº 8				5000
PESO TOTAL		5000	5000	5000	5000
Nº de esferas		12	11	8	6
Nº de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo rotación (min)		15	15	15	15

GRADACIÓN		E	F	G
DIÁMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL A USAR (gr)		
QUE PASA	RETENIDO			
3"	2½"	2500		
2½"	2"	2500		
2"	1½"	5000	5000	
1½"	1"		5000	5000
1"	¾"			5000
PESO TOTAL		10000	10000	10000
Nº de esferas		12	12	12
Nº de revoluciones		1000	1000	1000
Tiempo rotación (min)		30	30	30

Fuente: NTP 400.019.

- Se introdujo la muestra con las esferas metálicas dentro de la máquina de abrasión de Los Ángeles. De inmediato se puso a trabajar el equipo hasta completar 500 revoluciones (aproximadamente 15 minutos).
- Cuando la máquina se detuvo, se extrajo la muestra cuidadosamente y se lavó empleando la malla Nº 12 —en el caso del Laboratorio de la Facultad, sólo está disponible la malla Nº 10; sin embargo, es posible emplearla sin que su uso altere significativamente el resultado final—.
- El material lavado se puso a secar en el horno a 110 °C durante 12 horas.
- Finalmente, se anotó el peso del material seco que fue retenido en el tamiz Nº 12.



Fuente: Propia.

**Figura 46: Agregado resultante del ensayo de abrasión.**



Fuente: Propia.

**Figura 47: Lavado del agregado resultante del ensayo de abrasión.**

**c. Toma de datos**

Se determinaron P1 (peso inicial de la muestra lavada y secada en el horno) y P2 (peso de la muestra luego de ser sometida a desgaste en la máquina de Los Ángeles, lavada en el tamiz N° 12 y secada en el horno). El agregado utilizado dependió de las cantidades más apreciables retenidas en los tamices 3/4" y 1/2", donde se retuvieron en mayor parte. De acuerdo a la Tabla 14, se eligió el método B; por consiguiente, se introdujo 5000 gr de agregado grueso dentro de la máquina de Los Ángeles, con 11 esferas de acero, hasta completar las 500 revoluciones.

**Tabla 15: Ensayo de abrasión del agregado grueso.**



**Desgaste del agregado grueso**

Responsable: Juan Díaz y Miguel Bravo  
 Fecha: 18/07/2016 Temperatura: 21 °C  
 Lugar: Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC

Peso	Peso retenido por tamiz (gr)			Total (gr)
	3/4"	1/2"	Nº 12	
P1	2502,3	2502,2		5004,5
P2			4074,0	4074,0

Donde:

P1: peso inicial total de la muestra seca (gr).  
 P2: peso final de la muestra seca retenida en el tamiz N° 12 (gr).

Fuente: Propia.

### 3.5.6. Ensayo de contenido de humedad de los agregados

#### 3.5.6.1. Contenido de humedad del agregado fino

##### a. Equipos utilizados y materiales

- Porción de agregado fino.
- Balanza de precisión, con sensibilidad de 0,01% del peso de la muestra.
- Horno.
- Recipiente con tapa, resistente al calor.

##### b. Procedimiento

- Se registró el peso del recipiente con tapa.
- Luego, se colocó una porción de agregado, con su humedad natural, dentro del recipiente, y se obtuvo el peso, al cual se denominó P1.
- Se introdujo el recipiente con la muestra en el horno a 110 °C durante 16 horas.
- Finalmente, se retiró la muestra del horno. Se colocó la tapa al recipiente para evitar que la muestra absorba humedad del entorno. Se dejó enfriar y se obtuvo el peso de la muestra dentro del recipiente con tapa, al cual se le denominó P2.



Fuente: Propia.

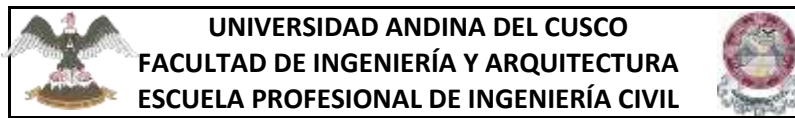
**Figura 48: Contenido de humedad del agregado fino.**



### c. Toma de datos

Los valores obtenidos para P1 y P2 se detallan a continuación:

**Tabla 16: Contenido de humedad del agregado fino.**



**Contenido de humedad del agregado fino.**

Responsable: **Juan Díaz y Miguel Bravo**  
Fecha: **13/07/2016** Temperatura: **19 °C**  
Lugar: **Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC**  
Observaciones: \_\_\_\_\_

Descripción	Peso (gr)
P1	1305,7
P2	1283,7
P <sub>recipiente</sub>	105,5

Donde:

P1: peso de la muestra húmeda más peso del recipiente (gr).

P2: peso de la muestra seca más peso del recipiente (gr).

P<sub>recipiente</sub>: peso del recipiente (gr).

Fuente: Propia.

### 3.5.6.2. Contenido de humedad del agregado grueso

#### a. Equipos utilizados y materiales

- Porción de agregado grueso.
- Se emplearon las mismas herramientas que en a. del ítem 3.5.6.1.

#### b. Procedimiento

Se realizó el mismo procedimiento que en b. del ítem 3.5.6.1.



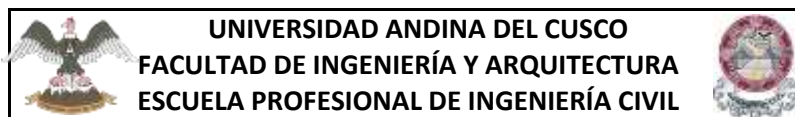
Fuente: Propia.

**Figura 49: Contenido de humedad del agregado grueso.**

### c. Toma de datos

Los datos experimentales hallados para P1 y P2 se muestran a continuación:

**Tabla 17: Contenido de humedad del agregado fino.**



#### Contenido de humedad del agregado grueso

Responsable: **Juan Díaz y Miguel Bravo**  
Fecha: **19/07/2016** Temperatura: **19 °C**  
Lugar: **Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC**  
Observaciones: \_\_\_\_\_

Descripción	Peso (gr)
P1	4506,1
P2	4497,7
P <sub>recipiente</sub>	506,1

Donde:

P1: peso de la muestra húmeda más peso del recipiente (gr).

P2: peso de la muestra seca más peso del recipiente (gr).

P<sub>recipiente</sub>: peso del recipiente (gr).

Fuente: Propia.

### 3.5.7. Diseño de mezclas

#### a. Equipos utilizados y materiales

– Papel, bolígrafo y útiles de escritorio.

– Computadora de escritorio.



- Datos obtenidos en los ensayos de materiales.
- Bibliografía y apuntes de clases.

### **b. Procedimiento**

El diseño de mezclas se realizó de acuerdo a lo propuesto en ACI 211.

### **3.5.8. Ensayo de asentamiento del concreto**

#### **a. Equipos utilizados y materiales**

- Porción de concreto fresco.
- Cono de Abrams (véase 3.4.2.1.1.)
- Barra compactadora (varilla de acero lisa de 5/8", 60 cm de longitud y punta semiesférica).
- Cinta métrica.
- Nivel de mano.
- Cucharón, escobilla de acero, guaípe, etc.

#### **b. Procedimiento**

Se realizó el ensayo de asentamiento de acuerdo a lo indicado en la NTP 339.035, ASTM C143 y NTP 339.036, que se describe a continuación.

- Fue necesario limpiar bien el cono de Abrams; para ello se empleó la escobilla de acero y un pedazo de guaípe limpio.
- Se ubicaron las herramientas del ensayo en un lugar adyacente a la máquina mezcladora, para evitar el desperdicio por transporte y para reducir el tiempo entre la toma de mezcla de la máquina y la colocación en el cono.
- Se humedeció la superficie interna del cono y se colocó sobre una superficie plana, rígida, nivelada y húmeda. Se fijó el cono a la superficie inferior sujetándolo por sus asas y presionándolo hacia abajo.

- Con el cucharón, se tomó una porción de mezcla que llenó un tercio de la altura del cono, aproximadamente.
- Después, se procedió a compactar la muestra. Para ello se empleó la varilla de acero, para dar 25 golpes empezando cerca del perímetro y acercarse al centro en forma de espiral. En la capa inferior fue necesario inclinar un poco la barra debido a la forma del cono.
- En la segunda y tercera capa se repitió el procedimiento precedente. Se debe realizar la compactación con golpes que logren atravesar hasta las capas inferiores.
- El molde se llenó en exceso en la última capa y se compactó procurando que siempre haya exceso de material. Deslizándola la barra compactadora sobre el borde superior del cono, se procedió a enrasar la última capa.
- Se limpió todo material sobrante adyacente a la base del cono que pudiera interferir con el movimiento de asiento del concreto.
- Se sujetó el cono firmemente por sus asas y se procedió a levantarlo en dirección perpendicular a la superficie horizontal. Se procuró respetar la velocidad de 300 mm en 5 s  $\pm$  2 s, indicada en la norma.
- Finalmente, con ayuda de la varilla y de la wincha se midió el asentamiento, el cual es la diferencia entre la altura del molde y la altura del centro desplazado de la cara superior del cono de mezcla deformado.



Fuente: Propia.

**Figura 50: Colocación de mezcla en el cono de Abrams.**



Fuente: Propia.

**Figura 51: Medición del asentamiento de la mezcla.**

**c. Toma de datos**

Los asentamientos medidos para cada proporción de escoria de cobre sustituida en el concreto son los siguientes:

**Tabla 18: Asentamiento para 7, 14 y 28 días de curado y diferentes porcentajes de EFC.****Granulometría del agregado fino**Responsable: **Juan Díaz y Miguel Bravo**Fecha: **19/08/2016 y posterior** Temperatura: **20 °C**Lugar: **Urb. Agua Buena M-5, San Sebastián, Cusco**

Observaciones: \_\_\_\_\_

Tipo de cemento	% EFC	Asentamiento del concreto fresco (pulgada)		
		7 días de curado	14 días de curado	28 días de curado
IP	0%	3,34	3,09	3,00
	5%	3,53	3,13	3,25
	10%	3,88	3,38	3,56
	15%	4,44	3,72	3,84
	20%	4,75	4,03	4,38
	25%	5,34	4,97	4,69
	30%	5,78	5,75	4,88
	35%	6,13	6,19	5,63
	40%	6,63	6,81	6,25
	50%	7,31	7,38	6,81
V	0%	3,34	3,41	3,38
	5%	3,88	3,81	3,44
	10%	4,03	4,28	3,94
	15%	4,31	4,94	3,88
	20%	4,84	5,16	4,38
	25%	5,44	5,91	4,72
	30%	5,81	6,38	5,78
	35%	6,38	6,81	6,56
	40%	7,31	7,47	7,81
	50%	8,03	8,31	9,00

Fuente: Propia.



### **3.5.9. Elaboración y curado de muestras cilíndricas de concreto**

#### **a. Equipos utilizados y materiales**

- Moldes (briqueteras) de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro.
- Barra compactadora de 5/8 de pulgada de diámetro, de 60 cm de longitud y un extremo terminado en forma semiesférica.
- Martillo de goma.
- Cucharón.
- Plancha de albañilería y espátula.
- Petróleo.
- Guaípe.
- Llave de tuercas.
- Alicata.
- Aceite.
- Escobilla de acero.
- Destornillador de punta plana.
- Corrector líquido.
- Marcador indeleble.

#### **b. Procedimiento**

Se procedió a elaborar las muestras considerando lo especificado en NTP 339.033 y NTP 339.036.

##### **b.1. Preparación de los moldes**

- Se desacoplaron las piezas de cada molde (cilindro y plataforma) y se limpió cuidadosamente cada pieza. Las caras de contacto con el concreto se limpiaron empleando una escobilla de

acero, para eliminar residuos del uso anterior. También se limpiaron los elementos de sujeción entre piezas (tornillos, mariposas y tuercas).

– Cuando las piezas estuvieron limpias, se procedió a armar los moldes. Se tuvo cuidado en acoplar adecuadamente las piezas, para evitar ranuras que pudieran ocasionar escurrimiento de agua o fuga de material.

– Después, con ayuda del guaipe empapado en petróleo se untaron las superficies interiores de contacto con la mezcla, para evitar adherencia entre el concreto y las briqueteras durante el desmolde.



Fuente: Propia.

**Figura 52: Limpieza y preparación de los moldes.**

## **b.2. Colocación de mezcla en los moldes**

– Se tuvo precaución de no demorar la colocación de concreto dentro de los moldes, lo cual se realizó inmediatamente después del ensayo de consistencia de la mezcla (descrito en 3.5.8.)

– De acuerdo a lo indicado en las normas, se tomó el concreto fresco directamente de la máquina mezcladora con el cucharón y se vertió en el molde.

– Se llenó el molde hasta un tercio de su altura y se compactó con 25 golpes uniformes de la barra de acero. Tras la compactación, se dieron golpes ligeros con el martillo de goma al molde, para eliminar vacíos. El proceso se repitió en las dos capas restantes.

– En la última capa se colocó material para lograr que la cara libre esté al ras con el borde superior del molde. Fue necesario utilizar la plancha de albañilería.



– Se colocó el molde con la mezcla fresca en una superficie nivelada y alejada de fuentes de vibración.



Fuente: Propia.

**Figura 53: Preparación del concreto en mezcladora.**



Fuente: Propia.

**Figura 54: Colocación y compactación en el molde.**

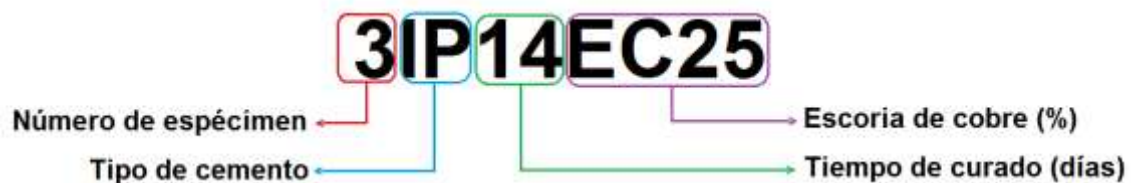
### b.3. Desmolde

– El desmolde de las piezas se realizó después de 24 horas.

– Se tuvo cuidado durante la manipulación de cada molde, para evitar golpes fuertes o deterioro de las muestras.

– Se aflojaron las mariposas o tuercas, con lo cual la parte cilíndrica liberó la muestra.

– Se asignó a cada elemento un código, para identificarlo durante los ensayos a los que sería sometido posteriormente. La codificación empleada es explicada en la imagen siguiente.



Fuente: Propia.

**Figura 55: Codificación de muestras empleada.**



- La muestra libre fue inmediatamente conducida a la poza de curado e introducida en agua durante tiempo apropiado.



Fuente: Propia.

**Figura 56: Desmolde de probetas cilíndricas de concreto.**

#### **b.4. Curado**

- Cada muestra fue introducida dentro de la poza de curado (véase 3.4.2.1.8.), hasta quedar sumergida completamente en agua potable.
- Se controló el nivel de agua permanentemente, para asegurar un curado adecuado.



Fuente: Propia.

**Figura 57: Poza de curado de probetas de concreto.**



### **b.5. Envío de muestras al laboratorio**

- Se realizó un cronograma para la realización de ensayos de índice de rebote y resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto.
- De acuerdo a las estimaciones realizadas, se llevaron las muestras al laboratorio el mismo día del ensayo. Se tuvo cuidado en el transporte de los especímenes: se acomodaron adecuadamente las probetas y se procuró que el tiempo de viaje no excediera los 30 minutos.
- En el laboratorio, se ubicó un lugar libre de exceso de calor para colocar las muestras hasta el momento de los ensayos.

### **3.5.10. Ensayo de resistencia del concreto**

#### **3.5.10.1. Ensayo de resistencia a la compresión del concreto mediante índice de rebote**

##### **a. Equipos utilizados y materiales**

- Esclerómetro analógico.
- Espátula.
- Plumones y marcadores indelebles.
- Corrector líquido.
- Franela.

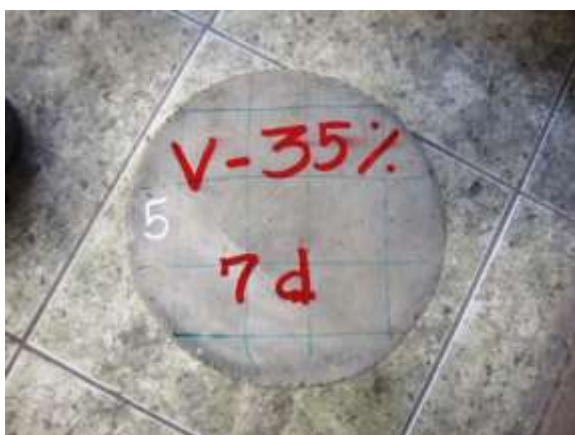
##### **b. Procedimiento**

Se aplicó durante los ensayos la metodología establecida en la NTP 339.181. y ASTM C805. Asimismo, se tuvo en consideración las indicaciones de ACI 228.1R respecto al ensayo de índice de rebote o esclerometría aplicado al concreto.

Es preciso aclarar que al tratarse de probetas de concreto muy jóvenes (7, 14 y 28 días de curado como máximo), la norma no obliga a limpiar la superficie de prueba con una piedra pulidora.

- El ensayo de índice de rebote se realizó instantes previos a la realización de la prueba de compresión axial.

- Se tomó cada probeta y se limpió con la espátula toda impureza adherida a la superficie elegida para realizar el ensayo. Se eliminó todo remanente de polvo con la franela.
- Sobre la superficie escogida para el ensayo, con el plumón se dibujó una retícula de 3x3 que formó una matriz de 9 recuadros, cada uno debidamente numerado.
- Se colocó el espécimen sobre una superficie sólida. Lo que se quiere hacer entender al decir “sólida” es que se tuvo que ubicar la probeta sobre una superficie dura y firmemente asentada; por ejemplo, el pavimento del laboratorio colocado sobre una viga de conexión tiene una solidez que permite eliminar vibraciones y falsos apoyos al momento de sujetar la probeta contra el piso.
- Uno de los investigadores sujetó firmemente la probeta, presionándola contra el pavimento del piso. El otro tesista empleó el esclerómetro para realizar disparos sobre cada uno de los recuadros de la retícula previamente dibujada.
- Es importante anotar que la norma recomienda que todas las pruebas sean realizadas por la misma persona, para evitar el incremento de errores debido a manipulación.
- Cada disparo realizado con el martillo del esclerómetro se registró en la guía de observación correspondiente.
- El procedimiento descrito se aplicó a cada una de las 360 probetas fabricadas para este trabajo de investigación.



Fuente: Propia.

**Figura 58: Retícula de 3x3 para ensayo de índice de rebote.**



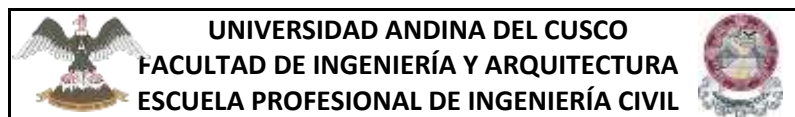
Fuente: Propia.

**Figura 59: Ensayo de índice de rebote sobre probetas de concreto.**

**c. Toma de datos**

Los valores obtenidos con esclerómetro para las probetas fabricadas con cemento tipo IP se muestran a continuación.

**Tabla 19: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 0% EFC.**

**Ensayo de esclerometría en probetas**Responsable: Juan Díaz y Miguel BravoFecha: 05/09/2016 y después Temperatura: 21 °CLugar: Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC

Observaciones: \_\_\_\_\_

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP07EC00	28,5	24,0	22,0	21,9	20,5	19,8	18,5	17,5	15,5
2IP07EC00	25,2	22,8	20,5	18,7	18,2	17,9	16,8	16,7	16,4
3IP07EC00	22,1	20,8	20,2	19,4	19,4	18,7	18,6	17,7	16,4
4IP07EC00	21,9	20,4	19,9	19,3	19,1	18,8	18,3	17,0	15,5
5IP07EC00	21,8	20,7	19,9	19,8	18,0	17,2	16,1	15,5	15,3
6IP07EC00	21,6	20,5	19,6	18,7	18,4	18,0	17,8	17,1	16,2

Fuente: Propia.

**Tabla 20: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 5% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP07EC05	25,5	24,1	21,1	21,0	20,4	20,1	19,8	17,2	16,2
2IP07EC05	22,3	21,9	21,7	21,0	20,8	20,5	19,5	19,2	17,1
3IP07EC05	25,5	22,4	22,4	21,2	20,6	19,1	18,2	17,3	16,9
4IP07EC05	24,9	24,1	22,0	20,3	19,9	19,9	19,4	17,2	16,0
5IP07EC05	23,8	22,1	20,7	20,3	20,2	19,9	19,8	17,1	16,3
6IP07EC05	22,4	21,8	20,8	20,4	19,5	19,1	18,4	18,3	17,2

Fuente: Propia.

**Tabla 21: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 10% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP07EC10	27,5	26,2	26,1	23,0	22,9	21,9	21,8	20,8	15,8
2IP07EC10	29,2	25,0	22,5	22,0	21,7	20,3	19,9	19,5	18,2
3IP07EC10	31,3	28,0	27,8	23,2	23,1	22,4	21,0	20,1	20,0
4IP07EC10	27,9	25,1	22,1	22,0	21,1	20,8	20,5	20,1	18,9
5IP07EC10	29,0	27,8	21,7	20,5	19,6	18,9	18,8	18,2	18,0
6IP07EC10	21,8	21,3	20,7	20,0	19,5	19,4	18,6	18,5	17,9

Fuente: Propia.

**Tabla 22: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 15% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP07EC15	28,0	27,1	23,4	21,0	21,2	20,5	19,3	22,6	20,2
2IP07EC15	24,9	24,9	23,3	23,0	22,8	22,1	22,1	19,2	19,0
3IP07EC15	25,0	24,1	23,9	23,5	22,3	21,8	20,8	19,7	18,2
4IP07EC15	23,8	23,1	22,4	22,4	22,4	22,2	21,0	20,5	19,5
5IP07EC15	25,3	25,3	24,0	23,8	23,1	22,3	21,8	20,0	19,9
6IP07EC15	23,4	23,4	22,3	21,8	21,3	20,5	20,5	20,0	19,9

Fuente: Propia.

**Tabla 23: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 20% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP07EC20	26,0	25,6	24,1	23,7	22,6	22,5	22,0	20,0	18,5
2IP07EC20	27,0	26,0	25,0	23,8	21,8	21,7	21,5	20,1	19,8
3IP07EC20	29,5	26,4	26,1	25,4	25,0	24,0	23,8	20,2	17,8
4IP07EC20	29,5	26,0	25,1	24,8	24,2	24,0	23,7	23,0	19,1
5IP07EC20	29,8	26,7	25,2	24,5	23,9	21,3	21,2	21,0	20,5
6IP07EC20	25,3	25,0	24,5	24,2	24,1	23,6	23,1	21,8	21,0

Fuente: Propia.

**Tabla 24: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 25% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP07EC25	30,8	29,3	27,9	25,9	24,2	24,1	23,3	23,3	23,1
2IP07EC25	28,9	26,6	24,8	22,6	20,8	20,7	20,0	19,8	17,0
3IP07EC25	31,2	29,0	27,5	25,0	23,4	22,5	21,3	21,0	19,6
4IP07EC25	32,0	25,5	24,0	23,2	22,0	21,7	21,5	21,4	17,3
5IP07EC25	29,8	28,2	26,4	25,8	24,2	23,3	22,6	20,1	18,4
6IP07EC25	26,1	25,6	25,4	24,0	23,2	23,1	21,8	20,7	19,3

Fuente: Propia.

**Tabla 25: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 30% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP07EC30	33,5	27,5	26,5	25,8	24,8	21,5	20,9	20,2	19,8
2IP07EC30	31,8	28,4	26,3	24,5	23,5	22,9	22,9	22,7	21,6
3IP07EC30	32,1	32,0	28,2	25,7	25,5	24,6	23,7	20,6	16,2
4IP07EC30	29,5	25,0	24,7	23,7	23,5	23,1	21,8	20,0	19,8
5IP07EC30	26,0	24,8	24,5	24,2	23,9	23,5	21,9	21,7	20,0
6IP07EC30	28,7	24,8	24,7	24,1	23,6	23,1	22,2	21,5	20,8

Fuente: Propia.

**Tabla 26: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 35% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP07EC35	28,5	28,1	27,0	26,9	26,7	26,0	25,7	23,8	23,3
2IP07EC35	29,1	29,0	26,1	25,2	24,0	21,5	20,1	20,1	20,0
3IP07EC35	26,8	26,8	26,6	26,0	25,0	23,7	22,8	22,2	21,0
4IP07EC35	27,0	26,8	26,1	26,1	25,0	24,6	22,5	21,0	20,8
5IP07EC35	28,2	25,7	23,6	22,9	21,8	21,6	21,5	20,1	18,9
6IP07EC35	26,7	26,1	25,7	24,2	23,3	22,6	21,7	20,5	19,7

Fuente: Propia.

**Tabla 27: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 40% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP07EC40	29,0	27,9	25,1	24,8	24,2	22,4	21,9	21,1	20,0
2IP07EC40	31,0	26,8	26,7	25,5	25,4	25,0	24,6	23,0	20,1
3IP07EC40	28,3	25,1	24,5	23,8	22,5	22,0	21,9	20,0	19,8
4IP07EC40	27,7	26,2	23,7	23,3	23,1	22,3	22,2	21,9	21,5
5IP07EC40	28,2	24,8	24,7	24,3	23,0	22,1	22,0	21,5	20,7
6IP07EC40	26,4	24,1	24,0	23,8	23,5	22,7	22,5	21,7	21,5

Fuente: Propia.

**Tabla 28: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 50% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP07EC50	27,1	26,7	25,1	24,1	23,8	23,5	22,8	22,5	22,0
2IP07EC50	23,3	22,6	22,1	21,5	21,2	21,1	20,8	20,4	20,4
3IP07EC50	27,0	25,2	25,0	24,1	24,0	22,5	21,4	19,8	18,8
4IP07EC50	25,4	23,1	22,9	22,6	22,0	21,7	20,9	20,8	18,9
5IP07EC50	25,0	23,8	23,3	22,3	21,6	21,0	20,5	20,0	19,7
6IP07EC50	24,1	23,8	23,5	23,0	22,4	22,1	21,6	20,1	18,2

Fuente: Propia.

**Tabla 29: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 0% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP14EC00	33,5	23,9	22,8	22,6	21,1	20,1	19,9	19,8	16,8
2IP14EC00	26,2	23,9	23,1	22,4	22,2	22,0	20,5	19,8	18,0
3IP14EC00	24,2	23,9	21,8	21,2	20,2	20,2	19,8	18,6	18,4
4IP14EC00	28,2	26,4	23,2	22,5	21,8	21,1	21,0	20,0	18,3
5IP14EC00	23,5	23,0	22,9	22,7	22,3	22,0	20,3	19,2	18,9
6IP14EC00	24,7	23,6	22,5	21,8	21,6	21,1	21,0	20,1	19,9

Fuente: Propia.

**Tabla 30: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 5% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP14EC05	24,6	24,1	23,7	23,5	22,5	22,0	21,6	21,3	19,9
2IP14EC05	26,2	22,5	21,3	21,0	21,0	20,5	20,3	20,2	20,2
3IP14EC05	26,0	23,0	21,9	21,0	21,0	20,9	20,5	19,8	18,8
4IP14EC05	27,9	21,7	21,5	21,0	21,0	20,2	20,2	19,8	18,9
5IP14EC05	32,5	24,2	24,0	23,2	22,6	22,4	20,8	19,7	18,6
6IP14EC05	23,5	23,1	23,1	22,9	22,6	22,3	20,5	20,1	20,0

Fuente: Propia.

**Tabla 31: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 10% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP14EC10	35,6	27,0	25,4	25,0	24,8	23,5	21,0	20,0	19,3
2IP14EC10	22,9	22,4	22,3	22,0	22,0	21,8	20,6	20,4	20,1
3IP14EC10	27,9	27,5	22,1	21,5	20,3	20,2	20,0	19,8	17,8
4IP14EC10	25,8	25,8	22,5	22,0	22,0	21,9	20,6	20,1	20,0
5IP14EC10	35,0	26,6	23,0	23,0	22,2	22,1	21,1	20,8	20,5
6IP14EC10	25,5	25,5	23,1	22,9	22,3	22,0	21,3	20,4	19,7

Fuente: Propia.

**Tabla 32: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 15% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP14EC15	30,2	27,3	27,1	26,4	25,9	24,9	21,5	20,2	19,7
2IP14EC15	32,9	24,7	24,5	24,3	23,9	23,8	23,0	22,0	21,5
3IP14EC15	24,6	24,5	23,8	23,3	23,2	23,1	23,0	22,2	21,6
4IP14EC15	27,9	24,0	23,3	23,2	22,7	22,2	21,8	21,5	19,8
5IP14EC15	24,2	23,4	22,0	21,8	21,8	21,7	21,6	21,4	21,1
6IP14EC15	24,8	23,9	23,5	23,2	23,1	21,8	19,1	18,7	17,4

Fuente: Propia.



**Tabla 33: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 20% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP14EC20	24,0	23,7	23,7	22,5	21,3	21,2	21,0	20,2	19,9
2IP14EC20	32,5	26,0	25,6	24,1	22,8	22,5	22,1	21,5	20,4
3IP14EC20	33,5	27,0	26,0	23,7	23,5	23,2	22,6	22,0	21,5
4IP14EC20	33,5	29,0	25,9	25,8	24,1	24,0	23,9	23,8	23,6
5IP14EC20	25,9	24,2	23,7	23,2	23,0	22,9	22,4	22,2	21,8
6IP14EC20	37,7	25,1	24,8	24,6	24,4	24,0	23,3	22,9	22,3

Fuente: Propia.

**Tabla 34: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 25% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP14EC25	26,1	26,0	25,9	25,7	25,5	25,4	25,3	24,4	24,4
2IP14EC25	33,0	28,1	26,0	25,6	25,1	24,8	24,2	23,0	21,4
3IP14EC25	32,5	28,0	27,5	26,6	26,3	26,3	26,3	25,3	24,0
4IP14EC25	26,0	25,5	25,2	24,9	24,7	24,7	23,8	23,1	20,5
5IP14EC25	28,5	28,1	26,6	25,8	25,3	24,7	22,9	22,8	20,7
6IP14EC25	27,2	26,5	25,8	25,7	25,3	25,2	24,4	24,3	23,7

Fuente: Propia.

**Tabla 35: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 30% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP14EC30	29,8	29,2	27,5	27,1	26,5	26,1	26,0	25,3	22,3
2IP14EC30	26,3	26,2	26,0	25,0	24,6	23,5	22,7	22,6	22,5
3IP14EC30	29,4	29,0	27,0	26,8	26,0	25,9	25,4	25,3	25,2
4IP14EC30	30,9	26,8	26,4	26,3	25,7	25,3	24,0	23,3	22,2
5IP14EC30	28,0	26,1	26,1	25,8	25,7	25,6	25,3	25,0	24,9
6IP14EC30	29,4	28,2	26,0	25,8	25,8	25,5	25,2	24,8	19,6

Fuente: Propia.

**Tabla 36: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 35% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP14EC35	26,0	25,4	25,3	25,1	25,0	24,8	24,5	22,5	22,0
2IP14EC35	31,1	27,5	25,8	25,1	25,0	24,5	24,4	23,7	23,4
3IP14EC35	30,4	28,6	28,0	26,1	26,0	25,7	25,1	24,6	24,5
4IP14EC35	27,8	27,5	26,5	26,3	26,2	25,5	25,2	24,1	23,7
5IP14EC35	29,6	26,5	26,2	26,1	26,0	25,6	24,9	24,8	23,3
6IP14EC35	27,7	26,3	25,8	25,5	25,1	25,0	24,9	24,8	23,7

Fuente: Propia.

**Tabla 37: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 40% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP14EC40	28,3	27,8	27,1	26,8	26,6	26,4	26,0	25,9	25,7
2IP14EC40	28,5	27,3	27,0	26,6	26,5	26,1	25,7	22,6	20,3
3IP14EC40	26,1	25,6	25,0	24,8	24,6	23,7	22,4	22,0	21,9
4IP14EC40	27,4	26,0	25,6	25,0	24,9	24,9	24,6	24,0	23,3
5IP14EC40	30,9	25,6	24,5	24,3	24,1	23,9	23,4	23,3	20,1
6IP14EC40	27,0	25,7	25,6	25,6	25,3	25,0	24,5	24,2	22,8

Fuente: Propia.

**Tabla 38: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 50% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP14EC50	27,2	25,0	24,8	24,6	24,6	24,5	23,7	22,3	21,2
2IP14EC50	27,5	26,0	25,8	25,5	25,2	25,1	24,9	21,1	18,3
3IP14EC50	28,2	24,0	23,6	22,4	22,0	21,1	20,5	20,2	18,0
4IP14EC50	30,5	27,9	26,0	25,5	24,6	24,0	23,9	23,4	19,9
5IP14EC50	23,9	23,6	23,5	23,3	22,9	22,0	21,3	21,1	19,4
6IP14EC50	25,4	25,3	24,6	24,5	23,1	23,0	22,4	22,0	21,3

Fuente: Propia.

**Tabla 39: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 0% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP28EC00	32,7	32,3	27,8	25,8	24,4	23,6	23,4	22,9	19,9
2IP28EC00	26,1	24,5	24,0	23,8	23,5	23,4	23,0	22,9	20,3
3IP28EC00	33,6	25,0	23,9	23,5	22,8	22,3	22,2	22,1	22,0
4IP28EC00	26,3	24,1	24,1	22,3	22,2	21,6	20,6	20,0	19,8
5IP28EC00	24,0	23,5	23,1	22,7	22,6	21,8	20,6	19,6	15,8
6IP28EC00	25,3	24,9	23,6	23,6	23,5	23,5	22,7	22,5	22,2

Fuente: Propia.

**Tabla 40: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 5% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP28EC05	29,7	27,8	26,3	23,5	22,9	22,5	22,1	21,6	20,3
2IP28EC05	24,4	23,6	21,5	21,3	20,9	19,8	19,0	18,6	18,0
3IP28EC05	33,8	33,8	33,3	31,7	28,0	24,0	23,6	22,8	21,0
4IP28EC05	27,9	24,4	24,3	23,9	23,9	23,6	23,5	22,7	21,0
5IP28EC05	34,1	27,4	26,4	24,6	23,8	23,7	23,5	23,2	22,1
6IP28EC05	32,0	28,6	28,6	28,1	28,0	26,1	25,3	25,2	22,9

Fuente: Propia.

**Tabla 41: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 10% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP28EC10	34,8	26,9	26,8	26,7	26,3	26,2	26,2	25,5	25,4
2IP28EC10	26,9	26,1	25,9	25,8	25,1	24,7	23,0	22,7	22,0
3IP28EC10	30,8	27,3	26,5	26,4	25,9	25,5	25,4	24,3	22,7
4IP28EC10	27,0	26,6	26,1	25,8	25,7	25,5	24,7	23,7	22,1
5IP28EC10	25,7	25,0	24,9	24,6	24,4	24,4	24,2	24,0	24,0
6IP28EC10	31,7	28,0	26,1	25,6	24,9	24,6	24,4	24,1	24,0

Fuente: Propia.

**Tabla 42: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 15% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP28EC15	28,5	27,3	25,7	25,6	25,4	25,0	24,9	24,5	24,4
2IP28EC15	32,6	25,3	25,1	25,0	24,6	24,5	24,0	23,8	20,4
3IP28EC15	33,0	29,2	24,6	24,1	24,0	23,9	23,7	23,7	21,4
4IP28EC15	30,7	30,3	29,5	26,3	26,1	26,1	26,0	25,5	25,1
5IP28EC15	28,8	27,3	27,0	26,2	26,1	25,7	25,7	25,5	24,3
6IP28EC15	26,8	26,6	26,1	26,0	25,9	25,7	25,1	25,0	24,7

Fuente: Propia.

**Tabla 43: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 20% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP28EC20	28,8	28,1	26,5	26,3	25,6	25,5	24,6	24,4	24,0
2IP28EC20	26,7	25,8	25,4	25,1	25,1	24,4	24,3	23,5	21,8
3IP28EC20	28,0	26,6	26,2	26,0	25,7	25,5	25,3	25,0	20,3
4IP28EC20	28,7	27,3	27,2	26,4	26,3	26,0	25,6	24,0	23,9
5IP28EC20	33,3	28,8	26,7	26,1	25,9	25,9	25,9	25,7	21,5
6IP28EC20	32,0	27,0	26,4	26,3	26,2	25,9	25,4	25,2	24,8

Fuente: Propia.

**Tabla 44: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 25% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP28EC25	28,6	28,5	28,0	27,8	27,2	26,6	26,6	26,5	25,8
2IP28EC25	27,8	27,4	27,1	26,3	26,2	26,1	25,8	25,5	25,5
3IP28EC25	30,0	28,0	28,0	27,9	26,3	25,7	25,5	25,3	25,1
4IP28EC25	28,9	28,2	27,9	26,8	26,5	26,3	25,8	25,0	24,6
5IP28EC25	34,0	29,3	27,8	27,1	27,0	27,0	27,0	26,8	25,4
6IP28EC25	26,8	26,3	26,1	25,8	25,7	24,9	24,3	24,1	22,7

Fuente: Propia.

**Tabla 45: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 30% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP28EC30	31,6	27,1	27,1	26,9	26,7	26,6	26,0	26,0	26,0
2IP28EC30	28,1	27,5	27,4	27,2	27,0	26,5	26,3	25,6	24,4
3IP28EC30	27,8	27,5	27,3	26,9	26,8	26,6	26,5	24,9	24,9
4IP28EC30	26,6	26,4	26,4	26,2	25,8	25,7	25,3	24,0	23,7
5IP28EC30	29,7	28,7	27,8	27,1	26,5	26,5	26,4	26,1	23,1
6IP28EC30	27,3	27,2	27,1	26,9	26,8	26,6	26,4	25,1	25,0

Fuente: Propia.

**Tabla 46: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 35% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP28EC35	34,0	29,1	28,0	26,6	26,6	26,5	26,5	26,3	25,7
2IP28EC35	28,6	28,0	27,9	27,7	26,8	26,5	26,0	26,0	26,0
3IP28EC35	34,9	28,5	26,7	26,3	26,1	25,8	25,7	25,5	25,3
4IP28EC35	30,0	28,2	28,0	27,7	27,3	27,2	27,1	26,6	26,3
5IP28EC35	34,7	29,6	28,0	27,4	26,7	26,6	25,4	24,3	24,3
6IP28EC35	30,1	27,9	27,6	27,3	26,6	26,5	26,5	25,4	25,3

Fuente: Propia.

**Tabla 47: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 40% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP28EC40	28,0	27,8	26,8	26,4	25,8	23,9	23,6	22,1	21,6
2IP28EC40	27,0	26,0	26,0	25,9	25,6	25,5	24,1	23,6	22,1
3IP28EC40	30,3	27,9	27,1	25,4	25,3	25,1	24,2	24,1	23,9
4IP28EC40	29,5	27,5	26,7	26,0	24,5	23,8	23,2	23,1	22,5
5IP28EC40	31,5	29,3	27,2	25,6	25,5	25,4	24,9	24,3	24,0
6IP28EC40	30,0	27,3	27,0	26,1	25,5	25,1	24,6	24,3	24,2

Fuente: Propia.

**Tabla 48: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 50% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1IP28EC50	28,1	27,9	27,5	27,2	26,6	25,5	23,9	20,3	19,7
2IP28EC50	25,1	24,7	23,9	23,8	22,6	22,6	22,3	21,8	20,8
3IP28EC50	28,2	27,0	26,1	25,3	25,2	24,9	20,3	19,5	18,1
4IP28EC50	28,2	24,0	23,1	22,8	22,7	22,3	21,9	21,8	21,8
5IP28EC50	28,1	24,2	23,3	22,7	22,7	22,6	22,5	22,2	20,1
6IP28EC50	24,7	24,2	24,1	23,8	23,7	23,6	23,6	22,6	21,5

Fuente: Propia.

Los datos obtenidos del ensayo de índice de rebote aplicado a las probetas fabricadas con cemento tipo V se muestran en las tablas siguientes.

**Tabla 49: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 0% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV07EC00	21,1	20,8	19,7	19,5	18,2	17,1	17,0	16,8	15,0
2VV07EC00	22,8	22,1	21,3	20,8	20,6	20,1	20,1	19,9	18,1
3VV07EC00	20,7	20,3	19,9	19,8	18,8	18,0	17,2	17,1	15,8
4VV07EC00	25,0	23,8	22,9	22,5	22,0	21,9	21,7	19,9	17,5
5VV07EC00	25,9	23,5	23,0	22,5	20,7	20,0	19,8	17,8	16,2
6VV07EC00	21,6	21,3	20,7	20,5	20,4	19,5	19,3	19,1	18,5

Fuente: Propia.

**Tabla 50: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 5% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV07EC05	27,8	23,4	23,3	22,1	22,0	21,8	21,6	21,5	18,6
2VV07EC05	24,7	23,3	22,7	22,3	21,9	21,6	21,4	20,8	20,6
3VV07EC05	26,8	24,2	24,0	23,9	23,1	23,1	22,5	21,4	20,7
4VV07EC05	24,1	23,1	23,0	22,2	21,8	21,7	21,2	21,1	20,8
5VV07EC05	24,0	22,7	22,5	21,9	21,8	21,7	21,4	20,8	20,0
6VV07EC05	23,3	23,2	22,7	22,5	22,2	22,1	21,9	21,8	20,7

Fuente: Propia.

**Tabla 51: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 10% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV07EC10	24,2	22,8	22,3	21,5	21,5	20,4	19,9	19,0	18,0
2VV07EC10	21,8	21,6	21,6	20,9	20,8	20,4	19,7	19,7	19,4
3VV07EC10	28,8	28,4	25,1	22,8	22,7	21,1	18,7	18,1	16,6
4VV07EC10	27,9	27,2	26,2	25,9	23,3	22,8	22,0	21,4	20,1
5VV07EC10	32,0	29,6	27,7	27,6	25,1	24,1	23,5	23,0	22,8
6VV07EC10	25,5	24,6	23,1	23,1	23,0	22,4	21,1	20,5	19,1

Fuente: Propia.

**Tabla 52: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 15% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV07EC15	29,1	24,2	24,1	23,5	22,9	21,5	20,0	19,5	19,4
2VV07EC15	33,5	29,3	28,0	25,9	25,0	24,6	24,4	23,8	22,4
3VV07EC15	30,4	25,1	24,5	24,2	24,0	24,0	23,8	23,6	22,5
4VV07EC15	29,7	25,4	24,0	23,8	23,6	22,5	22,1	21,3	21,2
5VV07EC15	29,7	27,8	25,6	24,8	23,5	23,5	22,5	21,9	20,0
6VV07EC15	27,0	25,8	25,1	24,5	24,1	23,5	23,3	23,2	23,0

Fuente: Propia.

**Tabla 53: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 20% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV07EC20	26,8	25,7	25,1	24,6	24,3	23,8	21,0	20,4	18,8
2VV07EC20	30,1	27,8	26,9	26,8	26,1	25,5	24,2	23,4	23,3
3VV07EC20	30,2	27,8	26,0	24,1	22,9	22,8	22,6	21,6	19,1
4VV07EC20	28,0	26,0	25,5	25,1	24,2	23,4	22,4	20,8	19,7
5VV07EC20	29,7	27,5	26,8	25,3	24,5	24,0	21,9	21,8	18,1
6VV07EC20	26,7	26,0	25,9	25,0	24,7	24,3	23,0	22,2	21,7

Fuente: Propia.

**Tabla 54: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 25% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV07EC25	25,7	25,1	25,0	24,6	24,3	24,3	24,0	23,9	21,9
2VV07EC25	26,5	26,3	25,5	25,1	24,9	23,8	23,8	23,7	19,7
3VV07EC25	27,8	25,6	25,4	24,5	24,4	24,0	23,8	21,3	19,8
4VV07EC25	26,1	25,8	25,5	25,4	25,1	25,0	24,3	21,2	18,1
5VV07EC25	28,0	26,5	26,1	25,8	25,5	25,1	24,0	20,5	19,9
6VV07EC25	25,5	25,5	24,8	24,7	24,3	24,1	23,8	23,8	22,4

Fuente: Propia.

**Tabla 55: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 30% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV07EC30	28,3	28,1	25,0	24,9	24,6	24,5	24,0	23,8	21,9
2VV07EC30	28,2	26,8	25,1	24,4	23,9	23,5	23,0	22,7	22,4
3VV07EC30	28,2	27,3	26,7	25,8	23,8	23,6	23,5	22,8	21,7
4VV07EC30	30,1	29,8	28,1	27,0	25,3	24,8	23,8	22,7	22,1
5VV07EC30	26,8	26,7	26,4	26,0	25,7	25,4	23,7	22,3	21,8
6VV07EC30	27,1	25,7	25,6	25,3	25,0	24,5	24,4	23,7	23,4

Fuente: Propia.

**Tabla 56: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 35% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV07EC35	27,5	26,6	25,3	25,1	24,6	24,4	24,0	23,4	22,0
2VV07EC35	30,8	26,5	26,5	25,5	25,3	24,0	23,9	23,8	23,8
3VV07EC35	30,2	25,1	24,6	23,5	22,9	22,9	22,4	21,4	21,4
4VV07EC35	28,0	26,9	26,7	26,5	25,3	25,1	24,4	24,0	22,4
5VV07EC35	28,6	28,3	27,4	26,4	26,1	25,3	24,8	22,0	21,6
6VV07EC35	26,8	26,1	25,8	25,5	24,7	24,5	24,3	23,4	23,3

Fuente: Propia.



**Tabla 57: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 40% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV07EC40	23,3	23,8	25,4	23,2	27,1	24,2	23,0	22,5	21,9
2VV07EC40	25,0	25,9	26,1	25,1	24,4	23,0	24,5	25,1	22,3
3VV07EC40	25,2	23,8	27,5	27,7	22,2	24,1	23,5	22,9	24,0
4VV07EC40	24,1	21,8	23,8	26,2	25,6	24,1	23,6	23,7	19,5
5VV07EC40	26,0	27,2	30,0	21,1	29,7	25,8	25,9	25,1	24,6
6VV07EC40	24,3	24,1	25,8	23,1	22,9	24,8	25,0	24,4	20,8

Fuente: Propia.

**Tabla 58: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 50% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV07EC50	26,8	26,7	26,0	25,5	24,7	23,0	21,5	20,0	17,9
2VV07EC50	27,2	26,5	26,2	26,1	25,4	23,5	22,2	19,5	18,0
3VV07EC50	30,9	27,7	25,6	25,1	24,8	24,2	23,8	22,9	20,0
4VV07EC50	27,8	26,5	26,0	24,9	22,2	20,2	18,4	18,4	17,6
5VV07EC50	26,3	26,1	25,0	24,6	24,5	24,3	24,0	21,5	21,0
6VV07EC50	25,8	25,4	25,1	24,9	23,6	23,1	22,2	22,0	20,5

Fuente: Propia.

**Tabla 59: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 0% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV14EC00	27,2	24,6	24,0	23,8	23,8	23,2	22,8	22,6	19,8
2VV14EC00	30,0	24,1	23,9	23,7	23,5	23,2	23,2	23,1	22,0
3VV14EC00	25,2	24,9	24,5	23,9	23,6	22,5	21,2	20,8	17,5
4VV14EC00	25,0	24,2	23,9	23,7	23,7	23,6	23,4	23,1	23,0
5VV14EC00	25,3	25,0	24,9	24,7	24,5	23,9	22,7	21,7	21,4
6VV14EC00	24,8	24,4	24,2	24,0	23,7	23,4	22,9	22,9	22,1

Fuente: Propia.

**Tabla 60: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 5% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV14EC05	26,9	26,1	25,7	25,2	24,6	24,2	24,1	22,8	20,1
2VV14EC05	34,8	25,0	24,8	24,5	23,6	22,5	22,1	21,0	19,8
3VV14EC05	28,3	27,8	26,2	25,7	25,4	22,1	21,6	20,5	19,9
4VV14EC05	28,9	26,5	26,1	24,9	23,8	22,9	22,6	22,3	22,0
5VV14EC05	32,2	29,6	27,8	26,8	26,5	26,4	26,1	24,1	23,8
6VV14EC05	26,0	25,5	25,3	25,1	24,9	24,7	24,6	24,5	24,2

Fuente: Propia.

**Tabla 61: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 10% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV14EC10	25,6	25,2	25,1	25,1	24,9	24,8	23,5	22,9	20,6
2VV14EC10	31,5	27,0	26,6	26,5	26,2	25,3	24,9	24,7	24,2
3VV14EC10	31,1	27,5	27,3	26,1	25,6	24,9	24,6	23,9	23,8
4VV14EC10	29,2	26,0	25,6	25,5	25,2	24,9	24,5	23,9	22,0
5VV14EC10	28,8	25,0	24,9	24,8	24,1	24,1	23,8	23,8	22,0
6VV14EC10	25,2	24,6	24,6	24,1	23,9	23,8	23,8	22,1	21,5

Fuente: Propia.

**Tabla 62: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 15% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV14EC15	29,9	27,7	26,0	25,6	24,9	24,2	22,6	21,2	21,1
2VV14EC15	29,7	28,5	25,4	25,3	24,8	24,3	23,2	22,7	22,0
3VV14EC15	28,1	27,3	26,4	25,9	25,7	25,7	24,6	24,0	23,1
4VV14EC15	29,1	28,0	26,1	25,8	25,7	25,5	25,0	24,9	23,2
5VV14EC15	30,5	26,1	26,1	25,8	25,4	25,0	24,0	23,9	21,3
6VV14EC15	28,1	26,6	26,3	25,8	25,7	25,3	24,8	24,4	23,8

Fuente: Propia.

**Tabla 63: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 20% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV14EC20	35,1	27,0	26,6	24,9	24,9	24,4	23,8	23,7	23,4
2VV14EC20	27,7	25,8	25,5	25,5	25,3	25,1	24,9	24,9	21,8
3VV14EC20	32,0	27,1	26,3	26,2	25,7	24,4	24,0	22,9	20,6
4VV14EC20	27,5	26,6	26,2	26,0	25,8	24,9	24,8	24,3	24,2
5VV14EC20	30,2	28,5	26,1	26,0	25,5	25,2	25,2	24,8	24,7
6VV14EC20	27,2	26,8	26,3	26,0	25,4	25,3	25,1	25,0	24,8

Fuente: Propia.

**Tabla 64: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 25% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV14EC25	27,9	27,9	27,6	27,4	27,0	26,6	26,5	25,7	24,5
2VV14EC25	38,0	30,6	25,9	25,8	25,1	24,1	24,0	23,9	23,6
3VV14EC25	29,0	28,2	28,0	26,6	26,1	25,5	25,0	24,6	23,0
4VV14EC25	33,6	28,0	27,6	27,1	26,3	26,2	25,9	25,6	25,5
5VV14EC25	27,1	27,0	26,4	26,2	26,1	25,9	25,6	25,5	25,5
6VV14EC25	28,2	27,6	26,5	26,3	26,0	25,5	24,9	24,3	23,3

Fuente: Propia.

**Tabla 65: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 30% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV14EC30	33,8	32,7	29,1	27,5	27,4	27,1	26,9	26,6	25,2
2VV14EC30	28,9	27,6	27,4	27,4	27,4	27,3	27,0	26,8	26,3
3VV14EC30	26,5	26,3	26,0	25,9	25,9	25,8	25,5	25,4	23,5
4VV14EC30	27,4	27,3	26,9	26,6	26,4	26,3	26,1	25,7	24,6
5VV14EC30	29,7	28,3	28,2	27,5	27,3	27,1	27,0	26,5	26,1
6VV14EC30	28,2	28,1	27,3	27,2	26,8	26,5	26,4	26,3	26,0

Fuente: Propia.

**Tabla 66: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 35% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV14EC35	32,0	32,0	27,8	27,7	27,6	27,6	27,1	26,8	25,9
2VV14EC35	28,0	27,7	27,4	27,2	26,9	26,6	25,5	25,3	25,3
3VV14EC35	28,4	28,1	28,0	27,9	27,6	27,4	27,0	26,8	26,5
4VV14EC35	32,6	28,5	28,2	27,5	27,2	27,0	26,8	26,2	25,0
5VV14EC35	27,9	27,8	27,0	27,0	26,6	26,5	26,4	26,1	25,8
6VV14EC35	28,8	27,6	27,5	27,5	27,4	27,2	26,8	26,7	26,1

Fuente: Propia.

**Tabla 67: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 40% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV14EC40	29,7	28,1	27,8	26,2	26,0	25,9	24,8	24,5	24,5
2VV14EC40	30,2	27,3	26,2	26,1	25,3	25,1	24,8	24,2	23,6
3VV14EC40	32,9	28,0	26,6	26,5	26,2	25,4	23,9	23,8	20,8
4VV14EC40	30,1	28,8	26,3	26,0	25,3	24,8	24,5	24,3	24,2
5VV14EC40	28,0	27,5	27,0	26,7	25,5	25,1	24,5	24,4	24,0
6VV14EC40	28,1	27,6	26,6	26,1	25,9	25,8	25,5	25,1	24,7

Fuente: Propia.

**Tabla 68: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 50% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV14EC50	30,1	29,7	27,5	26,1	25,9	25,4	25,3	24,5	24,0
2VV14EC50	28,8	28,6	26,1	24,9	24,9	23,8	23,1	22,9	17,5
3VV14EC50	26,3	26,1	25,8	25,7	25,5	24,6	24,2	24,0	21,1
4VV14EC50	26,1	26,1	25,6	24,6	24,5	24,1	24,1	23,9	23,4
5VV14EC50	26,6	26,1	25,8	25,6	25,1	24,3	24,1	22,7	21,3
6VV14EC50	26,1	26,1	25,5	25,4	25,3	24,7	24,5	24,5	23,3

Fuente: Propia.

**Tabla 69: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 0% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV28EC00	29,5	27,0	25,3	25,2	25,0	24,6	24,1	23,7	18,5
2VV28EC00	28,5	27,3	26,7	26,5	26,1	25,6	25,4	24,9	23,3
3VV28EC00	28,0	27,2	26,0	25,7	24,9	24,1	24,0	23,9	23,3
4VV28EC00	27,3	27,2	26,8	26,3	26,2	26,2	26,1	24,5	23,8
5VV28EC00	28,1	27,4	27,0	26,8	26,8	26,7	26,1	26,1	25,5
6VV28EC00	27,1	26,8	26,1	25,5	25,4	25,3	25,2	25,1	23,5

Fuente: Propia.

**Tabla 70: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 5% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV28EC05	30,1	29,2	27,1	26,8	26,8	26,6	26,3	25,8	24,8
2VV28EC05	28,2	26,9	25,6	25,5	24,9	24,1	24,0	23,0	22,3
3VV28EC05	31,0	30,2	30,1	29,7	29,6	25,3	24,8	23,9	23,5
4VV28EC05	32,0	31,4	29,2	27,3	27,1	27,1	27,1	26,6	26,2
5VV28EC05	28,0	27,8	27,8	27,5	27,5	27,4	26,9	26,8	26,3
6VV28EC05	28,0	27,0	25,8	25,8	24,6	24,3	24,2	24,2	23,7

Fuente: Propia.

**Tabla 71: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 10% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV28EC10	34,0	34,0	33,1	29,4	28,4	28,1	26,9	26,5	23,8
2VV28EC10	26,4	25,8	25,6	25,4	24,2	24,1	21,2	20,0	17,5
3VV28EC10	30,1	28,5	28,3	28,1	27,4	27,0	26,9	26,0	25,3
4VV28EC10	36,3	30,1	28,6	28,2	28,0	27,3	27,3	25,8	25,3
5VV28EC10	33,9	31,3	29,1	29,1	29,1	28,6	28,1	27,8	24,6
6VV28EC10	28,7	28,6	28,4	28,0	27,6	27,5	27,4	26,3	25,9

Fuente: Propia.

**Tabla 72: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 15% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV28EC15	33,8	29,8	28,5	28,0	27,2	27,1	26,7	26,3	26,0
2VV28EC15	35,2	32,3	30,8	30,0	29,1	28,1	27,8	26,8	26,4
3VV28EC15	34,2	29,3	28,5	28,4	28,3	28,1	27,6	27,2	27,1
4VV28EC15	32,1	29,9	28,0	27,4	27,1	26,6	26,2	25,5	24,8
5VV28EC15	32,7	27,8	27,8	27,4	27,3	26,8	26,7	26,7	26,0
6VV28EC15	37,8	28,2	28,0	27,6	27,4	27,3	26,1	26,0	25,8

Fuente: Propia.

**Tabla 73: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 20% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV28EC20	31,8	31,5	30,8	30,3	30,0	29,8	28,9	26,5	26,3
2VV28EC20	34,7	32,1	31,9	31,1	30,5	29,2	29,0	28,7	26,0
3VV28EC20	28,1	27,6	27,6	27,3	27,2	25,7	24,5	24,2	23,8
4VV28EC20	30,2	29,0	29,0	28,0	27,7	26,5	25,9	24,3	23,9
5VV28EC20	28,0	27,8	27,5	26,9	26,6	26,0	25,7	25,0	24,8
6VV28EC20	33,2	31,5	30,6	30,5	30,2	29,9	28,9	28,2	26,9

Fuente: Propia.

**Tabla 74: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 25% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV28EC25	30,3	29,8	29,4	29,2	28,7	28,0	27,2	26,1	25,2
2VV28EC25	38,5	36,1	29,6	28,7	28,1	27,8	27,3	26,8	26,0
3VV28EC25	33,7	29,3	28,8	28,3	27,5	27,4	26,8	26,6	24,1
4VV28EC25	33,8	30,0	28,9	28,8	27,0	26,7	25,9	24,7	24,0
5VV28EC25	38,3	29,8	28,5	27,8	27,7	27,4	27,0	26,3	24,3
6VV28EC25	32,1	29,8	29,3	28,5	28,1	27,6	27,2	27,1	26,4

Fuente: Propia.

**Tabla 75: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 30% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV28EC30	38,3	34,5	34,2	33,0	30,5	30,1	29,7	29,4	27,5
2VV28EC30	36,2	30,1	29,4	29,1	28,6	27,9	26,1	25,8	25,5
3VV28EC30	32,5	32,0	29,7	28,3	28,0	27,5	27,4	27,3	26,6
4VV28EC30	35,5	30,2	29,9	29,9	27,9	27,8	27,3	26,0	25,8
5VV28EC30	30,5	30,1	29,8	28,8	28,1	27,9	26,9	26,9	26,3
6VV28EC30	35,8	35,6	35,3	33,9	30,2	29,7	29,7	29,5	29,1

Fuente: Propia.

**Tabla 76: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 35% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV28EC35	36,1	36,1	35,7	34,2	34,0	31,3	28,8	27,9	25,6
2VV28EC35	38,0	34,3	33,9	33,6	29,8	28,1	27,3	26,9	24,2
3VV28EC35	38,0	34,9	32,1	31,7	31,2	30,2	29,7	29,0	27,6
4VV28EC35	35,6	34,7	30,2	30,1	29,1	29,0	28,2	28,2	27,6
5VV28EC35	32,1	30,1	28,5	28,1	27,7	27,4	27,0	26,2	26,0
6VV28EC35	36,0	33,8	30,5	30,1	29,1	28,8	28,8	28,0	27,8

Fuente: Propia.

**Tabla 77: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 40% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV28EC40	33,4	31,3	29,2	29,0	28,6	28,6	28,2	28,0	27,9
2VV28EC40	37,8	34,9	30,3	30,0	29,8	29,3	28,7	28,5	28,1
3VV28EC40	33,9	33,4	31,8	30,7	30,5	30,5	30,0	29,6	29,1
4VV28EC40	32,3	30,8	30,0	30,0	29,3	28,5	28,2	28,1	28,0
5VV28EC40	37,4	33,5	32,0	32,0	31,1	30,0	29,7	29,4	28,5
6VV28EC40	32,1	32,0	31,0	30,5	30,1	30,0	29,3	28,5	27,7

Fuente: Propia.

**Tabla 78: Disparo de esclerómetro aplicado a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 50% EFC.**

Código de espécimen	Disparo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1VV28EC50	30,7	30,5	29,9	29,0	28,5	28,0	26,1	25,9	24,4
2VV28EC50	35,8	30,2	29,6	29,1	28,6	27,3	27,3	25,5	20,7
3VV28EC50	29,3	28,9	28,9	28,0	27,9	27,8	27,5	27,0	26,0
4VV28EC50	34,2	30,2	30,1	28,5	27,4	26,9	26,3	25,3	23,9
5VV28EC50	30,1	29,3	29,1	28,8	28,3	27,8	27,6	26,4	25,9
6VV28EC50	30,3	29,2	29,0	28,5	27,8	27,7	27,3	27,1	26,1

Fuente: Propia.

La metodología indica que se debe hacer un promedio de los disparos realizados —9 en este caso— y descartar los valores que excedan las 6 unidades de diferencia por encima y por debajo de dicho promedio. Con los datos restantes se vuelve a calcular un promedio y se desechan los datos de acuerdo al mismo criterio. Si más de dos datos de la segunda serie tienen una diferencia de 6 unidades respecto al nuevo promedio, la norma recomienda desechar todo el ensayo.

### 3.5.10.2. Ensayo de compresión axial de probetas cilíndricas de concreto

#### a. Equipos utilizados y materiales

- Máquina de compresión axial.
- Carretilla.
- Guantes de carnaza.
- Brocha.

#### b. Procedimiento

Previamente tuvo que verificarse que las probetas cumplan con lo establecido en NTP 399.033 respecto a dimensiones, fabricación y curado.

El ensayo fue realizado de acuerdo a lo establecido en NTP 339.034.

- Se procuró que el ensayo se realice poco tiempo después de retirar las briquetas del agua, propiciando condiciones que eviten pérdida de humedad durante su manipulación y transporte.



- **Mediciones:** El diámetro de la probeta se determinó con un calibrador micrométrico (vernier), con aproximación de 0,1 mm. Se midió dos veces el diámetro de la sección de la briqueta que hizo contacto con el émbolo retráctil de la máquina de compresión axial y se usó el valor promedio de ambas mediciones para calcular la resistencia a la compresión.
- También se midió tres veces la altura de la probeta en puntos equidistantes sobre el perímetro del cilindro.
- **Colocación de la probeta:** Antes de empezar con el ensayo de compresión se tuvo que limpiar cuidadosamente las superficies planas de contacto de la máquina; también se limpiaron las caras planas de cada espécimen. Se tuvo que poner atención para lograr un adecuado centrado al momento de colocar la probeta en la máquina de compresión.
- **Velocidad de carga:** La máquina de compresión que posee el Laboratorio de la Facultad tiene control digital, por lo que se pudo garantizar una velocidad de carga continua y constante, desde el inicio hasta la falla de la muestra.
- De inmediato, se registró en una guía de observación el valor de la carga máxima, el tipo de falla y observaciones relevantes.
- Finalmente, se retiraron las partículas resultantes de la falla de las probetas, y se procuró eliminar todo remanente de material.



Fuente: Propia.

**Figura 60: Registro de dimensiones y peso de probetas.**



Fuente: Propia.

**Figura 61: Colocación de probetas en la máquina de compresión.**



Fuente: Propia.

**Figura 62: Ensayo de compresión axial de probetas.**



Fuente: Propia.

**Figura 63: Probeta de concreto luego de la falla.**



Fuente: Propia.

**Figura 64: Supervisión de ensayos por parte del asesor de tesis.**



Fuente: Propia.

**Figura 65: Verificación de ensayos por parte de los dictaminantes.**

**c. Toma de datos**

Previamente, empleando vernier, cinta métrica y balanza, se recopiló información sobre las características físicas de cada probeta (altura, peso y diámetro), para darle solidez y consistencia al trabajo de investigación.

**Tabla 79: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 0% de EFC.**

**Características físicas de las probetas**

Responsable: Juan Díaz y Miguel Bravo  
Fecha: 05/09/2016 y posterior Temperatura: 21 °C  
Lugar: Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC  
Observaciones: \_\_\_\_\_

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP07EC00	30,10	30,00	30,10	15,020	15,072	12,64
2IP07EC00	29,90	30,05	30,15	14,962	15,396	12,62
3IP07EC00	29,91	30,05	29,80	15,620	15,058	12,61
4IP07EC00	30,22	30,20	30,15	15,422	14,924	12,70
5IP07EC00	29,90	29,50	29,90	15,182	15,266	12,22
6IP07EC00	29,90	29,70	29,90	15,244	15,173	12,42

Fuente: Propia.

**Tabla 80: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 5% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP07EC05	29,90	29,85	30,00	15,196	15,180	12,78
2IP07EC05	29,90	29,70	29,80	15,146	15,228	12,65
3IP07EC05	29,80	29,80	29,90	15,154	14,842	12,64
4IP07EC05	30,05	29,80	29,95	15,386	15,096	12,46
5IP07EC05	30,35	30,30	30,05	15,244	15,182	12,75
6IP07EC05	30,00	30,10	30,00	15,197	15,141	12,72

Fuente: Propia.

**Tabla 81: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 10% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP07EC10	29,85	29,70	29,85	15,090	15,200	12,39
2IP07EC10	29,55	29,68	29,63	15,320	14,824	12,21
3IP07EC10	29,40	29,70	29,40	15,280	15,252	12,33
4IP07EC10	29,85	29,45	29,50	15,324	15,270	12,36
5IP07EC10	30,09	30,00	30,00	15,268	15,190	12,49
6IP07EC10	29,80	29,90	29,90	15,245	15,146	12,40

Fuente: Propia.

**Tabla 82: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 15% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP07EC15	29,82	29,75	29,68	15,182	15,236	12,45
2IP07EC15	30,10	30,10	30,10	15,334	14,804	12,72
3IP07EC15	29,90	29,90	29,78	15,282	15,210	12,27
4IP07EC15	30,15	29,90	30,20	14,922	15,270	12,58
5IP07EC15	29,90	29,90	30,15	15,128	15,300	12,63
6IP07EC15	29,90	30,10	30,00	15,149	15,177	12,70

Fuente: Propia.

**Tabla 83: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 20% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP07EC20	30,15	29,85	30,00	15,260	15,040	13,00
2IP07EC20	29,45	29,40	29,75	15,138	15,300	12,41
3IP07EC20	29,50	29,85	29,70	15,390	15,090	12,47
4IP07EC20	29,80	29,70	29,55	15,170	15,226	12,61
5IP07EC20	29,70	29,60	29,75	15,540	14,762	12,62
6IP07EC20	30,20	30,00	30,10	15,278	15,121	12,96

Fuente: Propia.



**Tabla 84: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 25% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP07EC25	29,85	29,70	29,80	15,400	15,228	12,65
2IP07EC25	30,05	30,25	29,95	15,364	14,898	12,94
3IP07EC25	30,30	30,35	30,15	14,862	15,306	12,93
4IP07EC25	29,55	29,50	29,60	15,316	14,912	12,38
5IP07EC25	29,70	29,80	29,80	15,050	15,210	12,73
6IP07EC25	30,10	30,00	29,80	15,200	15,075	12,82

Fuente: Propia.

**Tabla 85: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 30% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP07EC30	29,70	29,60	29,65	15,244	14,988	12,41
2IP07EC30	29,40	29,70	29,60	15,178	15,184	11,93
3IP07EC30	30,20	30,10	30,20	15,168	15,318	12,52
4IP07EC30	29,60	29,35	29,55	15,388	14,786	12,11
5IP07EC30	30,15	29,80	30,10	15,184	15,216	12,02
6IP07EC30	29,60	29,80	29,90	15,245	15,028	12,26

Fuente: Propia.

**Tabla 86: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 35% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP07EC35	30,05	29,90	30,00	15,170	14,802	12,52
2IP07EC35	29,50	29,80	29,70	15,082	14,900	12,36
3IP07EC35	29,70	29,65	29,70	15,208	15,178	12,16
4IP07EC35	30,10	30,20	30,30	14,960	15,164	11,99
5IP07EC35	30,20	30,30	30,20	15,354	15,144	14,47
6IP07EC35	30,00	29,70	29,80	15,098	15,117	12,42

Fuente: Propia.

**Tabla 87: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 40% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP07EC40	29,40	29,45	29,55	15,252	15,122	12,70
2IP07EC40	29,75	30,00	30,00	15,222	15,122	12,86
3IP07EC40	29,80	29,70	29,60	14,948	15,272	12,49
4IP07EC40	29,70	29,45	29,65	15,118	14,972	12,51
5IP07EC40	29,90	30,20	30,15	15,158	15,302	12,92
6IP07EC40	30,10	29,80	29,80	15,156	15,104	12,80

Fuente: Propia.

**Tabla 88: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 7 días de curado, 50% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP07EC50	29,65	29,50	29,60	15,300	15,152	12,52
2IP07EC50	29,55	29,60	29,60	15,288	15,066	12,51
3IP07EC50	30,27	30,20	30,40	15,248	14,948	13,07
4IP07EC50	29,80	29,50	29,55	14,900	15,366	12,58
5IP07EC50	29,90	29,90	29,90	15,182	15,194	12,99
6IP07EC50	30,10	29,80	30,00	15,210	15,109	13,02

Fuente: Propia.

**Tabla 89: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 0% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP14EC00	30,00	30,00	30,15	15,202	15,198	12,63
2IP14EC00	30,25	30,25	30,20	14,782	15,370	12,75
3IP14EC00	30,10	29,90	30,00	14,772	15,358	12,48
4IP14EC00	29,90	29,95	29,95	15,190	15,212	12,60
5IP14EC00	30,09	30,20	30,10	15,380	15,148	12,77
6IP14EC00	30,00	30,10	29,80	15,042	15,281	12,60

Fuente: Propia.

**Tabla 90: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 5% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP14EC05	30,25	29,90	30,30	15,252	15,236	12,70
2IP14EC05	30,40	30,40	30,40	15,260	15,198	12,86
3IP14EC05	30,30	30,25	30,20	15,284	15,110	13,03
4IP14EC05	30,45	30,05	30,40	15,182	14,968	12,78
5IP14EC05	30,40	30,30	30,20	15,088	14,922	13,07
6IP14EC05	30,35	30,05	30,15	15,198	15,134	12,84

Fuente: Propia.

**Tabla 91: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 10% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP14EC10	30,00	29,65	29,80	14,926	15,268	12,53
2IP14EC10	30,15	30,10	30,25	15,282	15,088	12,71
3IP14EC10	29,95	29,90	30,05	15,180	15,254	12,66
4IP14EC10	30,20	30,10	30,05	15,194	15,234	12,90
5IP14EC10	30,20	30,30	30,15	15,256	15,290	12,85
6IP14EC10	30,00	30,10	30,00	15,147	15,249	12,76

Fuente: Propia.

**Tabla 92: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 15% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP14EC15	30,15	30,30	30,40	14,758	15,178	13,06
2IP14EC15	30,35	30,05	30,20	15,082	15,302	12,87
3IP14EC15	30,00	29,90	30,00	15,188	15,210	12,88
4IP14EC15	29,60	29,60	29,55	15,198	15,194	12,44
5IP14EC15	29,85	29,80	29,00	15,348	15,116	12,63
6IP14EC15	29,90	30,00	30,05	15,154	15,162	12,82

Fuente: Propia.



**Tabla 93: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 20% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP14EC20	30,17	30,15	30,05	15,136	15,144	12,74
2IP14EC20	30,10	30,00	30,00	15,248	15,178	12,78
3IP14EC20	29,90	30,00	30,15	14,944	15,164	12,64
4IP14EC20	30,00	30,10	30,10	14,822	15,590	12,84
5IP14EC20	29,75	29,90	29,70	15,220	15,212	12,35
6IP14EC20	29,80	29,70	30,00	15,174	15,158	12,59

Fuente: Propia.

**Tabla 94: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 25% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP14EC25	29,60	29,90	29,95	15,098	15,200	12,61
2IP14EC25	30,40	30,30	30,50	15,182	15,194	13,07
3IP14EC25	30,50	30,40	30,25	15,190	15,228	13,05
4IP14EC25	30,10	30,10	30,00	15,222	15,156	12,76
5IP14EC25	29,65	29,80	29,70	15,412	14,738	12,39
6IP14EC25	30,10	30,10	29,80	15,245	15,068	12,98

Fuente: Propia.

**Tabla 95: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 30% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP14EC30	29,50	29,25	29,40	15,256	15,186	12,24
2IP14EC30	29,90	30,10	30,05	15,100	15,178	12,80
3IP14EC30	29,80	29,60	29,82	15,238	14,962	12,61
4IP14EC30	29,85	29,80	29,70	15,200	15,180	12,74
5IP14EC30	29,90	29,60	29,85	15,198	14,932	12,50
6IP14EC30	29,70	29,70	29,80	15,205	15,068	12,64

Fuente: Propia.



**Tabla 96: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 35% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP14EC35	30,40	30,55	30,40	15,082	15,278	13,21
2IP14EC35	30,00	29,85	30,00	15,180	15,214	12,53
3IP14EC35	29,80	29,78	30,00	15,254	15,200	12,65
4IP14EC35	30,40	30,20	30,25	15,178	15,208	12,88
5IP14EC35	30,15	30,00	30,20	15,360	15,262	12,92
6IP14EC35	29,80	29,90	29,85	15,122	15,212	12,72

Fuente: Propia.

**Tabla 97: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 40% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP14EC40	26,50	29,50	29,55	15,320	15,196	12,93
2IP14EC40	29,80	29,80	29,60	15,218	15,242	12,88
3IP14EC40	29,80	29,70	29,70	15,210	15,080	12,89
4IP14EC40	29,80	29,60	29,40	15,132	15,206	12,70
5IP14EC40	29,40	29,40	29,40	15,242	14,702	12,52
6IP14EC40	29,80	29,70	29,70	15,179	15,132	12,84

Fuente: Propia.

**Tabla 98: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 14 días de curado, 50% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP14EC50	29,85	30,00	30,10	15,208	15,208	12,93
2IP14EC50	29,45	29,55	29,50	14,974	15,162	12,59
3IP14EC50	29,90	30,20	29,90	15,100	15,342	13,11
4IP14EC50	29,45	29,40	29,55	14,712	15,288	12,57
5IP14EC50	29,70	30,15	30,05	15,198	15,194	13,04
6IP14EC50	29,80	30,00	30,00	15,136	15,141	12,95

Fuente: Propia.

**Tabla 99: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 0% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP28EC00	29,90	30,15	30,00	15,000	14,886	12,80
2IP28EC00	30,45	30,40	30,60	15,270	15,162	13,01
3IP28EC00	29,90	30,00	29,95	14,800	15,408	12,61
4IP28EC00	30,60	30,50	30,50	15,226	15,201	13,10
5IP28EC00	30,20	30,15	30,25	15,198	15,230	11,36
6IP28EC00	29,90	29,90	29,90	15,096	15,174	12,62

Fuente: Propia.

**Tabla 100: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 5% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP28EC05	29,95	29,85	29,95	14,820	15,240	12,28
2IP28EC05	29,85	30,00	29,80	15,402	14,716	12,23
3IP28EC05	30,60	30,50	30,35	15,232	15,234	13,15
4IP28EC05	30,40	30,35	30,30	15,228	15,222	13,06
5IP28EC05	30,10	30,20	29,90	15,194	15,356	13,01
6IP28EC05	29,90	29,90	30,35	15,240	15,144	12,70

Fuente: Propia.

**Tabla 101: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 10% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP28EC10	29,75	30,00	29,85	15,174	15,050	12,60
2IP28EC10	30,30	30,20	30,20	15,302	15,004	13,10
3IP28EC10	30,00	30,20	30,00	15,206	15,193	12,71
4IP28EC10	29,70	29,19	29,65	15,304	14,970	12,61
5IP28EC10	30,60	60,10	30,40	15,300	15,152	13,06
6IP28EC10	29,80	29,80	30,00	15,250	15,095	12,95

Fuente: Propia.

**Tabla 102: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 15% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP28EC15	30,30	30,40	30,40	15,034	15,100	13,09
2IP28EC15	30,40	30,15	30,15	15,236	15,900	13,03
3IP28EC15	29,45	29,75	29,75	15,878	15,294	12,51
4IP28EC15	30,10	30,10	30,00	14,812	15,480	13,00
5IP28EC15	29,70	30,30	29,90	15,296	15,100	13,06
6IP28EC15	30,40	30,55	30,40	15,248	15,376	13,20

Fuente: Propia.

**Tabla 103: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 20% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP28EC20	29,50	29,50	29,75	15,308	15,242	12,60
2IP28EC20	30,20	30,20	30,10	15,288	15,100	13,04
3IP28EC20	30,35	29,90	30,15	15,402	14,704	12,90
4IP28EC20	29,70	29,60	30,00	15,208	15,300	12,77
5IP28EC20	30,35	30,00	30,20	15,206	15,312	13,14
6IP28EC20	29,90	30,00	29,80	15,222	15,250	12,82

Fuente: Propia.

**Tabla 104: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 25% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP28EC25	29,50	29,45	29,40	15,446	14,868	12,68
2IP28EC25	30,00	29,90	30,05	15,052	15,272	12,70
3IP28EC25	29,60	29,85	29,30	15,368	14,796	12,61
4IP28EC25	30,10	30,05	30,30	15,116	15,252	13,04
5IP28EC25	30,40	30,15	30,20	15,464	15,200	13,35
6IP28EC25	30,05	30,00	30,20	15,398	15,122	13,26

Fuente: Propia.

**Tabla 105: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 30% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP28EC30	29,90	30,00	29,95	15,302	15,270	13,12
2IP28EC30	30,00	29,85	29,80	15,294	14,764	12,75
3IP28EC30	29,90	29,90	30,00	15,326	15,074	12,96
4IP28EC30	29,90	30,25	30,20	15,180	15,162	13,05
5IP28EC30	30,05	30,15	30,20	15,236	15,088	13,22
6IP28EC30	30,10	30,00	29,80	15,260	15,080	12,90

Fuente: Propia.

**Tabla 106: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 35% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP28EC35	30,25	30,10	30,20	15,216	15,134	13,21
2IP28EC35	30,45	30,20	30,10	15,194	15,220	13,18
3IP28EC35	30,00	30,20	30,35	15,196	15,236	13,29
4IP28EC35	29,70	29,90	29,85	14,830	15,424	12,86
5IP28EC35	29,95	29,35	29,50	15,248	14,840	12,77
6IP28EC35	29,35	29,35	29,50	15,298	14,932	12,46

Fuente: Propia.

**Tabla 107: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 40% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP28EC40	29,65	29,80	29,75	15,433	14,890	12,40
2IP28EC40	30,10	30,20	30,30	15,220	15,174	13,24
3IP28EC40	30,40	30,20	30,55	15,176	15,270	13,31
4IP28EC40	29,90	30,10	29,75	15,236	15,032	12,91
5IP28EC40	29,65	29,80	29,85	15,200	15,200	12,66
6IP28EC40	29,80	29,95	29,70	15,090	15,288	12,87

Fuente: Propia.

**Tabla 108: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo IP, 28 días de curado, 50% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1IP28EC50	29,15	29,35	29,50	14,920	15,354	12,46
2IP28EC50	29,80	29,75	29,90	15,258	15,266	13,13
3IP28EC50	29,85	29,80	29,70	15,188	15,156	13,28
4IP28EC50	30,00	30,00	30,20	15,272	15,074	13,30
5IP28EC50	29,60	29,85	29,80	15,240	15,396	13,18
6IP28EC50	29,60	29,80	30,10	15,190	15,235	13,14

Fuente: Propia.

En el caso de las probetas fabricadas con cemento tipo V, los datos hallados se presentan en las siguientes tablas.

**Tabla 109: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 0% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV07EC00	29,50	29,90	29,60	14,786	15,138	12,38
2VV07EC00	29,85	29,55	29,40	14,982	15,290	12,44
3VV07EC00	30,20	30,15	30,20	14,600	15,442	12,98
4VV07EC00	30,20	30,05	30,10	15,216	15,150	13,05
5VV07EC00	29,80	29,55	29,60	14,792	15,084	12,51
6VV07EC00	30,05	30,10	29,90	14,905	15,188	12,97

Fuente: Propia.

**Tabla 110: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 5% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV07EC05	29,70	29,65	29,80	15,122	15,194	12,47
2VV07EC05	29,78	29,75	29,70	15,216	15,108	12,59
3VV07EC05	29,70	29,85	29,75	15,158	14,986	12,50
4VV07EC05	30,30	30,15	30,20	15,182	15,162	12,95
5VV07EC05	29,65	29,60	29,55	15,226	15,198	12,50
6VV07EC05	29,90	30,00	30,00	15,214	15,048	12,85

Fuente: Propia.

**Tabla 111: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 10% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV07EC10	30,15	30,25	30,27	14,884	15,110	13,05
2VV07EC10	29,87	29,90	29,85	14,882	15,270	12,85
3VV07EC10	30,50	30,25	30,45	15,296	15,240	13,00
4VV07EC10	30,05	30,25	30,05	15,198	15,300	12,89
5VV07EC10	30,35	30,20	30,30	15,196	14,874	13,30
6VV07EC10	29,90	29,70	30,10	15,078	15,167	12,88

Fuente: Propia.

**Tabla 112: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 15% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV07EC15	30,18	30,10	30,18	15,190	15,296	13,03
2VV07EC15	29,65	29,65	29,78	15,288	15,288	12,57
3VV07EC15	29,98	29,90	29,70	15,232	15,276	12,68
4VV07EC15	30,00	30,25	30,10	15,226	15,188	13,06
5VV07EC15	29,90	29,78	29,90	15,294	15,244	12,59
6VV07EC15	29,80	30,00	29,80	15,209	15,281	12,81

Fuente: Propia.

**Tabla 113: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 20% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV07EC20	30,00	30,10	30,10	15,000	15,134	13,12
2VV07EC20	29,90	29,80	30,00	15,192	15,188	12,99
3VV07EC20	29,70	29,60	29,40	15,268	15,116	12,54
4VV07EC20	30,00	30,10	30,00	15,276	14,970	13,12
5VV07EC20	30,10	30,20	30,20	15,242	15,182	13,19
6VV07EC20	29,90	29,90	29,70	15,158	15,166	13,02

Fuente: Propia.

**Tabla 114: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 25% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV07EC25	29,60	29,80	29,60	15,100	15,260	12,73
2VV07EC25	30,20	30,00	30,10	15,116	15,220	13,24
3VV07EC25	29,90	30,00	30,00	15,122	14,910	13,20
4VV07EC25	29,80	29,80	29,70	15,228	15,010	12,99
5VV07EC25	30,20	30,10	30,00	15,200	15,256	13,31
6VV07EC25	29,70	29,80	29,70	15,171	15,087	12,90

Fuente: Propia.

**Tabla 115: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 30% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV07EC30	30,10	29,90	29,95	15,220	15,178	12,64
2VV07EC30	30,13	30,20	30,10	15,198	15,206	12,72
3VV07EC30	29,55	29,50	29,50	14,854	15,200	12,23
4VV07EC30	29,90	29,70	29,90	15,084	15,032	12,36
5VV07EC30	29,90	29,90	30,05	15,156	15,122	12,64
6VV07EC30	30,10	29,80	29,90	15,064	15,185	12,60

Fuente: Propia.

**Tabla 116: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 35% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV07EC35	30,20	30,10	30,05	15,030	15,332	13,38
2VV07EC35	29,75	29,80	29,70	14,710	15,420	13,36
3VV07EC35	29,80	29,75	29,75	14,734	15,208	12,86
4VV07EC35	30,20	30,15	30,20	15,212	15,286	12,92
5VV07EC35	30,15	30,40	30,30	15,178	14,962	13,34
6VV07EC35	29,90	29,80	29,80	14,983	15,212	12,98

Fuente: Propia.

**Tabla 117: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 40% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV07EC40	29,70	29,80	29,60	15,058	15,282	12,77
2VV07EC40	29,90	29,95	29,95	14,972	15,432	13,07
3VV07EC40	29,50	29,50	29,80	15,198	15,176	12,66
4VV07EC40	30,30	30,20	29,90	15,222	15,132	13,20
5VV07EC40	30,30	30,20	30,10	15,308	15,110	13,27
6VV07EC40	30,00	29,80	30,10	15,163	15,191	13,10

Fuente: Propia.

**Tabla 118: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 7 días de curado, 50% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV07EC50	29,90	29,65	29,75	14,744	15,202	13,13
2VV07EC50	29,60	29,65	29,40	15,244	15,108	12,94
3VV07EC50	29,95	29,90	30,00	15,360	14,778	13,32
4VV07EC50	30,00	30,20	30,00	15,158	15,266	13,35
5VV07EC50	29,90	30,00	29,70	15,212	15,224	13,13
6VV07EC50	29,90	29,80	29,70	15,111	15,161	13,10

Fuente: Propia.

**Tabla 119: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 0% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV14EC00	29,88	30,20	29,70	15,268	15,178	12,51
2VV14EC00	30,00	30,10	29,90	15,000	15,200	12,97
3VV14EC00	30,15	29,95	30,05	15,298	15,066	12,92
4VV14EC00	29,75	29,80	29,90	14,942	15,432	12,65
5VV14EC00	29,85	30,05	30,05	15,134	15,182	12,91
6VV14EC00	29,65	29,80	29,78	15,166	15,180	12,58

Fuente: Propia.



**Tabla 120: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 5% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV14EC05	29,60	29,75	29,55	15,178	15,208	12,56
2VV14EC05	29,75	29,55	29,52	14,928	15,406	12,35
3VV14EC05	29,80	29,75	29,80	15,276	15,186	12,80
4VV14EC05	29,65	29,90	29,80	15,182	14,988	12,57
5VV14EC05	29,95	30,20	30,30	14,912	15,442	13,13
6VV14EC05	29,80	29,70	29,60	15,142	15,201	12,62

Fuente: Propia.

**Tabla 121: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 10% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV14EC10	29,90	29,90	29,80	15,132	14,788	12,54
2VV14EC10	29,50	29,70	29,80	14,652	15,450	12,61
3VV14EC10	29,90	30,20	29,90	15,394	14,980	13,21
4VV14EC10	29,80	29,90	29,80	14,790	15,466	12,73
5VV14EC10	30,10	30,20	30,10	15,222	15,316	13,27
6VV14EC10	29,90	29,90	29,70	15,128	15,080	12,84

Fuente: Propia.

**Tabla 122: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 15% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV14EC15	30,20	30,30	30,20	15,168	15,210	13,16
2VV14EC15	30,00	29,80	30,20	15,226	14,748	13,04
3VV14EC15	30,00	30,20	30,10	15,118	15,198	13,15
4VV14EC15	29,80	29,80	29,70	15,322	14,988	12,75
5VV14EC15	30,00	29,80	29,90	15,180	15,336	12,82
6VV14EC15	30,00	30,20	29,90	15,198	15,107	13,00

Fuente: Propia.

**Tabla 123: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 20% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV14EC20	30,05	29,80	29,95	15,208	15,100	12,73
2VV14EC20	30,30	30,30	30,35	15,356	15,146	13,39
3VV14EC20	29,85	30,05	29,90	15,268	15,212	12,68
4VV14EC20	29,95	30,30	30,05	15,356	14,852	13,24
5VV14EC20	29,60	29,70	29,80	15,120	15,122	12,78
6VV14EC20	29,90	30,20	30,00	15,203	15,148	13,10

Fuente: Propia.

**Tabla 124: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 25% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV14EC25	29,85	29,90	30,05	14,836	15,342	13,16
2VV14EC25	30,30	30,30	30,20	15,136	15,232	13,20
3VV14EC25	30,30	29,95	30,20	15,256	15,188	13,04
4VV14EC25	29,45	29,40	29,20	14,842	15,240	12,66
5VV14EC25	29,60	29,95	29,50	15,220	15,352	12,24
6VV14EC25	29,80	29,90	30,00	15,056	15,294	12,96

Fuente: Propia.

**Tabla 125: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 30% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV14EC30	30,20	30,25	30,20	15,230	15,208	13,14
2VV14EC30	29,80	29,80	29,60	15,182	15,226	12,74
3VV14EC30	30,05	30,05	30,00	15,232	15,150	13,14
4VV14EC30	29,90	29,60	29,56	14,952	15,408	12,61
5VV14EC30	29,53	29,60	29,90	15,452	14,848	12,90
6VV14EC30	29,90	29,80	29,90	15,180	15,196	12,87

Fuente: Propia.

**Tabla 126: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 35% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV14EC35	29,55	29,60	29,85	14,682	15,208	12,89
2VV14EC35	29,70	29,80	29,40	15,282	15,408	12,70
3VV14EC35	30,05	29,90	29,90	15,294	14,810	13,02
4VV14EC35	29,80	29,55	29,35	15,130	15,248	12,82
5VV14EC35	30,00	29,90	30,00	15,200	14,842	13,01
6VV14EC35	30,10	29,80	30,00	15,077	15,164	12,90

Fuente: Propia.

**Tabla 127: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 40% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV14EC40	30,00	30,00	29,86	15,282	15,208	13,30
2VV14EC40	29,75	29,60	29,75	15,218	15,000	12,81
3VV14EC40	29,80	29,80	30,00	15,166	15,302	13,24
4VV14EC40	29,60	29,60	29,55	15,342	14,972	12,97
5VV14EC40	30,10	30,10	30,10	15,202	15,208	13,24
6VV14EC40	29,80	29,90	30,00	15,241	15,142	13,10

Fuente: Propia.

**Tabla 128: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 14 días de curado, 50% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV14EC50	30,10	30,10	29,95	15,290	15,158	13,32
2VV14EC50	29,65	29,90	29,50	14,840	15,288	12,85
3VV14EC50	29,80	29,60	29,30	15,432	14,982	12,98
4VV14EC50	29,50	29,65	30,15	15,040	15,272	12,86
5VV14EC50	29,85	29,85	29,90	15,126	15,222	13,88
6VV14EC50	29,70	29,90	29,90	15,240	15,087	13,18

Fuente: Propia.

**Tabla 129: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 0% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV28EC00	30,45	30,25	30,40	15,148	15,172	13,25
2VV28EC00	29,55	29,70	29,50	15,352	15,080	12,58
3VV28EC00	30,20	29,95	30,50	15,428	14,850	13,41
4VV28EC00	30,30	30,50	30,30	15,302	15,248	13,28
5VV28EC00	30,35	30,50	30,15	15,412	14,968	13,30
6VV28EC00	30,00	30,10	29,80	15,208	15,184	13,12

Fuente: Propia.

**Tabla 130: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 5% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV28EC05	29,90	30,25	30,40	15,418	15,100	12,88
2VV28EC05	30,30	30,25	30,30	15,198	14,932	12,88
3VV28EC05	30,00	30,70	29,90	15,312	15,250	13,26
4VV28EC05	30,10	30,32	29,95	15,086	15,348	13,15
5VV28EC05	29,95	29,95	30,30	15,194	15,200	12,86
6VV28EC05	29,90	30,15	30,10	15,231	15,177	12,80

Fuente: Propia.

**Tabla 131: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 10% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV28EC10	30,10	30,10	30,00	14,998	15,252	13,02
2VV28EC10	30,50	30,05	30,40	15,216	15,262	13,19
3VV28EC10	29,90	29,80	29,60	15,138	15,250	12,80
4VV28EC10	30,10	30,45	29,95	15,228	15,172	13,40
5VV28EC10	30,35	29,70	29,95	15,020	15,112	12,84
6VV28EC10	30,10	30,30	30,30	15,182	14,668	13,25

Fuente: Propia.

**Tabla 132: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 15% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV28EC15	30,60	30,00	30,40	15,326	14,932	13,44
2VV28EC15	30,10	30,45	30,35	15,174	15,258	12,86
3VV28EC15	29,35	29,60	29,45	15,352	14,744	12,86
4VV28EC15	29,80	30,15	29,95	15,382	15,194	13,39
5VV28EC15	29,55	29,85	29,60	15,090	15,296	12,92
6VV28EC15	30,10	30,00	29,80	15,110	15,242	13,18

Fuente: Propia.

**Tabla 133: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 20% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV28EC20	30,15	30,30	30,10	15,120	14,864	13,36
2VV28EC20	30,40	30,10	30,10	15,236	15,130	13,31
3VV28EC20	29,90	29,90	30,10	15,001	15,280	13,22
4VV28EC20	29,50	29,60	29,60	14,832	15,350	12,74
5VV28EC20	30,15	30,05	30,10	15,024	15,190	13,27
6VV28EC20	29,75	29,70	29,80	15,200	15,200	12,82

Fuente: Propia.

**Tabla 134: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 25% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV28EC25	30,25	30,10	30,30	15,220	15,230	13,36
2VV28EC25	29,90	30,20	29,80	14,938	15,374	12,98
3VV28EC25	29,90	29,85	30,05	15,348	14,896	13,06
4VV28EC25	30,30	30,30	30,60	15,202	15,208	13,39
5VV28EC25	30,30	30,40	30,25	15,198	15,238	13,31
6VV28EC25	29,90	30,00	30,00	15,201	15,179	13,22

Fuente: Propia.

**Tabla 135: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 30% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV28EC30	29,90	30,05	29,90	15,100	15,282	13,02
2VV28EC30	29,90	30,05	29,85	15,278	15,140	13,34
3VV28EC30	29,50	29,85	29,30	15,270	15,206	12,95
4VV28EC30	29,60	29,90	29,65	15,400	14,738	12,88
5VV28EC30	29,50	29,60	29,75	15,272	15,196	12,78
6VV28EC30	29,70	29,90	30,00	15,320	14,832	12,98

Fuente: Propia.

**Tabla 136: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 35% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV28EC35	30,40	30,20	30,20	15,224	15,266	13,42
2VV28EC35	29,85	30,40	29,90	15,184	15,204	13,42
3VV28EC35	30,15	29,70	30,15	15,262	15,194	13,24
4VV28EC35	29,80	29,85	30,05	15,380	15,188	13,41
5VV28EC35	30,10	30,00	30,00	15,263	15,213	13,32
6VV28EC35	29,90	29,90	30,10	15,210	15,241	13,34

Fuente: Propia.

**Tabla 137: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 40% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV28EC40	29,35	29,35	29,50	14,996	15,174	12,94
2VV28EC40	29,60	29,75	29,65	15,162	15,204	12,97
3VV28EC40	29,85	29,90	30,00	15,188	15,246	13,10
4VV28EC40	29,80	29,70	29,60	14,648	15,412	13,45
5VV28EC40	29,60	30,15	29,55	15,210	15,194	13,36
6VV28EC40	29,50	29,25	29,50	15,142	15,145	12,89

Fuente: Propia.

**Tabla 138: Fisonomía de probetas cilíndricas con cemento tipo V, 28 días de curado, 50% de EFC.**

Código de espécimen	Altura (cm)			Diámetro (cm)		Peso (kg)
	1	2	3	1	2	
1VV28EC50	29,90	29,95	30,20	14,812	15,324	13,11
2VV28EC50	30,20	30,10	30,30	15,022	15,300	13,69
3VV28EC50	30,15	29,95	30,30	15,090	15,272	13,46
4VV28EC50	29,65	29,40	29,70	15,262	15,350	12,93
5VV28EC50	30,15	30,05	30,40	15,098	15,236	13,51
6VV28EC50	30,10	29,90	30,00	14,810	15,366	13,59

Fuente: Propia.

Como se puede apreciar, los datos de la altura y del peso tienen precisión aproximada al centésimo porque los instrumentos empleados en su medición tuvieron dicha aproximación. Diferente es el caso de los valores hallados para el diámetro de la sección circular de las probetas, los cuales tienen aproximación al milésimo gracias a que el calibrador o vernier tiene una escala de medida más precisa; esa precisión fue fundamental para calcular la resistencia a la compresión de las probetas.

Por otra parte, la resistencia a la compresión del concreto se obtiene de la división de la carga máxima que soportó el espécimen antes de su colapso entre el área sobre el cual se aplicó dicha carga; para ello se empleó la siguiente ecuación.

$$f'c = \frac{P_{\text{máx}}}{\text{Área}}$$

Donde:

$f'c$ : resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>).

$P_{\text{máx}}$ : carga máxima aplicada sobre la probeta (kg).

Área: área de la cara de contacto perpendicular a la carga aplicada (cm<sup>2</sup>).

Sin embargo, debido a que la geometría de las probetas no describe un cilindro completamente simétrico —lo cual sería un caso ideal— se registraron únicamente los valores de la carga máxima aplicada de forma paralela al eje del cilindro y perpendicular a la superficie circular de contacto del elemento. Los valores de la carga máxima aplicada se dividieron entre el área de la superficie de contacto obtenido para cada una de las probetas ensayadas y se obtuvo la resistencia a la compresión,  $f'c$ , como se aprecia en el ítem 3.6.8.2.

Finalmente, y como punto más importante en esta sección, se registraron los valores de la máxima fuerza o carga aplicada que soportaron las probetas antes de colapsar por la máquina de compresión axial. Los datos obtenidos se muestran a continuación.

Primero, los valores y tipo de falla encontrados para las probetas fabricadas con cemento tipo IP.

**Tabla 139: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 0% EFC.**



Ensayo de compresión axial de probetas

Responsable: Juan Díaz y Miguel Bravo

Fecha: 05/09/2016 y posterior Temperatura: 21 °C

Lugar: Laboratorio de Suelos y Concretos FIA-UAC

Observaciones: \_\_\_\_\_

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla*
1IP07EC00	22400	d
2IP07EC00	24010	b
3IP07EC00	24380	c
4IP07EC00	27030	a
5IP07EC00	23480	e
6IP07EC00	24620	b

Fuente: Propia.

\* De acuerdo a lo descrito en el ítem 2.2.8.3.



**Tabla 140: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 5% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP07EC05	23920	a
2IP07EC05	27390	c
3IP07EC05	20500	c
4IP07EC05	26990	c
5IP07EC05	25820	a
6IP07EC05	24630	b

Fuente: Propia.

**Tabla 141: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 10% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP07EC10	24070	e
2IP07EC10	30300	c
3IP07EC10	27480	a
4IP07EC10	22270	a
5IP07EC10	22620	a
6IP07EC10	29480	c

Fuente: Propia.

**Tabla 142: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 15% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP07EC15	26420	a
2IP07EC15	27240	a
3IP07EC15	26630	a
4IP07EC15	27060	c
5IP07EC15	31260	c
6IP07EC15	27560	c

Fuente: Propia.



**Tabla 143: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 20% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP07EC20	29540	a
2IP07EC20	28180	c
3IP07EC20	27670	a
4IP07EC20	26880	a
5IP07EC20	29690	c
6IP07EC20	28450	c

Fuente: Propia.

**Tabla 144: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 25% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP07EC25	31240	c
2IP07EC25	31040	a
3IP07EC25	32020	b
4IP07EC25	29730	c
5IP07EC25	23450	b
6IP07EC25	30880	c

Fuente: Propia.

**Tabla 145: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 30% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP07EC30	33890	a
2IP07EC30	32580	b
3IP07EC30	29770	c
4IP07EC30	30760	b
5IP07EC30	32320	c
6IP07EC30	31910	b

Fuente: Propia.



**Tabla 146: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 35% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP07EC35	32020	a
2IP07EC35	33110	a
3IP07EC35	31790	e
4IP07EC35	39700	a
5IP07EC35	36850	b
6IP07EC35	34840	a

Fuente: Propia.

**Tabla 147: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 40% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP07EC40	31770	c
2IP07EC40	33890	c
3IP07EC40	32570	a
4IP07EC40	30460	e
5IP07EC40	32720	c
6IP07EC40	32520	c

Fuente: Propia.

**Tabla 148: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 50% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP07EC50	30190	c
2IP07EC50	26490	c
3IP07EC50	27690	a
4IP07EC50	28360	b
5IP07EC50	31080	b
6IP07EC50	28900	c

Fuente: Propia.

**Tabla 149: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 0% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP14EC00	33640	a
2IP14EC00	30940	c
3IP14EC00	29140	b
4IP14EC00	35360	b
5IP14EC00	32830	a
6IP14EC00	32520	b

Fuente: Propia.

**Tabla 150: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 5% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP14EC05	31200	c
2IP14EC05	36000	e
3IP14EC05	35680	c
4IP14EC05	31630	c
5IP14EC05	32060	c
6IP14EC05	33290	b

Fuente: Propia.

**Tabla 151: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 10% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP14EC10	34030	b
2IP14EC10	35530	c
3IP14EC10	34420	b
4IP14EC10	32330	b
5IP14EC10	35420	c
6IP14EC10	34490	c

Fuente: Propia.



**Tabla 152: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 15% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP14EC15	33100	c
2IP14EC15	36000	b
3IP14EC15	37560	c
4IP14EC15	38940	b
5IP14EC15	36580	c
6IP14EC15	36620	b

Fuente: Propia.

**Tabla 153: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 20% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP14EC20	39000	c
2IP14EC20	39730	b
3IP14EC20	36320	b
4IP14EC20	39580	c
5IP14EC20	39490	b
6IP14EC20	38840	b

Fuente: Propia.

**Tabla 154: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 25% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP14EC25	37500	b
2IP14EC25	38560	c
3IP14EC25	41840	c
4IP14EC25	41250	b
5IP14EC25	39580	d
6IP14EC25	39780	b

Fuente: Propia.



**Tabla 155: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 30% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP14EC30	43290	b
2IP14EC30	40550	c
3IP14EC30	42920	c
4IP14EC30	43500	c
5IP14EC30	41810	c
6IP14EC30	42500	b

Fuente: Propia.

**Tabla 156: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 35% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP14EC35	44470	c
2IP14EC35	42830	c
3IP14EC35	45690	e
4IP14EC35	42840	c
5IP14EC35	42160	c
6IP14EC35	43440	c

Fuente: Propia.

**Tabla 157: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 40% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP14EC40	37680	c
2IP14EC40	47620	b
3IP14EC40	39850	b
4IP14EC40	38260	c
5IP14EC40	42730	b
6IP14EC40	39280	b

Fuente: Propia.

**Tabla 158: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 50% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP14EC50	32190	b
2IP14EC50	33530	c
3IP14EC50	32160	c
4IP14EC50	34990	b
5IP14EC50	34550	b
6IP14EC50	33400	c

Fuente: Propia.

**Tabla 159: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 0% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP28EC00	36640	b
2IP28EC00	37610	b
3IP28EC00	35590	d
4IP28EC00	36350	a
5IP28EC00	37280	c
6IP28EC00	36850	b

Fuente: Propia.

**Tabla 160: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 5% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP28EC05	40850	b
2IP28EC05	34530	b
3IP28EC05	40460	e
4IP28EC05	39170	b
5IP28EC05	38230	c
6IP28EC05	35730	b

Fuente: Propia.

**Tabla 161: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 10% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP28EC10	36580	b
2IP28EC10	39240	b
3IP28EC10	42290	b
4IP28EC10	40870	b
5IP28EC10	44550	b
6IP28EC10	41710	c

Fuente: Propia.

**Tabla 162: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 15% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP28EC15	39830	a
2IP28EC15	40230	b
3IP28EC15	42200	b
4IP28EC15	44520	b
5IP28EC15	44490	a
6IP28EC15	42310	b

Fuente: Propia.

**Tabla 163: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 20% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP28EC20	39830	b
2IP28EC20	43610	b
3IP28EC20	39760	b
4IP28EC20	42610	b
5IP28EC20	50910	b
6IP28EC20	42450	c

Fuente: Propia.





**Tabla 164: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 25% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP28EC25	44810	b
2IP28EC25	43960	b
3IP28EC25	44630	d
4IP28EC25	45270	e
5IP28EC25	45750	b
6IP28EC25	41610	b

Fuente: Propia.

**Tabla 165: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 30% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP28EC30	42290	b
2IP28EC30	41010	d
3IP28EC30	44960	b
4IP28EC30	47600	b
5IP28EC30	48890	e
6IP28EC30	45050	b

Fuente: Propia.

**Tabla 166: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 35% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP28EC35	44780	b
2IP28EC35	49150	a
3IP28EC35	51200	b
4IP28EC35	48690	b
5IP28EC35	46660	c
6IP28EC35	51480	b

Fuente: Propia.

**Tabla 167: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 40% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP28EC40	53560	d
2IP28EC40	42650	a
3IP28EC40	39670	d
4IP28EC40	44410	c
5IP28EC40	40860	d
6IP28EC40	40790	d

Fuente: Propia.

**Tabla 168: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 50% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1IP28EC50	45090	c
2IP28EC50	36910	d
3IP28EC50	35210	a
4IP28EC50	39980	e
5IP28EC50	37910	a
6IP28EC50	38090	c

Fuente: Propia.

Los datos de la carga máxima y tipo de falla obtenidos durante el ensayo de compresión realizado a las probetas fabricadas con cemento tipo V se pueden apreciar en las tablas siguientes.

**Tabla 169: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 0% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV07EC00	27820	b
2VV07EC00	31470	e
3VV07EC00	31740	b
4VV07EC00	27820	d
5VV07EC00	25100	e
6VV07EC00	29890	b

Fuente: Propia.

**Tabla 170: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 5% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV07EC05	28230	b
2VV07EC05	34150	b
3VV07EC05	27440	b
4VV07EC05	33710	c
5VV07EC05	34110	c
6VV07EC05	32200	b

Fuente: Propia.

**Tabla 171: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 10% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV07EC10	33710	a
2VV07EC10	36010	b
3VV07EC10	25650	c
4VV07EC10	35500	b
5VV07EC10	32980	b
6VV07EC10	30870	b

Fuente: Propia.

**Tabla 172: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 15% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV07EC15	35640	b
2VV07EC15	37830	b
3VV07EC15	35400	b
4VV07EC15	33170	b
5VV07EC15	33730	b
6VV07EC15	35250	b

Fuente: Propia.



**Tabla 173: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 20% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV07EC20	28680	a
2VV07EC20	41860	a
3VV07EC20	33040	b
4VV07EC20	38420	b
5VV07EC20	36620	c
6VV07EC20	35910	b

Fuente: Propia.

**Tabla 174: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 25% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV07EC25	39510	c
2VV07EC25	38040	b
3VV07EC25	36460	c
4VV07EC25	38500	c
5VV07EC25	37670	b
6VV07EC25	38220	b

Fuente: Propia.

**Tabla 175: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 30% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV07EC30	40950	c
2VV07EC30	40660	c
3VV07EC30	37510	b
4VV07EC30	34400	c
5VV07EC30	42010	a
6VV07EC30	40200	b

Fuente: Propia.

**Tabla 176: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 35% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV07EC35	38600	b
2VV07EC35	45170	b
3VV07EC35	37190	b
4VV07EC35	40630	c
5VV07EC35	41860	c
6VV07EC35	40410	b

Fuente: Propia.

**Tabla 177: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 40% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV07EC40	38710	a
2VV07EC40	42850	a
3VV07EC40	40760	b
4VV07EC40	38950	a
5VV07EC40	37520	b
6VV07EC40	37110	a

Fuente: Propia.

**Tabla 178: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 50% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV07EC50	35060	d
2VV07EC50	37880	b
3VV07EC50	36980	b
4VV07EC50	35500	b
5VV07EC50	39500	d
6VV07EC50	37130	c

Fuente: Propia.

**Tabla 179: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 0% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV14EC00	35880	b
2VV14EC00	36240	b
3VV14EC00	35840	b
4VV14EC00	33310	b
5VV14EC00	36300	b
6VV14EC00	35650	c

Fuente: Propia.

**Tabla 180: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 5% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV14EC05	36360	b
2VV14EC05	36040	b
3VV14EC05	42990	b
4VV14EC05	37270	b
5VV14EC05	39240	c
6VV14EC05	38490	b

Fuente: Propia.

**Tabla 181: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 10% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV14EC10	38220	b
2VV14EC10	45720	b
3VV14EC10	39170	b
4VV14EC10	41540	b
5VV14EC10	42750	c
6VV14EC10	41530	b

Fuente: Propia.



**Tabla 182: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 15% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV14EC15	43750	c
2VV14EC15	43630	b
3VV14EC15	43050	c
4VV14EC15	42490	b
5VV14EC15	43250	b
6VV14EC15	43330	b

Fuente: Propia.

**Tabla 183: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 20% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV14EC20	47900	b
2VV14EC20	46390	b
3VV14EC20	45720	b
4VV14EC20	43440	b
5VV14EC20	42130	b
6VV14EC20	45010	b

Fuente: Propia.

**Tabla 184: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 25% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV14EC25	48770	b
2VV14EC25	48970	b
3VV14EC25	47970	b
4VV14EC25	47570	b
5VV14EC25	36600	b
6VV14EC25	48330	b

Fuente: Propia.



**Tabla 185: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 30% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV14EC30	47530	c
2VV14EC30	50510	c
3VV14EC30	46570	e
4VV14EC30	48660	b
5VV14EC30	49180	c
6VV14EC30	48530	b

Fuente: Propia.

**Tabla 186: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 35% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV14EC35	49140	b
2VV14EC35	52040	c
3VV14EC35	51970	c
4VV14EC35	49340	b
5VV14EC35	46200	b
6VV14EC35	49930	b

Fuente: Propia.

**Tabla 187: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 40% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV14EC40	48330	b
2VV14EC40	47110	b
3VV14EC40	43020	b
4VV14EC40	42260	b
5VV14EC40	54320	c
6VV14EC40	46790	b

Fuente: Propia.





**Tabla 188: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 50% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV14EC50	45090	c
2VV14EC50	43110	b
3VV14EC50	41180	c
4VV14EC50	42020	b
5VV14EC50	40790	c
6VV14EC50	42880	b

Fuente: Propia.

**Tabla 189: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 0% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV28EC00	40230	c
2VV28EC00	58160	c
3VV28EC00	35620	a
4VV28EC00	40690	c
5VV28EC00	41740	a
6VV28EC00	48180	c

Fuente: Propia.

**Tabla 190: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 5% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV28EC05	45840	d
2VV28EC05	50850	c
3VV28EC05	42360	b
4VV28EC05	47140	c
5VV28EC05	41600	d
6VV28EC05	45530	d

Fuente: Propia.



**Tabla 191: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 10% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV28EC10	44690	c
2VV28EC10	45360	b
3VV28EC10	47880	c
4VV28EC10	51480	c
5VV28EC10	44240	c
6VV28EC10	44120	a

Fuente: Propia.

**Tabla 192: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 15% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV28EC15	49390	e
2VV28EC15	49280	a
3VV28EC15	46210	d
4VV28EC15	46190	b
5VV28EC15	50850	b
6VV28EC15	48470	c

Fuente: Propia.

**Tabla 193: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 20% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV28EC20	45910	a
2VV28EC20	52740	b
3VV28EC20	49150	a
4VV28EC20	51650	b
5VV28EC20	45420	b
6VV28EC20	58890	e

Fuente: Propia.



**Tabla 194: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 25% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV28EC25	50690	d
2VV28EC25	55760	b
3VV28EC25	57220	b
4VV28EC25	54390	c
5VV28EC25	52010	c
6VV28EC25	54130	b

Fuente: Propia.

**Tabla 195: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 30% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV28EC30	59600	a
2VV28EC30	57420	a
3VV28EC30	58310	d
4VV28EC30	56280	e
5VV28EC30	59800	b
6VV28EC30	57990	b

Fuente: Propia.

**Tabla 196: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 35% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV28EC35	54190	d
2VV28EC35	61120	c
3VV28EC35	69220	b
4VV28EC35	59140	b
5VV28EC35	60110	a
6VV28EC35	59240	b

Fuente: Propia.

**Tabla 197: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 40% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV28EC40	59040	d
2VV28EC40	58900	d
3VV28EC40	60150	c
4VV28EC40	54990	b
5VV28EC40	58300	c
6VV28EC40	58130	e

Fuente: Propia.

**Tabla 198: Carga máxima aplicada a probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 50% EFC.**

Código de espécimen	Carga máxima experimental (kg)	Tipo de falla
1VV28EC50	52280	d
2VV28EC50	47720	c
3VV28EC50	58230	a
4VV28EC50	56280	c
5VV28EC50	57720	b
6VV28EC50	56920	b

Fuente: Propia.

### 3.5.11. Ensayos químicos sobre el concreto y la escoria de cobre

#### a. Equipos utilizados y materiales

- Peachímetro digital.
- Balanza de precisión.
- Muestras de escoria de fundición de cobre.
- Muestras de concreto con escoria de cobre.
- Ácido nítrico.
- Ferricianuro de potasio.



- Ácido clorhídrico.
- Fenolftaleína.
- Agua destilada.
- Instrumentos de laboratorio de química (tubos de ensayo, vasos de precipitados, agitador de vidrio, espátula, piseta, papel toalla, etc.)

## **b. Procedimiento**

### **b.1. Verificación del contenido de cobre**

Es un ensayo cualitativo que permite determinar si hay contenido de cobre en una sustancia.

- Se pone una muestra de escoria de cobre en un vaso de precipitados.
- Se vierte en el recipiente Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ).
- Luego, es necesario remover la mezcla.
- Finalmente, se debe esperar unos minutos y ver el color de la solución.

### **b.2. Verificación del contenido de hierro**

- En un tubo de ensayo se coloca una muestra de escoria de cobre.
- Se echa en el recipiente Ferricianuro de Potasio ( $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ).
- Se remueve el recipiente para facilitar la reacción.
- Es necesario esperar y observar el color de la solución.

### **b.3. Verificación del contenido de sílice**

- Debe colocarse una muestra de escoria de cobre en un tubo de ensayo.
- En el recipiente debe echarse un poco de Ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ).
- Se remueve el recipiente.
- Igual que en las pruebas anteriores, se debe esperar y ver el color de la solución.

#### **b.4. Prueba de carbonatación del concreto**

- Preparar una muestra de concreto. En este caso, se trituraron unos trozos de probetas de concreto fabricadas con cementos tipo IP y tipo V, con 30% y 35% de escoria de cobre.
- Con la espátula, se coge una pequeña porción de concreto pulverizado y se introduce en un tubo de ensayo.
- Sobre la muestra, se vierten 5 ml de agua destilada.
- Se pone una gota de Fenolftaleína en la solución.
- Tras unos instantes, debe observarse el color que toma la solución.

#### **b.5. Prueba del pH del concreto con escoria de cobre**

- Una porción del concreto pulverizado es introducido y disuelto en agua destilada en un vaso de precipitados.
- Se remueve la solución con el agitador de vidrio, para asegurar una mezcla apropiada.
- Se limpia el electrodo del peachímetro con abundante agua destilada y se introduce en la solución.
- Se debe esperar hasta que el valor mostrado en la pantalla del peachímetro digital se estabilice y se toma la lectura.



Fuente: Propia.

**Figura 66: Medición del pH del concreto con escoria de cobre.**

### c. Toma de datos

Se incidió en la medición del pH del concreto con escoria de cobre en 35%, que es el porcentaje óptimo de sustitución. El peachímetro proporcionó los siguientes datos:

**Tabla 199: pH del concreto con escoria de cobre sobre muestras con 30%, 35% y 40%.**

Tipo de cemento	% EFC	pH del concreto con escoria de cobre		
		1º prueba	2º prueba	3º prueba
IP	30%	12,321	-	-
	35%	12,165	12,672	12,482
	40%	12,89	-	-
V	30%	12,243	-	-
	35%	12,76	13,018	12,713
	40%	13,18	-	-

Fuente: Propia.

## 3.6. Procedimientos de análisis de datos

### 3.6.1. Determinación de la muestra representativa

El muestreo de agregados por medio del método del cuarteo se realizó para obtener material en todos los ensayos realizados sobre los agregados, incluso sobre la escoria de cobre, para garantizar la obtención de muestras representativas.

**Tabla 200: Cantidades aproximadas de agregados obtenidas mediante cuarteo.**

Tipo de agregado	Peso (kg)	Ensayo o prueba de laboratorio
Fino	2,5	Granulometría
	1,2	Peso específico y absorción
	4	Peso unitario y contenido de vacíos
	1,3	Contenido de humedad
Grueso	5	Granulometría
	3	Peso específico y absorción
	12	Peso unitario y contenido de vacíos
	5,1	Abrasión
	4	Contenido de humedad
EFC	2,5	Granulometría
	1,2	Peso específico y absorción

Fuente: Propia.

La Tabla 200 muestra las cantidades requeridas para la realización de los ensayos sobre agregados; en muchos de ellos no se requirió emplear la totalidad de la muestra.

### 3.6.2. Análisis granulométrico de los agregados y de la escoria de cobre

#### 3.6.2.1. Análisis granulométrico del agregado fino

Con los pesos obtenidos en el ensayo de granulometría del agregado fino (véase ítem 3.5.2.1.), se calcularon los pesos retenidos para cada tamiz. El peso retenido representa un porcentaje respecto del peso total de la muestra y se obtiene con la siguiente ecuación.

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{Peso de material retenido en tamiz}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad (3.1)$$

Los datos obtenidos del análisis granulométrico al que fue sometido el agregado fino se muestran en la tabla siguiente.

**Tabla 201: Análisis granulométrico del agregado fino.**

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% retenido	% que pasa	% retenido acumulado
# 4	4,75	0,0	0,00%	100,00%	0,00%
# 8	2,36	31,1	1,56%	98,44%	1,56%
# 16	1,18	319,2	15,96%	82,48%	17,52%
# 30	0,60	653,9	32,70%	49,79%	50,21%
# 50	0,30	747,3	37,37%	12,42%	87,58%
# 100	0,15	123,4	6,17%	6,25%	93,75%
# 200	0,08	93,0	4,65%	1,60%	98,40%
Fondo	0,00	32,1	1,60%	0,00%	100,00%
Total		2000,0	100,00%		

Fuente: Propia.

En función de lo establecido por las NTP 400.037 y NTP 400.012, se procedió a establecer los límites superior e inferior para analizar las cualidades del agregado fino seleccionado para la elaboración de la investigación. Se halló que el agregado fino de la cantera de Cunyac —cantera que proporciona material limpio con baja cantidad de impurezas— tiene un comportamiento granulométrico como la figura que sigue.





### 3.6.2.3. Análisis granulométrico del agregado grueso

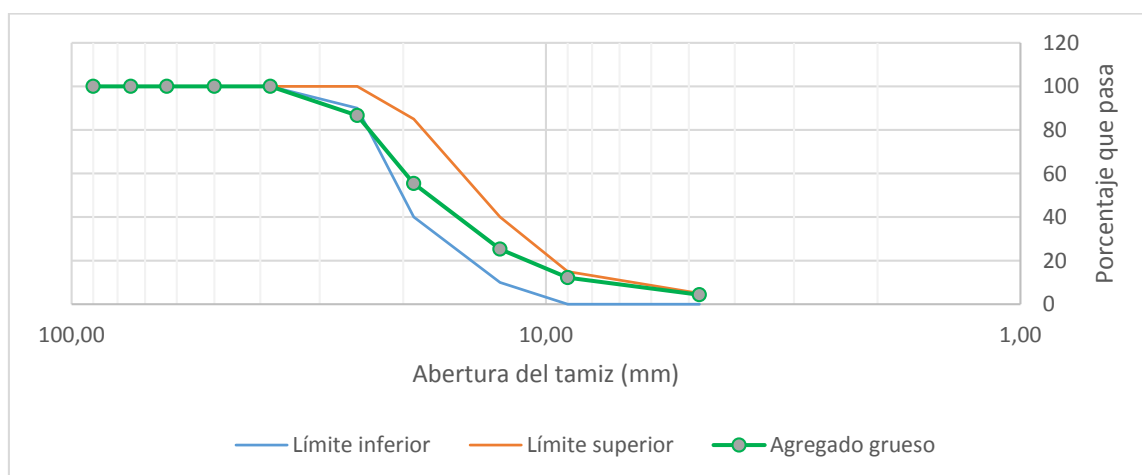
Con los resultados encontrados se calcularon los pesos retenidos para cada tamiz. El peso retenido del agregado grueso se calcula igual que para el agregado fino (ítem 3.6.2.1.)

**Tabla 203: Análisis granulométrico del agregado grueso.**

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% retenido	% que pasa	% retenido acumulado
3 1/2"	90,00	0,00	0,00%	100,00%	0,00%
3"	75,00	0,00	0,00%	100,00%	0,00%
2 1/2"	63,00	0,00	0,00%	100,00%	0,00%
2"	50,00	0,00	0,00%	100,00%	0,00%
1 1/2"	38,10	0,00	0,00%	100,00%	0,00%
1"	25,00	669,60	13,39%	86,61%	13,39%
3/4"	19,00	1562,70	31,25%	55,35%	44,65%
1/2"	12,50	1506,40	30,13%	25,23%	74,77%
3/8"	9,00	652,20	13,04%	12,18%	87,82%
# 4	4,75	394,70	7,89%	4,29%	95,71%
Fondo	0,00	214,40	4,29%	0,00%	100,00%
<b>Total</b>		<b>5000,00</b>	<b>100,00%</b>		

Fuente: Propia.

De acuerdo a lo establecido en las NTP 400.037 y NTP 400.012, se establecieron los límites superior e inferior de la granulometría del agregado. El análisis realizado permitió establecer que la curva que describe la granulometría del agregado grueso de la cantera de Huacarpay tiene la forma mostrada en la figura adjunta.



Fuente: Propia.

**Figura 68: Curva granulométrica del agregado grueso de Huacarpay.**

En la Figura 68, la curva granulométrica del agregado grueso se encuentra dentro de los límites granulométricos definidos por las normas y fue un material óptimo en el concreto de esta tesis.

### 3.6.2.4. Análisis granulométrico de la escoria de cobre (EFC)

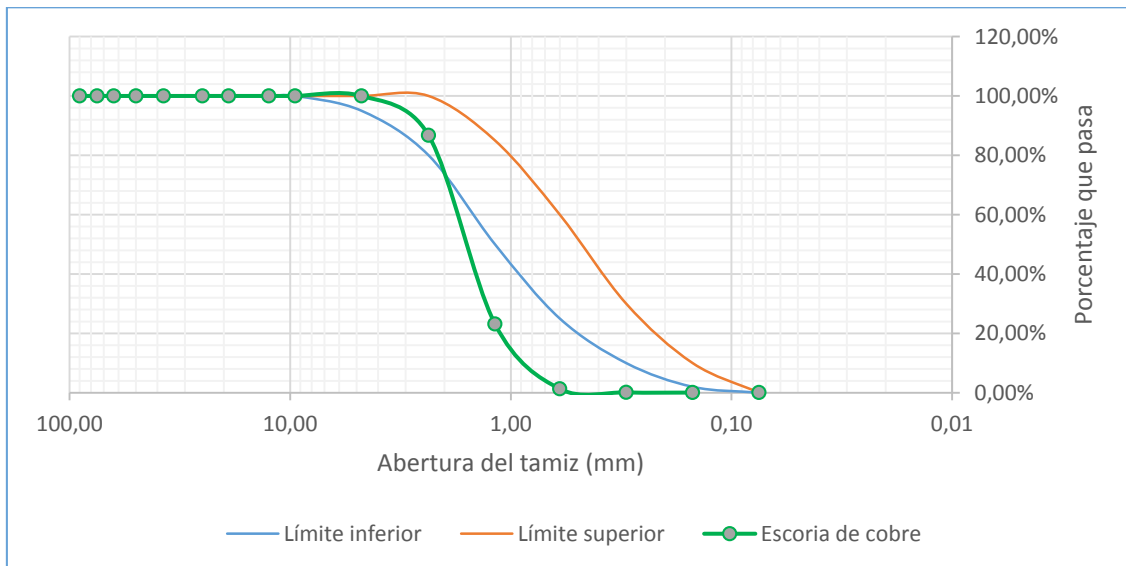
Los datos del ensayo granulométrico de la escoria de cobre se muestran en la tabla siguiente.

**Tabla 204: Análisis granulométrico de la escoria de cobre.**

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% retenido	% que pasa	% retenido acumulado
# 4	4,75	0,90	0,04%	100,00%	0,04%
# 8	2,36	332,00	13,28%	86,72%	13,32%
# 16	1,18	1588,90	63,56%	23,16%	76,87%
# 30	0,60	546,10	21,84%	1,32%	98,72%
# 50	0,30	30,20	1,21%	0,11%	99,92%
# 100	0,15	1,40	0,06%	0,06%	99,98%
# 200	0,08	0,30	0,01%	0,04%	99,99%
Fondo	0,00	0,20	0,01%	0,04%	100,00%
<b>Total</b>		<b>2500,00</b>	<b>100,00%</b>		

Fuente: Propia.

La curva que describe el comportamiento granulométrico de la escoria de cobre se muestra a continuación.



Fuente: Propia.

**Figura 69: Curva granulométrica de la escoria de cobre.**



En la Figura 69 se puede ver que la escoria de cobre tiene una granulometría casi homogénea, por eso la gráfica muestra una pendiente casi vertical, que se encuentra por debajo de los límites inferiores granulométricos establecidos por las normas. No obstante, el ajuste de la granulometría de la escoria de fundición de cobre dentro de los límites granulométricos no es un objetivo que persigue la investigación.

### 3.6.3. Determinación del peso específico y absorción de los agregados y de la escoria de cobre

#### 3.6.3.1. Peso específico y absorción del agregado fino

##### a. Peso específico de masa ( $Pem$ )

Se determina empleando la siguiente ecuación:

$$Pem = \frac{A}{B+S-C} \quad (3.2)$$

Donde:

A: peso en el aire de la muestra secada en el horno (gr).

B: peso del picnómetro lleno con agua (gr).

C: peso del picnómetro con la muestra y agua hasta la marca de calibración (gr).

S: peso de la muestra saturada superficialmente seca (gr).

El agregado fino para el ensayo se preparó de acuerdo a lo descrito en b. de 3.5.3.1.

Así, se preparó una muestra de 1204,0 gr de material que logró cumplir con la prueba del cono. Luego, se dividieron los 1204,0 gr de arena en dos partes iguales: una parte de 602,0 gr fue directamente enviada al horno; los otros 602,0 gr de agregado fino fueron introducidos en el picnómetro con agua.

A la muestra sumergida se le extrajo el aire empleando la bomba de vacíos de acuerdo a lo indicado anteriormente.

Entonces, se procedió a determinar cada uno de los parámetros necesarios que fueron reemplazados en la ecuación (3.2).



$$\left\{ \begin{array}{l} A = 591,9 \text{ gr (peso de la muestra secada en el horno).} \\ A = 582,7 \text{ gr (peso de la muestra secada en el horno que se introdujo en el picnómetro).} \end{array} \right.$$

El primer peso corresponde a la primera mitad enviada directamente a horno y se considera material que puede ser empleado en caso se pierda una parte o todo el material de la otra mitad.

La otra cantidad corresponde al peso de la muestra que se introdujo en el picnómetro y luego se puso a secar en el horno. Ese es el valor que se empleó en el cálculo. Entonces:

$$A = 582,7 \text{ gr.}$$

$$B = 657,3 \text{ gr.}$$

$$C = 1032,5 \text{ gr.}$$

$$S = 602,0 \text{ gr.}$$

Reemplazando esos datos en la ecuación (3.2):

$$Pe = \frac{582,7}{657,3 + 602,0 - 1032,5}$$

$$Pem = 2,569 \text{ gr}$$

### **b. Peso específico de masa saturada con superficie seca (P<sub>esss</sub>)**

Se empleó la fórmula de cálculo:

$$P_{esss} = \frac{S}{B+S-C} \quad (3.3)$$

Reemplazando los datos hallados en la ecuación (3.3):

$$P_{esss} = \frac{602,0}{657,3 + 602,0 - 1032,5}$$

$$P_{esss} = 2,654 \text{ gr}$$

### **c. Peso específico aparente (P<sub>ea</sub>) o nominal**

$$P_{ea} = \frac{A}{B+A-C} \quad (3.4)$$



Reemplazando los datos hallados en la ecuación (3.4):

$$Pea = \frac{582,7}{657,3 + 582,7 - 1032,5}$$

$$Pea = 2,808 \text{ gr}$$

#### d. Absorción (Abs)

$$Abs (\%) = \frac{S-A}{A} \times 100 \quad (3.5)$$

La ecuación (3.5) con los valores obtenidos:

$$Abs (\%) = \frac{602 - 582,7}{582,7} \times 100$$

$$Abs (\%) = 3,312\%$$

### 3.6.3.2. Peso específico y absorción del agregado grueso

#### a. Peso específico de masa (Pem)

Se empleó la ecuación:

$$Pem = \frac{A}{B-C} \quad (3.6)$$

Donde:

A: peso en el aire de la muestra secada en el horno (gr).

B: peso en el aire de la muestra saturada superficialmente seca (gr).

C: peso en el agua de la muestra saturada (gr).

En el ítem 3.5.3.2. se determinaron los valores de A, B y C.

A = 2991,9 gr (peso de la muestra secada en el horno).

B = 3022,7 gr (peso de la muestra secada con el trapo).

C = 1895,9 gr (peso de la muestra sumergida en agua en la canastilla).



Entonces, se reemplaza lo encontrado en la ecuación (3.6):

$$Pem = \frac{2991,9}{3022,7 - 1895,9}$$

$$Pem = 2,655 \text{ gr}$$

#### b. Peso específico de masa saturada con superficie seca (Pesss)

Se utilizó la expresión:

$$Pesss = \frac{B}{B-C} \quad (3.7)$$

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación (3.7):

$$Pesss = \frac{3022,7}{3022,7 - 1895,9}$$

$$Pesss = 2,683 \text{ gr}$$

#### c. Peso específico aparente (Pea) o nominal

$$Pea = \frac{A}{A-C} \quad (3.8)$$

Al reemplazar los datos en la ecuación (3.8) se halló:

$$Pea = \frac{2991,9}{2991,9 - 1895,9}$$

$$Pea = 2,730 \text{ gr}$$

#### d. Absorción (Abs)

$$Abs (\%) = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (3.9)$$

Y se determinó la absorción con la ecuación (3.9):

$$Abs (\%) = \frac{3022,7 - 2991,9}{2991,9} \times 100$$

$$Abs (\%) = 1,029\%$$



### 3.6.3.3. Peso específico y absorción de la escoria de cobre

Como se hizo con el agregado fino, se emplearon las mismas fórmulas de cálculo para la escoria de cobre.

#### a. Peso específico de masa (Pem)

Se eligió la segunda cantidad para el parámetro A, de acuerdo a lo discutido en el apartado de agregado fino, y se encontraron los datos siguientes.

$$A = 598,7 \text{ gr.}$$

$$B = 657,7 \text{ gr.}$$

$$C = 1075,8 \text{ gr.}$$

$$S = 600,0 \text{ gr.}$$

Entonces, empleando la ecuación (3.2) se halló:

$$Pem = \frac{598,7}{657,7 + 600 - 1075,8}$$

$$Pem = 3,291 \text{ gr}$$

#### b. Peso específico de masa saturada con superficie seca (Pesss)

Se utilizó la ecuación (3.3):

$$Pesss = \frac{600}{657,7 + 600 - 1075,8}$$

$$Pesss = 3,299 \text{ gr}$$

#### c. Peso específico aparente (Pea) o nominal

Con la ecuación (3.4) se obtuvo:

$$Pea = \frac{598,7}{657,7 + 598,7 - 1075,8}$$

$$Pea = 3,315 \text{ gr}$$



**d. Absorción (Abs)**

Reemplazando los datos en la ecuación (3.5) se encontró:

$$Abs (\%) = \frac{600 - 598,7}{598,7} \times 100$$

$$Abs (\%) = 0,217\%$$

En la Tabla 205 se puede apreciar los valores obtenidos en los análisis realizados sobre el agregado fino, agregado grueso y escoria de cobre.

**Tabla 205: Peso específico y absorción de los agregados y de la EFC.**

Descripción	Pem	Pesss	Pea	Abs (%)
Agregado fino	2,569	2,654	2,808	3,312
Agregado grueso	2,655	2,683	2,730	1,029
EFC	3,291	3,299	3,315	0,217

Fuente: Propia.

Es evidente que el agregado fino tiene una mayor capacidad de absorción de agua, lo cual tiene gran influencia en el diseño de mezcla.

El agregado grueso tiene una capacidad de absorción mucha menor y también tiene un peso específico ligeramente mayor que la arena, lo cual se explica en que ambos tienen una estructura molecular relativamente similar.

En el caso de la escoria de cobre, se puede apreciar que tiene un peso específico mucho mayor que los agregados fino y grueso. Además, su capacidad de absorber agua es muy pequeña, lo cual podría explicarse en que tiene una textura vítrea con escasa porosidad. De este análisis se dedujo que la influencia de la escoria de cobre sobre el concreto iba a incidir directamente sobre el peso de la probeta, y en que hizo más fluida la mezcla recién preparada. Es decir, la EFC tuvo una relación muy estrecha con la variación de la consistencia del concreto fresco, como puede apreciarse en la Tabla 18, donde se observa que a mayor proporción de escoria de cobre en lugar de arena, la consistencia se incrementa y por consiguiente la mezcla se hace más fluida.



### 3.6.4. Determinación del peso unitario y contenido de vacíos de los agregados

#### 3.6.4.1. Peso unitario y contenido de vacíos del agregado fino

Para determinar los pesos unitarios del agregado fino, se empleó una ecuación que sirve para el material suelto y compactado.

##### a. Peso del agregado suelto y compactado

$$PA = PT - PM \quad (3.10)$$

Donde:

PA: peso del agregado (kg), suelto o compactado (PA<sub>S</sub> o PA<sub>C</sub>).

PT: peso total (kg), suelto o compactado (PT<sub>S</sub> = peso del molde + peso del agregado suelto; PT<sub>C</sub> = peso del molde + peso del agregado compactado).

PM: peso del molde (kg), Proctor o briquetera (PM<sub>P</sub> o PM<sub>B</sub>).

VM: volumen del molde (cm<sup>3</sup>), Proctor o briquetera (VM<sub>P</sub> + VM<sub>B</sub>).

Experimentalmente se encontró que:

$$PM_P = 5,195 \text{ kg.}$$

$$VM_P = 1295,9 \text{ cm}^3.$$

$$PT_S = 7,380 \text{ kg.}$$

$$PT_C = 7,620 \text{ kg.}$$

Después, empleando la ecuación (3.10) se calculó el peso suelto y el peso compactado del agregado fino.

##### a.1. Peso del agregado fino suelto (PA<sub>S</sub>)

$$PA_S = PT_S - PM_P = 7,380 - 5,195$$

$$PA_S = 2,185 \text{ kg}$$

**a.2. Peso del agregado fino compactado ( $PA_C$ )**

$$PA_C = PT_C - PM_P = 7,620 - 5,195$$

$$PA_C = 2,425 \text{ kg}$$

Con los datos obtenidos, se calculó el peso unitario de la muestra.

**b. Peso unitario del agregado**

$$PU = \frac{PA}{VM} \quad (3.11)$$

Donde:

PU: peso unitario del agregado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), suelto o compactado (PUs o PUC).

PA: peso del agregado (kg), suelto o compactado (PAs o PAC).

VM: volumen del molde ( $\text{cm}^3$ ), Proctor o briquetera ( $VM_P + VM_B$ ).

Todos los pesos unitarios se determinaron empleando la ecuación (3.11).

**b.1. Peso unitario del agregado fino suelto**

$$PU_S = \frac{PA_S}{VM_P}$$

$$PU_S = \frac{2,185}{1295,9}$$

$$PU_S = 1,686 \times 10^{-3} \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$PU_S = 1,686 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

**b.2. Peso unitario del agregado fino compactado**

$$PU_C = \frac{PA_C}{VM_P}$$

$$PU_C = \frac{2,425}{1295,9}$$



$$PU_c = 1,871 \times 10^{-3} \frac{gr}{cm^3}$$

$$PU_c = 1,871 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$$

### c. Contenido de vacíos

El contenido de vacíos del agregado fino se calculó con los datos obtenidos en el apartado precedente, y con ayuda de la siguiente ecuación:

$$\%vacíos = \frac{100(SxW) - PU}{SxW} \quad (3.12)$$

Donde:

%vacíos: contenido de vacíos del agregado (%), suelto o compactado (*%vacíos suelto* o *%vacíos compactado*).

PU: peso unitario del agregado ( $kg/m^3$ ), suelto o compactado (PUs o PUc).

S: peso específico de masa del agregado, fino o compactado.

W: densidad del agua ( $998 \text{ kg}/m^3$ ).

Se tuvo en cuenta que para calcular el contenido de vacíos del agregado fino suelto y compactado se emplearon los resultados hallados para el peso unitario del agregado fino suelto y compactado, respectivamente.

#### c.1. Contenido de vacíos del agregado fino suelto

$S = 2,569$  (véase  $P_{em}$  en el ítem 3.6.3.1.)

$$PU_s = 1,686 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$$

$$W = 998 \frac{kg}{m^3}$$

Entonces, empleando la ecuación (3.12) se obtuvo:

$$\%vacíos \text{ suelto} = \frac{100(SxW) - PU_s}{SxW}$$



$$\%vacíos\ suelto = \frac{100(2,569 \times 998) - 1,686 \times 10^3}{2,569 \times 998}$$

$$\%vacíos\ suelto = 34,239\%$$

### c.2. Contenido de vacíos del agregado fino compactado

$$PU_c = 1,871 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$$

Entonces, con la ecuación (3.12) se obtuvo:

$$\%vacíos\ compactado = \frac{100(SxW) - PU_c}{SxW}$$

$$\%vacíos\ compactado = \frac{100(2,569 \times 998) - 1,871 \times 10^3}{2,569 \times 998}$$

$$\%vacíos\ compactado = 27,013\%$$

### 3.6.4.2. Peso unitario y contenido de vacíos del agregado grueso

#### a. Peso del agregado suelto y compactado

Los pesos unitarios suelto y compactado del agregado grueso se hallaron con las ecuaciones descritas en 3.6.4.1.

Asimismo, se encontró que:

$$PM_B = 4,100 \text{ kg.}$$

$$VM_B = 5301,450 \text{ cm}^3.$$

$$PT_s = 11,750 \text{ kg.}$$

$$PT_c = 12,500 \text{ kg.}$$

Luego, empleando la ecuación (3.10) se determinó el peso suelto y el peso compactado del agregado grueso.

**a.1. Peso del agregado grueso suelto ( $PA_S$ )**

$$PA_S = PT_S - PM_B = 11,750 - 4,100$$

$$PA_S = 7,650 \text{ kg}$$

**a.2. Peso del agregado grueso compactado ( $PA_C$ )**

$$PA_C = PT_C - PM_B = 12,500 - 4,100$$

$$PA_C = 8,400 \text{ kg}$$

**b. Peso unitario del agregado**

El peso unitario del agregado grueso se calculó con la ecuación (3.11).

**b.1. Peso unitario del agregado grueso suelto**

$$PU_S = \frac{PA_S}{VM_B}$$

$$PU_S = \frac{7,650}{5301,450}$$

$$PU_S = 1,443 \times 10^{-3} \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$PU_S = 1,443 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

**b.2. Peso unitario del agregado grueso compactado**

$$PU_C = \frac{PA_C}{VM_B}$$

$$PU_C = \frac{8,400}{5301,450}$$

$$PU_C = 1,584 \times 10^{-3} \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$PU_C = 1,584 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

**c. Contenido de vacíos**

Con los datos encontrados, se determinó el contenido de vacíos del agregado grueso suelto y compactado empleando la ecuación (3.12), con las mismas condiciones asumidas en 3.6.4.1.

**c.1. Contenido de vacíos del agregado grueso suelto**

$$S = 2,655 \text{ (véase } P_{em} \text{ en el ítem 3.6.3.2.)}$$

$$PU_s = 1,443 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$$

$$W = 998 \frac{kg}{m^3}$$

Entonces:

$$\%vacíos \text{ suelto} = \frac{100(SxW) - PU_s}{SxW}$$

$$\%vacíos \text{ suelto} = \frac{100(2,655 \times 998) - 1,443 \times 10^3}{2,655 \times 998}$$

$$\%vacíos \text{ suelto} = 45,541\%$$

**c.2. Contenido de vacíos del agregado fino compactado**

$$PU_c = 1,584 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$$

Entonces:

$$\%vacíos \text{ compactado} = \frac{100(SxW) - PU_c}{SxW}$$

$$\%vacíos \text{ compactado} = \frac{100(2,655 \times 998) - 1,584 \times 10^3}{2,655 \times 998}$$

$$\%vacíos \text{ compactado} = 40,201\%$$



Finalmente, se puede resumir los resultados de 3.6.4.1. y 3.6.4.2., para observar las características y contrastes de los parámetros encontrados.

**Tabla 206: Características físicas de los recipientes empleados.**

Recipiente	Peso (kg)	Altura (cm)	Ancho (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
Molde Proctor	5,20	16,50	10,00	1295,91
Briquetera	4,10	30,00	15,00	5301,44

Fuente: Propia.

**Tabla 207: Peso unitario y contenido de vacíos de los agregados.**

Muestra	PT <sub>s</sub> (kg)	PT <sub>c</sub> (kg)	PA <sub>s</sub> (kg)	PA <sub>c</sub> (kg)	PU <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	PU <sub>c</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	%vacíos suelto	%vacíos compactado
Agregado fino	7,38	7,62	2,19	2,43	1,69x10 <sup>3</sup>	1,87 x10 <sup>3</sup>	34,24%	27,01%
Agregado grueso	11,75	12,50	7,65	8,40	1,44 x10 <sup>3</sup>	1,58 x10 <sup>3</sup>	45,54%	40,20%

Fuente: Propia.

En la Tabla 207 se observa que el agregado fino tiene un peso unitario superior al peso unitario del agregado grueso, tanto en condición suelta como en condición compactada. Esto se debe a que la arena puede lograr un mejor acomodamiento de sus partículas y alcanzar una mejor compactación que la grava. Lo anterior se sustenta plenamente en los resultados encontrados para el contenido de vacíos, donde el agregado grueso tiene mayor cantidad de vacíos que el agregado fino.

En el caso de la escoria de cobre, no fue necesario realizar estos ensayos sobre este material debido a que el diseño de mezclas no se realizó en función a sus propiedades físicas y mecánicas. Sin embargo, a partir de lo explicado en 3.6.3. es fácil intuir que la EFC tendría un peso unitario, suelto y compactado, superior al de los agregados fino y grueso, y que su contenido de vacíos sería parecido al encontrado para el agregado fino.





### 3.6.5. Resistencia a la abrasión o desgaste del agregado grueso

El desgaste del material se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Desgaste (\%)} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (3.13)$$

Donde:

P1: peso inicial total de la muestra seca (gr).

P2: peso final de la muestra seca retenida en el tamiz N° 12 (gr).

Los datos obtenidos en el ensayo de abrasión son:

$$P_1 = 5004,5 \text{ gr}$$

$$P_2 = 4074,0 \text{ gr}$$

Con esos valores se calculó el desgaste, expresado en porcentaje, con la ecuación (3.13).

$$\text{Desgaste (\%)} = \frac{5004,5 - 4074,0}{5004,5} \times 100$$

$$\text{Desgaste (\%)} = 18,59\%$$

El desgaste describe el desempeño de las partículas de agregado grueso como componente del concreto. «Las normas suelen permitir un límite máximo de desgaste del 50%. Sin embargo, de acuerdo con las condiciones del concreto deseado, se pueden requerir límites más exigentes. Los agregados de alta resistencia al desgaste suelen tener pérdidas de menos del 20%» (Porrero et al., 2009, pág. 79).

Bajo la premisa anterior, un desgaste de 18,59% indica que el agregado grueso tiene una buena resistencia a la abrasión. Entonces se puede afirmar que la grava de la cantera de Huacarpay es apropiada para la elaboración de concretos que cumplirán funciones estructurales y de elevada resistencia.



### 3.6.6. Determinación del contenido de humedad de los agregados

#### 3.6.6.1. Contenido de humedad del agregado fino

El contenido de humedad se calculó empleando la expresión:

$$w = \frac{P_{agua}}{P_{ms}} \times 100 \quad (3.14)$$

Donde:

$P_{agua}$ : peso del agua contenido en la muestra (gr), que se obtiene de la diferencia entre el peso inicial y el peso final ( $P1 - P2$ ).

$P_{ms}$ : peso de la muestra seca (gr), que se obtiene de la diferencia entre el peso final y el peso del recipiente ( $P2 - P_{recipiente}$ ).

Los valores obtenidos para  $P1$  y  $P2$  se detallan a continuación:

$P1 = 1305,7 \text{ gr}$  (peso de la muestra húmeda más el peso del recipiente  $P_{recipiente} = 105,5$  gr).

$P2 = 1283,7 \text{ gr}$  (peso de la muestra seca más el peso del recipiente  $P_{recipiente} = 105,5$  gr).

Finalmente, con la ecuación (3.14) se calculó el contenido de humedad del agregado fino:

$$w = \frac{P_{agua}}{P_{ms}} \times 100 = \frac{P1 - P2}{P2 - P_{recipiente}} \times 100$$

$$w = \frac{1035,7 - 1283,7}{1283,7 - 105,5} \times 100$$

$$w = 1,87\%$$

#### 3.6.6.2. Contenido de humedad del agregado grueso

Se empleó la ecuación (3.14) y sus respectivas condiciones, para calcular el contenido de humedad del agregado grueso.

Los valores obtenidos para  $P1$  y  $P2$  se detallan a continuación:

$P1 = 4506,1 \text{ gr}$  (peso de la muestra húmeda más el peso del recipiente  $P_{\text{recipiente}} = 506,1$  gr).

$P2 = 4497,7 \text{ gr}$  (peso de la muestra seca más el peso del recipiente  $P_{\text{recipiente}} = 506,1$  gr).

Finalmente:

$$w = \frac{4506,1 - 3991,6}{4497,7 - 506,1} \times 100$$

$$w = 0,21\%$$

**Tabla 208: Contenido de humedad de los agregados.**

Muestra	Peso húmedo P1 (gr)	Peso seco P2 (gr)	Peso del recipiente (gr)	Contenido de humedad w (%)
Agregado grueso	1305,7	1283,7	105,5	1,87
Agregado fino	4506,1	4497,7	506,1	0,21

Fuente: Propia.

Vista la baja capacidad de absorción de agua de la escoria de cobre, determinada en el ítem 3.6.3.3., se consideró que no era necesario hallar el contenido de humedad. Además, al tener un peso específico mayor que el del agregado grueso, es obvio que su estructura molecular es muy compacta y difícilmente permitirá la acumulación de agua dentro de las partículas.

### 3.6.7. Análisis del diseño de mezcla para un concreto con $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

De los ensayos aplicados sobre los agregados y otros componentes del concreto, se obtuvo una serie de valores que permitieron realizar un diseño de mezcla de concreto, para obtener una resistencia a la compresión de  $210 \text{ kg/cm}^2$  tras 28 días de curado por inmersión.

La metodología de diseño desarrollada por el comité 211 del ACI (American Concrete Institute), empleada en el desarrollo de esta tesis, propone una dosificación típica por el método de volúmenes absolutos, la cual asume que el concreto diseñado no está expuesto a agentes degradantes (sin aire incorporado), no incluye aditivos y no considera condiciones excepcionales a las cuales se exponen la muestras de concreto.

### 3.6.7.1. Características físicas y mecánicas de los componentes del concreto

#### 3.6.7.1.1. Características de los agregados

Para fabricar las probetas se emplearon agregados fino de la cantera de Cunyac y grueso de la cantera de Huacarpay, los cuales fueron sometidos a los ensayos especificados en las normas técnicas necesarios para conocer sus principales parámetros físicos, los que determinan en gran medida características importantes del concreto, como la resistencia a la compresión.

**Tabla 209: Características físicas de los agregados.**

Descripción	Agregado	
	Fino	Grueso
Cantera	Cunyac	Huacarpay
Peso específico	2,569 gr/cm <sup>3</sup>	2,655 gr/cm <sup>3</sup>
Peso unitario compactado	1871 kg/m <sup>3</sup>	1584 kg/m <sup>3</sup>
Peso unitario suelto	1686 kg/m <sup>3</sup>	1443 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de finura	2,51	---
Tamaño máximo	---	1 pulg
Tamaño máximo nominal	---	3/4 pulg
Contenido de humedad	1,87%	0,21%
Absorción	3,31%	1,03%

Fuente: Propia.

#### 3.6.7.1.2. Características del cemento

Esta investigación empleó dos tipos de cementos: tipo IP y tipo V.

El cemento Portland puzolánico tipo IP es el más usado en nuestro medio debido a la facilidad para obtenerlo y, sobre todo, es preferido gracias a las propiedades físicas y mecánicas que le otorga la puzolana a este tipo de cemento.

En Cusco, el cemento Portland tipo V se puede conseguir únicamente a pedido. Ello se debe a que este tipo de cemento se emplea en la construcción de elementos que estarán en contacto con agentes agresivos, salinos y ácidos. Por eso, se emplea mucho en obras expuestas a agua de mar. Su uso está muy difundido en la costa peruana.

Las características de ambos tipos de cemento, necesarias para realizar el diseño de mezcla, se aprecian a continuación.

Tabla 210: Características físicas de los cementos tipo IP y tipo V.

Tipo de cemento	Marca	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Peso por bolsa (kg)
IP	Yura	2850	42,5
V	Andino	3150	42,5

Fuente: Propia.

### 3.6.7.1.3. Características del agua

El agua empleada en el diseño de mezclas fue potable, y satisfizo los requisitos propuestos en la NTP 339.088 y en la norma de concreto E.060.

### 3.6.7.2. Resistencia a la compresión del concreto

En este trabajo de investigación se requirió que la resistencia a la compresión ( $f'c$ ) del concreto patrón (o de referencia) alcance los 210 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de curado por inmersión.

### 3.6.7.3. Cálculo de la resistencia de diseño

Como inicialmente no se conocían las propiedades estáticas (factor de seguridad), para calcular la resistencia a la compresión del concreto se asumieron los valores siguientes, de acuerdo a E.060.

$$\text{Si: } f'c < 210 \text{ kg/cm}^2 \quad \rightarrow f'cr = (f'c + 70) \text{ kg/cm}^2 \quad (3.15)$$

$$\text{Si: } 210 \text{ kg/cm}^2 \leq f'c \leq 350 \text{ kg/cm}^2 \quad \rightarrow f'cr = (f'c + 85) \text{ kg/cm}^2 \quad (3.16)$$

$$\text{Si: } 350 \text{ kg/cm}^2 < f'c \quad \rightarrow f'cr = (1,1f'c + 50) \text{ kg/cm}^2 \quad (3.17)$$

De acuerdo a lo indicado previamente, se requirió un concreto de resistencia mínima 210 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de curado, entonces se asumió como parámetro de diseño lo descrito en la segunda premisa. Debido a ello, la resistencia promedio requerida en la investigación se calculó con la ecuación (3.16).

$$f'cr = (210 + 85) \text{ kg/cm}^2$$

$$f'cr = 295 \text{ kg/cm}^2$$



### 3.6.7.4. Diseño de mezcla de un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ , según ACI 211.1

#### 3.6.7.4.1. Selección del asentamiento

**Tabla 211: Asentamientos recomendables para diferentes tipos de estructuras.**

Tipo de estructura	Slump (pulgada)	
	máximo	mínimo
Muros de cimentación reforzados y zapatas	3	1
Losas de cimentación, cajones hidráulicos y calzaduras	3	1
Vigas y muros reforzados	4	1
Columnas	4	1
Pavimentos y losas	3	1
Concreto masivo	2	1

Fuente: (ACI Committee 211, 2002, pág. 7).

Se requiere que el concreto diseñado tenga un comportamiento estructural de alto desempeño, por lo cual se eligió:

$$\text{Slump} = 4'' \text{ (condición plástica)}$$

Se elige el valor máximo de la tabla porque se considera que se aplicará vibración para consolidar el concreto, el cual se va a diseñar para ser empleado en la construcción de elementos estructurales.

La metodología ACI 211.1 recomienda que cuando no se aplica vibración al concreto, se incremente 1 pulgada a los valores de la Tabla 211. Este no es el caso contemplado en la investigación.

#### 3.6.7.4.2. Selección del tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso

El agregado grueso atravesó el tamiz de 1", y el primer retenido se obtuvo en el tamiz de 3/4", entonces:

$$\text{TMN} = 3/4''$$

3.6.7.4.3. Selección del contenido de agua y del contenido de aire

**Tabla 212: Requisitos aproximados de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado.**

Asentamiento		Agua, kg/m <sup>3</sup> de concreto para los tamaños máximos nominales de agregado indicados									
(cm)	(pulgada)	9,5 mm (3/8")	12,5 mm (1/2")	19 mm (3/4")	25 mm (1")	37,5 mm (1 1/2")	50 mm (2")	75 mm (3")	150 mm (6")		
<b>Concreto sin aire incorporado</b>											
2,5 a 5,0	1 a 2	207	199	190	179	166	154	130	113		
7,5 a 10,0	3 a 4	228	216	205	193	181	169	145	124		
15,0 a 17,5	6 a 7	243	228	216	202	190	178	160	---		
Cantidad aproximada de aire atrapado en el concreto sin aire incorporado (%)		3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2		
<b>Concreto con aire incorporado</b>											
2,5 a 5,0	1 a 2	181	175	168	160	150	142	122	107		
7,5 a 10,0	3 a 4	202	193	184	175	165	157	133	119		
15,0 a 17,5	6 a 7	216	205	197	184	174	166	154	---		
Promedios recomendados del contenido total de aire, porcentaje (%) por nivel de exposición:											
		Exposición leve		4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
		Exposición moderada		6	5,5	5	4,5	4,5	4	3,5	3
		Exposición severa		7,5	7	6	6	5,5	5	4,5	4

Fuente: (ACI Committee 211, 2002, pág. 8).

El TMN del agregado empleado en el diseño de mezcla es 3/4", y se eligió un asentamiento de 3" a 4"; además, no se contempla la incorporación de aire, por lo tanto:

$$\text{Peso del agua} = 205 \text{ lt} = 205 \text{ kg}$$

De acuerdo a la tabla, el aire atrapado es 2% del volumen total por metro cúbico, lo cual equivale a 0,020 m<sup>3</sup>.

$$\text{Aire atrapado} = 2\% = 0,020 \text{ m}^3$$

#### 3.6.7.4.4. Selección de la relación agua cemento (a/c)

Tabla 213: Correspondencia entre la relación agua/cemento y esfuerzo a compresión del concreto.

Esfuerzo a compresión a los 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación agua/cemento, por peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
420	0,41	---
350	0,48	0,40
280	0,57	0,48
210	0,68	0,59
140	0,82	0,74

Fuente: (ACI Committee 211, 2002, pág. 9).

Con  $f'_{cr} = 295 \text{ kg/cm}^2$  asumido, se emplearon los valores de la Tabla 213 para interpolar la relación agua cemento.

$f'_{cr}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	a/c
280	0,57
295	x
350	0,48

$$\frac{280 - 350}{295 - 350} = \frac{0,57 - 0,48}{x - 0,48}$$

Entonces la relación agua/cemento hallada fue:

$$a/c = 0,551$$

#### 3.6.7.4.5. Determinación del contenido de cemento

La cantidad de cemento requerida para el diseño de mezcla se determina mediante la división del peso de agua por metro cúbico hallado en 3.6.7.4.3. entre la relación agua cemento encontrada en 3.6.7.4.4.

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{\text{Peso del agua (kg)}}{a/c} \quad (3.18)$$

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{205}{0,551}$$

$$\text{Contenido de cemento} = 372,24 \text{ kg}$$





Si se divide el resultado hallado entre 42,5 kg (peso comercial de una bolsa de cemento, y también de un pie cúbico de dicho material), se obtiene la cantidad de bolsas de cemento necesarias para un metro cúbico de concreto.

$$\# \text{ bolsas de cemento} = \frac{\text{Contenido de cemento (kg)}}{\text{Peso por bolsa de cemento (kg)}} \quad (3.19)$$

$$\# \text{ bolsas de cemento} = \frac{372,24}{42,5}$$

$$\# \text{ bolsas de cemento} = 8,76 \text{ bolsas}$$

En forma general, el volumen de un material se puede obtener en función de su peso y de su peso específico a partir de la ecuación siguiente.

$$\text{Volumen} = \frac{\text{Peso (kg)}}{\text{Peso específico } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)} \quad (3.20)$$

El contenido de cemento obtenido se dividió entre su peso específico, como indica la ecuación (3.20), lo cual permitió encontrar el volumen de cemento requerido para elaborar un metro cúbico de mezcla.

$$\text{Volumen de cemento} = \frac{\text{Peso del cemento (kg)}}{\text{Peso específico del cemento } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}$$

**Tabla 214: Volumen de cemento necesario por metro cúbico de mezcla, por tipo de cemento.**

Tipo de cemento	Volumen de cemento (m <sup>3</sup> )
IP	0,1306
V	0,1182

Fuente: Propia.

## 3.6.7.4.6. Cálculo del contenido de agregado grueso

**Tabla 215: Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto, para diferentes módulos de finura del agregado fino.**

Tamaño máximo nominal del agregado		Volumen de agregado grueso seco compactado por unidad de volumen de concreto, para diferentes módulos de finura de agregado fino			
(mm)	(pulgada)	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	3/8	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5	1/2	0,59	0,57	0,55	0,53
19	3/4	0,66	0,64	0,62	0,60
25	1	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5	1 ½	0,75	0,73	0,71	0,69
50	2	0,78	0,76	0,74	0,72
75	3	0,82	0,80	0,78	0,76
150	6	0,87	0,85	0,83	0,81

Fuente: (ACI Committee 211, 2002, pág. 12).

El análisis granulométrico del agregado fino dio como resultado un módulo de finura —que suele conocerse como módulo de fineza en el medio local— igual a 2,51; con ese dato se recurrió a la Tabla 215 para hallar el volumen de agregado grueso por volumen unitario de mezcla. Fue necesario realizar una interpolación en función de los valores conocidos proporcionados por el cuadro.

Módulo de finura AF = 2,51

Módulo de finura del agregado fino	Volumen de agregado grueso
2,4	0,66
2,51	x
2,6	0,64

$$\frac{2,4 - 2,6}{2,51 - 2,6} = \frac{0,66 - 0,64}{x - 0,64}$$



$$\text{Volumen de agregado grueso} = \frac{b}{b_0} = 0,649 \text{ m}^3$$

Donde:

b/b<sub>0</sub>: relación que se obtiene de la división del peso del agregado grueso seco (kg) entre el peso unitario del agregado grueso seco y compactado (kg/m<sup>3</sup>).

El peso seco del agregado grueso es:

$$\text{Peso AG} = \frac{b \text{ (kg)}}{b_0 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)} \times \text{Peso unitario seco compactado AG} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \quad (3.21)$$

$$\text{Peso AG} = 0,649 \text{ m}^3 \times 1584 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Peso AG} = 1028,016 \text{ kg}$$

### 3.6.7.4.7. Cálculo del contenido de agregado fino (método del volumen absoluto)

**Tabla 216: Resumen de resultados obtenidos sobre el análisis de los componentes del concreto.**

Descripción	Peso (kg)	Volumen (m <sup>3</sup> )
Cemento	372,244	---
Agua	205,000	---
Agregado grueso (seco)	1028,016	---
Aire (volumen absoluto)	---	0,020

Fuente: Propia.

**Tabla 217: Resumen de pesos específicos de los componentes del concreto.**

Descripción	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )
Cemento tipo IP	2850
Cemento tipo V	3150
Agua	1000
Agregado grueso (seco)	2655
Aire (volumen absoluto)	1,204*

Fuente: Propia.

\* El peso específico del aire a 20 °C (temperatura media en Cusco) es 1,204 kg/m<sup>3</sup>.

Se empleó la ecuación (3.20) con los datos de las tablas precedentes, para hallar los volúmenes de los componentes del concreto por unidad de volumen.

**Tabla 218: Volumen de los componentes del concreto por metro cúbico.**

Componente del concreto	Volumen de los componentes del concreto por metro cúbico, por tipo de cemento (m <sup>3</sup> )	
	Tipo IP	Tipo V
Cemento	0,1306	0,1182
Agua	0,2050	0,2050
Agregado grueso	0,3872	0,3872
Aire atrapado	0,0200	0,0200
<b>∑ volúmenes</b>	<b>0,7428</b>	<b>0,7304</b>

Fuente: Propia.

Luego se calculó el volumen absoluto de agregado fino necesario para fabricar un metro cúbico de concreto.

$$\text{Volumen absoluto AF} = \text{Volumen unitario} - \sum \text{volúmenes} \quad (3.22)$$

Los resultados encontrados se muestran en la tabla siguiente.

**Tabla 219: Volumen absoluto de agregado fino por tipo de cemento.**

Volumen absoluto de agregado fino por metro cúbico, por tipo de cemento (m <sup>3</sup> )	
Tipo IP	Tipo V
0,2572	0,2696

Fuente: Propia.

Con la ecuación (3.20) se obtuvo el peso del agregado fino necesario para fabricar un metro cúbico de concreto, para cada tipo de cemento empleado en este estudio.

**Tabla 220: Peso del agregado fino por metro cúbico de concreto, por tipo de cemento.**

Peso del agregado fino por metro cúbico, por tipo de cemento (kg)	
Tipo IP	Tipo V
660,7163	692,6727

Fuente: Propia.

### 3.6.7.4.8. Ajuste por contenido de humedad de los agregados

Fue necesario realizar correcciones de pesos por contenido de humedad de los agregados en un metro cúbico de material. Para ello se emplearon las ecuaciones siguientes, para el agregado fino y para el agregado grueso, respectivamente.

$$\left. \begin{aligned} \text{Peso corregido AF} &= (1 + W_{AF}) \times \text{Peso seco AF} \\ \text{Peso corregido AG} &= (1 + W_{AG}) \times \text{Peso seco AG} \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

**Tabla 221: Pesos corregidos del agregado grueso, y del agregado fino por tipo de cemento, por unidad de volumen.**

Peso corregido del agregado grueso (kg)	Peso corregido del agregado fino por tipo de cemento (kg)	
	Tipo IP	Tipo V
1030,1851	673,0532	705,6063

Fuente: Propia.

Luego, se calculó el balance de agua en función del contenido de humedad y de la absorción de los agregados.

$$\text{Balance de agua} = \text{Contenido de humedad} - \text{Absorción} \quad (3.24)$$

**Tabla 222: Balance de agua en los agregados.**

Balance de agua	
Agregado Grueso	Agregado fino
-0,0082	-0,0144

Fuente: Propia.

El signo negativo indica que la capacidad de absorción de agua es mayor que el contenido de humedad del agregado en el momento del ensayo, es decir, que el agregado no está completamente saturado en su condición natural.

Cálculo de la contribución de agua (aporte de agua):

$$\text{Contribución de agua} = \text{Peso corregido} \times \text{Balance de agua} \quad (3.25)$$

Tabla 223: Contribución de agua de los agregados.

Contribución de agua del agregado grueso (kg)	Contribución de agua del agregado fino por tipo de cemento (kg)	
	Tipo IP	Tipo V
-8,4269	-9,7243	-10,1946

Fuente: Propia.

Determinación del agua de mezcla final:

$$\text{Agua final} = \text{Peso del agua} - (\text{Contribución de agua AG} + \text{Contribución de agua AF}) \quad (3.26)$$

Tabla 224: Agua de mezcla final por tipo de cemento.

Agua de mezcla final por tipo de cemento (kg)	
Tipo IP	Tipo V
223,1512	223,6215

Fuente: Propia.

### 3.6.7.4.9. Dosificación por metro cúbico de concreto

Finalmente, se tienen los pesos corregidos de cada uno de los componentes del concreto, los cuales se muestran a continuación.

Tabla 225: Pesos corregidos de los componentes del concreto por metro cúbico de mezcla.

Componente	Pesos corregidos de los componentes del concreto por metro cúbico, por tipo de cemento (kg)	
	Tipo IP	Tipo V
Cemento	372,2438	372,2438
Agua	223,1512	223,6215
Agregado grueso	1030,1851	1030,1851
Agregado fino	673,0532	705,6063

Fuente: Propia.

Contenido de aire atrapado = 0,020 m<sup>3</sup>.

Sin embargo, se consideró un desperdicio de 5% de material y se obtuvo lo siguiente:

**Tabla 226: Pesos corregidos de los componentes del concreto por metro cúbico de mezcla con 5% de desperdicio.**

Componente	Pesos corregidos de los componentes del concreto por metro cúbico, por tipo de cemento (kg)	
	Tipo IP	Tipo V
Cemento	390,8560	390,8560
Agua	234,3087	234,8026
Agregado grueso	1081,6944	1081,6944
Agregado fino	706,7059	740,8866

Fuente: Propia.

Luego se obtuvo los pesos corregidos en proporción por volumen de probeta (30 cm x 15 cm).

$$\text{Volumen de probeta} = \frac{\pi(d)^2}{4} \times h \quad (3.27)$$

$$\text{Volumen de probeta} = \frac{\pi(0,15)^2}{4} \times 0,30$$

$$\text{Volumen de probeta} = 0,0053m^3$$

Y los pesos corregidos en proporción por volumen de probeta, asumiendo un desperdicio de 5% de material, se aprecian en la tabla siguiente.

**Tabla 227: Pesos corregidos de los componentes del concreto por volumen de probeta con 5% de desperdicio.**

Componente	Pesos corregidos de los componentes del concreto por volumen de probeta, por tipo de cemento (kg)	
	Tipo IP	Tipo V
Cemento	1,9734	1,9734
Agua	1,1830	1,1855
Agregado grueso	5,4615	5,4615
Agregado fino	3,5681	3,7407
<b>Peso total por probeta</b>	<b>12,1861</b>	<b>12,3611</b>

Fuente: Propia.

Proporciones de cada componente del concreto en función de la cantidad y tipo de cemento.

**Tabla 228: Proporciones de los componentes del concreto respecto a la cantidad de cemento.**

Tipo de cemento	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Agua (lt/bolsa)
IP	1	1,81	2,77	28,03
V	1	1,90	2,77	28,08

Fuente: Propia.

### 3.6.8. Consistencia del concreto

A partir del asentamiento hallado de manera experimental en pulgadas, se calculó su equivalencia en centímetros; los resultados se pueden apreciar en la tabla siguiente.

**Tabla 229: Asentamiento de la mezcla fresca para 7, 14 y 28 días de curado y diferentes porcentajes de EFC.**

Tipo de cemento	% EFC	Asentamiento del concreto fresco					
		7 días de curado		14 días de curado		28 días de curado	
		pulgada	cm	pulgada	cm	pulgada	cm
IP	0%	3,34	8,49	3,09	7,86	3,00	7,62
	5%	3,53	8,97	3,13	7,94	3,25	8,26
	10%	3,88	9,84	3,38	8,57	3,56	9,05
	15%	4,44	11,27	3,72	9,45	3,84	9,76
	20%	4,75	12,07	4,03	10,24	4,38	11,11
	25%	5,34	13,57	4,97	12,62	4,69	11,91
	30%	5,78	14,68	5,75	14,61	4,88	12,38
	35%	6,13	15,56	6,19	15,72	5,63	14,29
	40%	6,63	16,83	6,81	17,30	6,25	15,88
	50%	7,31	18,57	7,38	18,73	6,81	17,30
V	0%	3,34	8,49	3,41	8,65	3,38	8,57
	5%	3,88	9,84	3,81	9,68	3,44	8,73
	10%	4,03	10,24	4,28	10,87	3,94	10,00
	15%	4,31	10,95	4,94	12,54	3,88	9,84
	20%	4,84	12,30	5,16	13,10	4,38	11,11
	25%	5,44	13,81	5,91	15,00	4,72	11,99
	30%	5,81	14,76	6,38	16,19	5,78	14,68
	35%	6,38	16,19	6,81	17,30	6,56	16,67
	40%	7,31	18,57	7,47	18,97	7,81	19,84
	50%	8,03	20,40	8,31	21,11	9,00	22,86

Fuente: Propia.

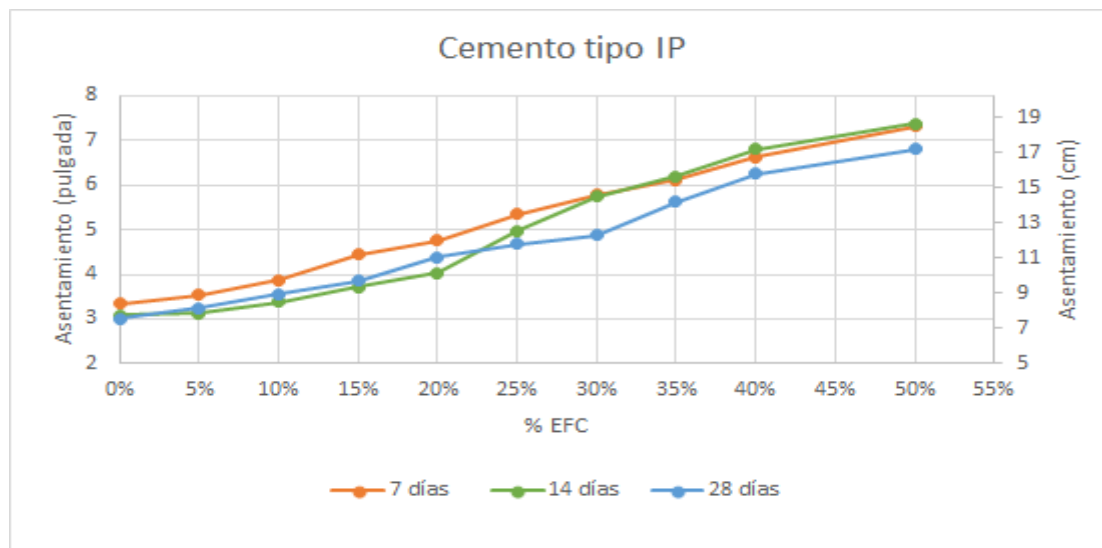


Los valores obtenidos para el asentamiento del concreto fresco se presentan en pulgadas y en centímetros, como se puede observar en la Tabla 229. En pulgadas porque es la unidad de medida más utilizada en el medio para expresar el asentamiento de una mezcla; en centímetros porque es lo que recomienda la norma técnica. Además, la bibliografía se refiere de manera teórica al asentamiento indicando valores referenciales en centímetros, es decir, en el sistema internacional de unidades (SI).

Se puede ver que el incremento de la cantidad de escoria de fundición de cobre tiene una incidencia directamente proporcional sobre el asentamiento del concreto fresco. A mayor cantidad de escoria de cobre, mayor es el asentamiento de la mezcla; es decir que a medida que se incrementan las proporciones de EFC, el concreto se hace más fluido.

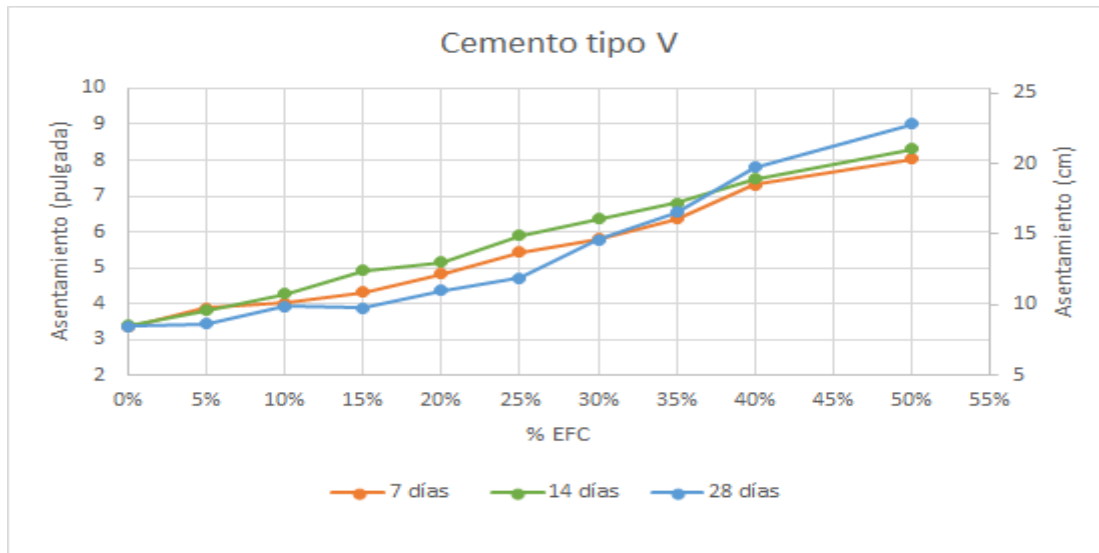
Por otra parte, más adelante, en la Tabla 385, se puede observar el promedio de los asentamientos para todos los tiempos de curado y la clasificación de la mezcla según su consistencia (véase 4.1. de Resultados).

Así, queda demostrada la relación directa que existe entre la cantidad de escoria de cobre y la consistencia del concreto fresco. Pero téngase en cuenta que fluidez excesiva no significa necesariamente una mejoría de la consistencia, ya que si el concreto es demasiado fluido, la mezcla podría ser poco trabajable.



Fuente: Propia.

**Figura 70: Desarrollo del asentamiento de la mezcla, fabricada con cemento tipo IP, con el incremento de escoria de cobre.**



Fuente: Propia.

**Figura 71: Desarrollo del asentamiento de la mezcla, fabricada con cemento tipo V, con el incremento de escoria de cobre.**

Por otro lado, en la Figura 70 y en la Figura 71 se puede notar claramente que el asentamiento posee un incremento proporcional al aumento de escoria de cobre en reemplazo del agregado fino. Para verificar el nivel de dependencia entre ambos parámetros, se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson por cada par de datos % EFC – asentamiento.

**Tabla 230: Coeficientes de correlación y determinación, datos % EFC – asentamiento, en probetas fabricadas con cementos tipo IP y tipo V.**

Tipo de cemento	Coeficiente	Tiempo de curado		
		7 días	14 días	28 días
IP	R	0,9973	0,9810	0,9916
	R <sup>2</sup>	0,9947	0,9624	0,9832
V	R	0,9903	0,9984	0,9610
	R <sup>2</sup>	0,9807	0,9968	0,9236

Fuente: Propia.

La Tabla 230 muestra los coeficientes de correlación de Pearson ( $R$ ) de los porcentajes de escoria de cobre y el asentamiento de la mezcla. Es evidente que hay una correspondencia muy alta entre ambos parámetros, ya que en todos los casos los resultados son positivos y están muy próximos a 1.

Asimismo, también se pueden observar los coeficientes de determinación ( $R^2$ ), que son el resultado de elevar al cuadrado los coeficientes de correlación. Los  $R^2$  representan la proporción de variación de un parámetro cuando varía el otro. En todos los casos los resultados se

aproximan a 1; usualmente se expresan en porcentaje, por lo cual se puede decir que todos los valores están cerca de 100%. A partir de este análisis y de las explicaciones teóricas y experimentales, podría intuirse una influencia negativa sobre la resistencia del concreto endurecido: la baja capacidad de absorción de la escoria de cobre hace que haya más agua libre dentro de la mezcla y la práctica convencional indica que a mayor cantidad de agua la relación agua cemento aumenta y la resistencia se reduce.

### 3.6.9. Cuantificación de probetas cilíndricas de concreto

La cantidad de probetas fabricadas se describen en la Tabla 5 del ítem 3.3.2.4.

Los especímenes elaborados fueron manipulados con mucho cuidado y colocados sobre una lámina de caucho que asimiló vibraciones e impactos durante el transporte a laboratorio.

### 3.6.10. Determinación de la resistencia a la compresión del concreto

#### 3.6.10.1. Determinación de la resistencia a la compresión del concreto mediante índice de rebote

Se halló el promedio de los datos descritos entre la Tabla 19 y la Tabla 78 por cada probeta fabricada. Con la ecuación de la curva de calibración del esclerómetro, en posición vertical y dirección de disparo hacia abajo, se determinó la resistencia a la compresión del concreto.

En las tablas siguientes se detallan los resultados obtenidos para probetas fabricadas con cemento tipo IP y se indica en los recuadros con **fondo gris** los datos que fueron excluidos de los cálculos por no estar dentro del rango establecido por las normas para este ensayo.

**Tabla 231: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 0% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	$f'c$ gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP07EC00	28,5	24,0	22,0	21,9	20,5	19,8	18,5	17,5	15,5	20,0	155,883
2IP07EC00	25,2	22,8	20,5	18,7	18,2	17,9	16,8	16,7	16,4	18,5	134,808
3IP07EC00	22,1	20,8	20,2	19,4	19,4	18,7	18,6	17,7	16,4	19,3	145,637
4IP07EC00	21,9	20,4	19,9	19,3	19,1	18,8	18,3	17,0	15,5	18,9	140,684
5IP07EC00	21,8	20,7	19,9	19,8	18,0	17,2	16,1	15,5	15,3	18,3	131,331
6IP07EC00	21,6	20,5	19,6	18,7	18,4	18,0	17,8	17,1	16,2	18,7	137,027
										$f'c$ promedio=	140,895

Fuente: Propia.

**Tabla 232: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 5% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP07EC05	25,5	24,1	21,1	21,0	20,4	20,1	19,8	17,2	16,2	20,6	165,218
2IP07EC05	22,3	21,9	21,7	21,0	20,8	20,5	19,5	19,2	17,1	20,4	162,932
3IP07EC05	25,5	22,4	22,4	21,2	20,6	19,1	18,2	17,3	16,9	20,4	162,280
4IP07EC05	24,9	24,1	22,0	20,3	19,9	19,9	19,4	17,2	16,0	20,4	162,443
5IP07EC05	23,8	22,1	20,7	20,3	20,2	19,9	19,8	17,1	16,3	20,0	156,754
6IP07EC05	22,4	21,8	20,8	20,4	19,5	19,1	18,4	18,3	17,2	19,8	153,034
<b>f'c promedio=</b>											160,443

Fuente: Propia.

**Tabla 233: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 10% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP07EC10	27,5	26,2	26,1	23,0	22,9	21,9	21,8	20,8	15,8	23,8	213,037
2IP07EC10	29,2	25,0	22,5	22,0	21,7	20,3	19,9	19,5	18,2	21,1	173,157
3IP07EC10	31,3	28,0	27,8	23,2	23,1	22,4	21,0	20,1	20,0	23,2	204,212
4IP07EC10	27,9	25,1	22,1	22,0	21,1	20,8	20,5	20,1	18,9	22,1	186,865
5IP07EC10	29,0	27,8	21,7	20,5	19,6	18,9	18,8	18,2	18,0	19,4	147,515
6IP07EC10	21,8	21,3	20,7	20,0	19,5	19,4	18,6	18,5	17,9	19,7	152,711
<b>f'c promedio=</b>											179,583

Fuente: Propia.

**Tabla 234: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 15% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP07EC15	28,0	27,1	23,4	21,0	21,2	20,5	19,3	22,6	20,2	22,6	194,913
2IP07EC15	24,9	24,9	23,3	23,0	22,8	22,1	22,1	19,2	19,0	22,4	191,552
3IP07EC15	25,0	24,1	23,9	23,5	22,3	21,8	20,8	19,7	18,2	22,1	188,202
4IP07EC15	23,8	23,1	22,4	22,4	22,4	22,2	21,0	20,5	19,5	21,9	184,862
5IP07EC15	25,3	25,3	24,0	23,8	23,1	22,3	21,8	20,0	19,9	22,8	198,623
6IP07EC15	23,4	23,4	22,3	21,8	21,3	20,5	20,5	20,0	19,9	21,5	177,885
<b>f'c promedio=</b>											189,340

Fuente: Propia.

**Tabla 235: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 20% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP07EC20	26,0	25,6	24,1	23,7	22,6	22,5	22,0	20,0	18,5	22,8	197,779
2IP07EC20	27,0	26,0	25,0	23,8	21,8	21,7	21,5	20,1	19,8	23,0	200,652
3IP07EC20	29,5	26,4	26,1	25,4	25,0	24,0	23,8	20,2	17,8	24,4	222,934
4IP07EC20	29,5	26,0	25,1	24,8	24,2	24,0	23,7	23,0	19,1	23,7	212,459
5IP07EC20	29,8	26,7	25,2	24,5	23,9	21,3	21,2	21,0	20,5	23,0	201,732
6IP07EC20	25,3	25,0	24,5	24,2	24,1	23,6	23,1	21,8	21,0	23,6	210,685
<b>f'c promedio=</b>											207,707

Fuente: Propia.

**Tabla 236: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 25% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP07EC25	30,8	29,3	27,9	25,9	24,2	24,1	23,3	23,3	23,1	25,8	244,166
2IP07EC25	28,9	26,6	24,8	22,6	20,8	20,7	20,0	19,8	17,0	22,4	191,384
3IP07EC25	31,2	29,0	27,5	25,0	23,4	22,5	21,3	21,0	19,6	23,7	211,305
4IP07EC25	32,0	25,5	24,0	23,2	22,0	21,7	21,5	21,4	17,3	22,1	187,157
5IP07EC25	29,8	28,2	26,4	25,8	24,2	23,3	22,6	20,1	18,4	24,3	221,330
6IP07EC25	26,1	25,6	25,4	24,0	23,2	23,1	21,8	20,7	19,3	23,2	204,892
<b>f'c promedio=</b>											210,039

Fuente: Propia.

**Tabla 237: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 30% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP07EC30	33,5	27,5	26,5	25,8	24,8	21,5	20,9	20,2	19,8	23,4	206,890
2IP07EC30	31,8	28,4	26,3	24,5	23,5	22,9	22,9	22,7	21,6	24,1	218,057
3IP07EC30	32,1	32,0	28,2	25,7	25,5	24,6	23,7	20,6	16,2	25,8	244,015
4IP07EC30	29,5	25,0	24,7	23,7	23,5	23,1	21,8	20,0	19,8	22,7	196,598
5IP07EC30	26,0	24,8	24,5	24,2	23,9	23,5	21,9	21,7	20,0	23,4	207,103
6IP07EC30	28,7	24,8	24,7	24,1	23,6	23,1	22,2	21,5	20,8	23,7	212,224
<b>f'c promedio=</b>											214,148

Fuente: Propia.

**Tabla 238: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 35% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP07EC35	28,5	28,1	27,0	26,9	26,7	26,0	25,7	23,8	23,3	26,2	251,409
2IP07EC35	29,1	29,0	26,1	25,2	24,0	21,5	20,1	20,1	20,0	23,9	214,965
3IP07EC35	26,8	26,8	26,6	26,0	25,0	23,7	22,8	22,2	21,0	24,5	224,960
4IP07EC35	27,0	26,8	26,1	26,1	25,0	24,6	22,5	21,0	20,8	24,4	223,230
5IP07EC35	28,2	25,7	23,6	22,9	21,8	21,6	21,5	20,1	18,9	22,7	196,598
6IP07EC35	26,7	26,1	25,7	24,2	23,3	22,6	21,7	20,5	19,7	23,4	207,103
<b>f'c promedio=</b>											219,711

Fuente: Propia.

**Tabla 239: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 40% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP07EC40	29,0	27,9	25,1	24,8	24,2	22,4	21,9	21,1	20,0	24,0	217,197
2IP07EC40	31,0	26,8	26,7	25,5	25,4	25,0	24,6	23,0	20,1	25,3	237,494
3IP07EC40	28,3	25,1	24,5	23,8	22,5	22,0	21,9	20,0	19,8	23,1	202,685
4IP07EC40	27,7	26,2	23,7	23,3	23,1	22,3	22,2	21,9	21,5	23,5	209,490
5IP07EC40	28,2	24,8	24,7	24,3	23,0	22,1	22,0	21,5	20,7	23,5	208,466
6IP07EC40	26,4	24,1	24,0	23,8	23,5	22,7	22,5	21,7	21,5	23,4	206,593
<b>f'c promedio=</b>											213,654

Fuente: Propia.

**Tabla 240: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 50% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP07EC50	27,1	26,7	25,1	24,1	23,8	23,5	22,8	22,5	22,0	24,2	219,262
2IP07EC50	23,3	22,6	22,1	21,5	21,2	21,1	20,8	20,4	20,4	21,5	178,382
3IP07EC50	27,0	25,2	25,0	24,1	24,0	22,5	21,4	19,8	18,8	23,1	202,516
4IP07EC50	25,4	23,1	22,9	22,6	22,0	21,7	20,9	20,8	18,9	22,0	186,531
5IP07EC50	25,0	23,8	23,3	22,3	21,6	21,0	20,5	20,0	19,7	21,9	184,696
6IP07EC50	24,1	23,8	23,5	23,0	22,4	22,1	21,6	20,1	18,2	22,1	187,366
<b>f'c promedio=</b>											193,125

Fuente: Propia.

**Tabla 241: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 0% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP14EC00	33,5	23,9	22,8	22,6	21,1	20,1	19,9	19,8	16,8	20,9	169,272
2IP14EC00	26,2	23,9	23,1	22,4	22,2	22,0	20,5	19,8	18,0	22,0	186,197
3IP14EC00	24,2	23,9	21,8	21,2	20,2	20,2	19,8	18,6	18,4	20,9	169,970
4IP14EC00	28,2	26,4	23,2	22,5	21,8	21,1	21,0	20,0	18,3	22,5	193,568
5IP14EC00	23,5	23,0	22,9	22,7	22,3	22,0	20,3	19,2	18,9	21,6	180,703
6IP14EC00	24,7	23,6	22,5	21,8	21,6	21,1	21,0	20,1	19,9	21,8	183,197
<b>f'c promedio=</b>											180,484

Fuente: Propia.

**Tabla 242: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 5% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP14EC05	24,6	24,1	23,7	23,5	22,5	22,0	21,6	21,3	19,9	22,6	194,745
2IP14EC05	26,2	22,5	21,3	21,0	21,0	20,5	20,3	20,2	20,2	21,5	178,051
3IP14EC05	26,0	23,0	21,9	21,0	21,0	20,9	20,5	19,8	18,8	21,4	177,554
4IP14EC05	27,9	21,7	21,5	21,0	21,0	20,2	20,2	19,8	18,9	20,5	164,299
5IP14EC05	32,5	24,2	24,0	23,2	22,6	22,4	20,8	19,7	18,6	21,9	185,092
6IP14EC05	23,5	23,1	23,1	22,9	22,6	22,3	20,5	20,1	20,0	22,0	186,197
<b>f'c promedio=</b>											180,989

Fuente: Propia.

**Tabla 243: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 10% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP14EC10	35,6	27,0	25,4	25,0	24,8	23,5	21,0	20,0	19,3	23,3	204,977
2IP14EC10	22,9	22,4	22,3	22,0	22,0	21,8	20,6	20,4	20,1	21,6	180,206
3IP14EC10	27,9	27,5	22,1	21,5	20,3	20,2	20,0	19,8	17,8	21,2	173,342
4IP14EC10	25,8	25,8	22,5	22,0	22,0	21,9	20,6	20,1	20,0	22,3	190,546
5IP14EC10	35,0	26,6	23,0	23,0	22,2	22,1	21,1	20,8	20,5	22,4	192,244
6IP14EC10	25,5	25,5	23,1	22,9	22,3	22,0	21,3	20,4	19,7	22,5	193,904
<b>f'c promedio=</b>											189,203

Fuente: Propia.



**Tabla 244: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 15% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP14EC15	30,2	27,3	27,1	26,4	25,9	24,9	21,5	20,2	19,7	24,8	228,948
2IP14EC15	32,9	24,7	24,5	24,3	23,9	23,8	23,0	22,0	21,5	23,5	208,232
3IP14EC15	24,6	24,5	23,8	23,3	23,2	23,1	23,0	22,2	21,6	23,3	205,062
4IP14EC15	27,9	24,0	23,3	23,2	22,7	22,2	21,8	21,5	19,8	22,9	200,144
5IP14EC15	24,2	23,4	22,0	21,8	21,8	21,7	21,6	21,4	21,1	22,1	187,700
6IP14EC15	24,8	23,9	23,5	23,2	23,1	21,8	19,1	18,7	17,4	21,7	181,866
<b>f'c promedio=</b>											201,992

Fuente: Propia.

**Tabla 245: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 20% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP14EC20	24,0	23,7	23,7	22,5	21,3	21,2	21,0	20,2	19,9	21,9	185,196
2IP14EC20	32,5	26,0	25,6	24,1	22,8	22,5	22,1	21,5	20,4	23,1	203,067
3IP14EC20	33,5	27,0	26,0	23,7	23,5	23,2	22,6	22,0	21,5	23,7	211,689
4IP14EC20	33,5	29,0	25,9	25,8	24,1	24,0	23,9	23,8	23,6	25,0	232,276
5IP14EC20	25,9	24,2	23,7	23,2	23,0	22,9	22,4	22,2	21,8	23,3	205,062
6IP14EC20	37,7	25,1	24,8	24,6	24,4	24,0	23,3	22,9	22,3	23,9	215,351
<b>f'c promedio=</b>											208,774

Fuente: Propia.

**Tabla 246: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 25% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP14EC25	26,1	26,0	25,9	25,7	25,5	25,4	25,3	24,4	24,4	25,4	238,545
2IP14EC25	33,0	28,1	26,0	25,6	25,1	24,8	24,2	23,0	21,4	24,8	228,558
3IP14EC25	32,5	28,0	27,5	26,6	26,3	26,3	26,3	25,3	24,0	27,0	263,522
4IP14EC25	26,0	25,5	25,2	24,9	24,7	24,7	23,8	23,1	20,5	24,3	220,640
5IP14EC25	28,5	28,1	26,6	25,8	25,3	24,7	22,9	22,8	20,7	25,0	232,777
6IP14EC25	27,2	26,5	25,8	25,7	25,3	25,2	24,4	24,3	23,7	25,3	237,494
<b>f'c promedio=</b>											236,923

Fuente: Propia.



**Tabla 247: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 30% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP14EC30	29,8	29,2	27,5	27,1	26,5	26,1	26,0	25,3	22,3	26,6	258,162
2IP14EC30	26,3	26,2	26,0	25,0	24,6	23,5	22,7	22,6	22,5	24,4	222,366
3IP14EC30	29,4	29,0	27,0	26,8	26,0	25,9	25,4	25,3	25,2	26,7	258,519
4IP14EC30	30,9	26,8	26,4	26,3	25,7	25,3	24,0	23,3	22,2	25,7	242,406
5IP14EC30	28,0	26,1	26,1	25,8	25,7	25,6	25,3	25,0	24,9	25,8	245,223
6IP14EC30	29,4	28,2	26,0	25,8	25,8	25,5	25,2	24,8	19,6	25,6	241,352
<b>f'c promedio=</b>											244,671

Fuente: Propia.

**Tabla 248: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 35% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP14EC35	26,0	25,4	25,3	25,1	25,0	24,8	24,5	22,5	22,0	24,5	224,441
2IP14EC35	31,1	27,5	25,8	25,1	25,0	24,5	24,4	23,7	23,4	25,6	241,703
3IP14EC35	30,4	28,6	28,0	26,1	26,0	25,7	25,1	24,6	24,5	26,6	256,737
4IP14EC35	27,8	27,5	26,5	26,3	26,2	25,5	25,2	24,1	23,7	25,9	245,752
5IP14EC35	29,6	26,5	26,2	26,1	26,0	25,6	24,9	24,8	23,3	25,9	246,105
6IP14EC35	27,7	26,3	25,8	25,5	25,1	25,0	24,9	24,8	23,7	25,4	238,720
<b>f'c promedio=</b>											242,243

Fuente: Propia.

**Tabla 249: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 40% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP14EC40	28,3	27,8	27,1	26,8	26,6	26,4	26,0	25,9	25,7	26,7	259,589
2IP14EC40	28,5	27,3	27,0	26,6	26,5	26,1	25,7	22,6	20,3	25,6	241,879
3IP14EC40	26,1	25,6	25,0	24,8	24,6	23,7	22,4	22,0	21,9	24,0	216,682
4IP14EC40	27,4	26,0	25,6	25,0	24,9	24,9	24,6	24,0	23,3	25,1	233,300
5IP14EC40	30,9	25,6	24,5	24,3	24,1	23,9	23,4	23,3	20,1	23,7	211,112
6IP14EC40	27,0	25,7	25,6	25,6	25,3	25,0	24,5	24,2	22,8	25,1	233,300
<b>f'c promedio=</b>											232,644

Fuente: Propia.

**Tabla 250: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 50% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP14EC50	27,2	25,0	24,8	24,6	24,6	24,5	23,7	22,3	21,2	24,2	219,779
2IP14EC50	27,5	26,0	25,8	25,5	25,2	25,1	24,9	21,1	18,3	25,1	234,238
3IP14EC50	28,2	24,0	23,6	22,4	22,0	21,1	20,5	20,2	18,0	21,5	178,175
4IP14EC50	30,5	27,9	26,0	25,5	24,6	24,0	23,9	23,4	19,9	25,1	233,300
5IP14EC50	23,9	23,6	23,5	23,3	22,9	22,0	21,3	21,1	19,4	22,3	191,049
6IP14EC50	25,4	25,3	24,6	24,5	23,1	23,0	22,4	22,0	21,3	23,5	208,978
<b>f'c promedio=</b>											210,920

Fuente: Propia.

**Tabla 251: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 0% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP28EC00	32,7	32,3	27,8	25,8	24,4	23,6	23,4	22,9	19,9	25,9	245,752
2IP28EC00	26,1	24,5	24,0	23,8	23,5	23,4	23,0	22,9	20,3	23,5	208,808
3IP28EC00	33,6	25,0	23,9	23,5	22,8	22,3	22,2	22,1	22,0	23,0	200,779
4IP28EC00	26,3	24,1	24,1	22,3	22,2	21,6	20,6	20,0	19,8	22,3	191,049
5IP28EC00	24,0	23,5	23,1	22,7	22,6	21,8	20,6	19,6	15,8	21,5	178,879
6IP28EC00	25,3	24,9	23,6	23,6	23,5	23,5	22,7	22,5	22,2	23,5	209,319
<b>f'c promedio=</b>											205,764

Fuente: Propia.

**Tabla 252: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 5% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP28EC05	29,7	27,8	26,3	23,5	22,9	22,5	22,1	21,6	20,3	24,1	217,713
2IP28EC05	24,4	23,6	21,5	21,3	20,9	19,8	19,0	18,6	18,0	20,8	168,000
3IP28EC05	33,8	33,8	33,3	31,7	28,0	24,0	23,6	22,8	21,0	28,9	294,492
4IP28EC05	27,9	24,4	24,3	23,9	23,9	23,6	23,5	22,7	21,0	23,9	215,137
5IP28EC05	34,1	27,4	26,4	24,6	23,8	23,7	23,5	23,2	22,1	24,3	221,740
6IP28EC05	32,0	28,6	28,6	28,1	28,0	26,1	25,3	25,2	22,9	27,2	267,108
<b>f'c promedio=</b>											230,698

Fuente: Propia.

**Tabla 253: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 10% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP28EC10	34,8	26,9	26,8	26,7	26,3	26,2	26,2	25,5	25,4	26,250	251,852
2IP28EC10	26,9	26,1	25,9	25,8	25,1	24,7	23,0	22,7	22,0	24,689	227,212
3IP28EC10	30,8	27,3	26,5	26,4	25,9	25,5	25,4	24,3	22,7	26,089	249,284
4IP28EC10	27,0	26,6	26,1	25,8	25,7	25,5	24,7	23,7	22,1	25,244	235,919
5IP28EC10	25,7	25,0	24,9	24,6	24,4	24,4	24,2	24,0	24,0	24,578	225,479
6IP28EC10	31,7	28,0	26,1	25,6	24,9	24,6	24,4	24,1	24,0	25,933	246,810
<b>f'c promedio=</b>											239,426

Fuente: Propia.

**Tabla 254: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 15% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP28EC15	28,5	27,3	25,7	25,6	25,4	25,0	24,9	24,5	24,4	25,7	243,110
2IP28EC15	32,6	25,3	25,1	25,0	24,6	24,5	24,0	23,8	20,4	24,1	217,864
3IP28EC15	33,0	29,2	24,6	24,1	24,0	23,9	23,7	23,7	21,4	24,3	221,546
4IP28EC15	30,7	30,3	29,5	26,3	26,1	26,1	26,0	25,5	25,1	27,3	268,546
5IP28EC15	28,8	27,3	27,0	26,2	26,1	25,7	25,7	25,5	24,3	26,3	252,473
6IP28EC15	26,8	26,6	26,1	26,0	25,9	25,7	25,1	25,0	24,7	25,8	244,166
<b>f'c promedio=</b>											241,284

Fuente: Propia.

**Tabla 255: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 20% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP28EC20	28,8	28,1	26,5	26,3	25,6	25,5	24,6	24,4	24,0	26,0	247,517
2IP28EC20	26,7	25,8	25,4	25,1	25,1	24,4	24,3	23,5	21,8	24,7	227,039
3IP28EC20	28,0	26,6	26,2	26,0	25,7	25,5	25,3	25,0	20,3	25,4	238,370
4IP28EC20	28,7	27,3	27,2	26,4	26,3	26,0	25,6	24,0	23,9	26,2	250,346
5IP28EC20	33,3	28,8	26,7	26,1	25,9	25,9	25,9	25,7	21,5	25,8	244,893
6IP28EC20	32,0	27,0	26,4	26,3	26,2	25,9	25,4	25,2	24,8	26,6	257,093
<b>f'c promedio=</b>											244,210

Fuente: Propia.

**Tabla 256: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 25% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP28EC25	28,6	28,5	28,0	27,8	27,2	26,6	26,6	26,5	25,8	27,3	268,546
2IP28EC25	27,8	27,4	27,1	26,3	26,2	26,1	25,8	25,5	25,5	26,4	254,425
3IP28EC25	30,0	28,0	28,0	27,9	26,3	25,7	25,5	25,3	25,1	26,9	261,733
4IP28EC25	28,9	28,2	27,9	26,8	26,5	26,3	25,8	25,0	24,6	26,7	258,519
5IP28EC25	34,0	29,3	27,8	27,1	27,0	27,0	27,0	26,8	25,4	27,2	266,704
6IP28EC25	26,8	26,3	26,1	25,8	25,7	24,9	24,3	24,1	22,7	25,2	235,046
<b>f'c promedio=</b>											257,495

Fuente: Propia.

**Tabla 257: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 30% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP28EC30	31,6	27,1	27,1	26,9	26,7	26,6	26,0	26,0	26,0	27,1	265,672
2IP28EC30	28,1	27,5	27,4	27,2	27,0	26,5	26,3	25,6	24,4	26,7	258,519
3IP28EC30	27,8	27,5	27,3	26,9	26,8	26,6	26,5	24,9	24,9	26,6	257,093
4IP28EC30	26,6	26,4	26,4	26,2	25,8	25,7	25,3	24,0	23,7	25,6	241,001
5IP28EC30	29,7	28,7	27,8	27,1	26,5	26,5	26,4	26,1	23,1	26,9	261,911
6IP28EC30	27,3	27,2	27,1	26,9	26,8	26,6	26,4	25,1	25,0	26,5	255,670
<b>f'c promedio=</b>											256,644

Fuente: Propia.

**Tabla 258: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 35% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP28EC35	34,0	29,1	28,0	26,6	26,6	26,5	26,5	26,3	25,7	26,9	262,470
2IP28EC35	28,6	28,0	27,9	27,7	26,8	26,5	26,0	26,0	26,0	27,1	264,776
3IP28EC35	34,9	28,5	26,7	26,3	26,1	25,8	25,7	25,5	25,3	26,2	251,652
4IP28EC35	30,0	28,2	28,0	27,7	27,3	27,2	27,1	26,6	26,3	27,6	273,592
5IP28EC35	34,7	29,6	28,0	27,4	26,7	26,6	25,4	24,3	24,3	26,5	256,448
6IP28EC35	30,1	27,9	27,6	27,3	26,6	26,5	26,5	25,4	25,3	27,0	264,238
<b>f'c promedio=</b>											262,196

Fuente: Propia.

**Tabla 259: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 40% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP28EC40	28,0	27,8	26,8	26,4	25,8	23,9	23,6	22,1	21,6	25,1	233,824
2IP28EC40	27,0	26,0	26,0	25,9	25,6	25,5	24,1	23,6	22,1	25,1	233,475
3IP28EC40	30,3	27,9	27,1	25,4	25,3	25,1	24,2	24,1	23,9	25,9	246,634
4IP28EC40	29,5	27,5	26,7	26,0	24,5	23,8	23,2	23,1	22,5	25,2	235,220
5IP28EC40	31,5	29,3	27,2	25,6	25,5	25,4	24,9	24,3	24,0	26,4	254,425
6IP28EC40	30,0	27,3	27,0	26,1	25,5	25,1	24,6	24,3	24,2	26,0	248,047
<b>f'c promedio=</b>											241,937

Fuente: Propia.

**Tabla 260: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 50% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1IP28EC50	28,1	27,9	27,5	27,2	26,6	25,5	23,9	20,3	19,7	25,2	235,046
2IP28EC50	25,1	24,7	23,9	23,8	22,6	22,6	22,3	21,8	20,8	23,1	202,176
3IP28EC50	28,2	27,0	26,1	25,3	25,2	24,9	20,3	19,5	18,1	23,8	214,108
4IP28EC50	28,2	24,0	23,1	22,8	22,7	22,3	21,9	21,8	21,8	23,2	203,873
5IP28EC50	28,1	24,2	23,3	22,7	22,7	22,6	22,5	22,2	20,1	23,2	203,533
6IP28EC50	24,7	24,2	24,1	23,8	23,7	23,6	23,6	22,6	21,5	23,5	209,319
<b>f'c promedio=</b>											211,343

Fuente: Propia.

Asimismo, luego del tratamiento y análisis de los datos obtenidos con los ensayos a los que fueron sometidas las probetas fabricadas con cemento tipo V se obtuvo los resultados detallados en las tablas que siguen.

**Tabla 261: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 0% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV07EC00	21,1	20,8	19,7	19,5	18,2	17,1	17,0	16,8	15,0	18,4	132,751
2VV07EC00	22,8	22,1	21,3	20,8	20,6	20,1	20,1	19,9	18,1	20,6	165,872
3VV07EC00	20,7	20,3	19,9	19,8	18,8	18,0	17,2	17,1	15,8	18,6	136,551
4VV07EC00	25,0	23,8	22,9	22,5	22,0	21,9	21,7	19,9	17,5	21,9	184,696
5VV07EC00	25,9	23,5	23,0	22,5	20,7	20,0	19,8	17,8	16,2	21,0	171,778
6VV07EC00	21,6	21,3	20,7	20,5	20,4	19,5	19,3	19,1	18,5	20,1	157,889
<b>f'c promedio=</b>											158,256

Fuente: Propia.

**Tabla 262: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 5% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	$f'c$ gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV07EC05	27,8	23,4	23,3	22,1	22,0	21,8	21,6	21,5	18,6	22,5	192,895
2VV07EC05	24,7	23,3	22,7	22,3	21,9	21,6	21,4	20,8	20,6	22,1	188,202
3VV07EC05	26,8	24,2	24,0	23,9	23,1	23,1	22,5	21,4	20,7	23,3	205,742
4VV07EC05	24,1	23,1	23,0	22,2	21,8	21,7	21,2	21,1	20,8	22,1	187,700
5VV07EC05	24,0	22,7	22,5	21,9	21,8	21,7	21,4	20,8	20,0	21,9	184,029
6VV07EC05	23,3	23,2	22,7	22,5	22,2	22,1	21,9	21,8	20,7	22,3	190,043
$f'c$ promedio=											191,435

Fuente: Propia.

**Tabla 263: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 10% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	$f'c$ gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV07EC10	24,2	22,8	22,3	21,5	21,5	20,4	19,9	19,0	18,0	21,1	172,107
2VV07EC10	21,8	21,6	21,6	20,9	20,8	20,4	19,7	19,7	19,4	20,7	166,035
3VV07EC10	28,8	28,4	25,1	22,8	22,7	21,1	18,7	18,1	16,6	21,7	181,347
4VV07EC10	27,9	27,2	26,2	25,9	23,3	22,8	22,0	21,4	20,1	24,1	217,885
5VV07EC10	32,0	29,6	27,7	27,6	25,1	24,1	23,5	23,0	22,8	26,2	250,346
6VV07EC10	25,5	24,6	23,1	23,1	23,0	22,4	21,1	20,5	19,1	22,5	193,399
$f'c$ promedio=											196,853

Fuente: Propia.

**Tabla 264: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 15% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	$f'c$ gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV07EC15	29,1	24,2	24,1	23,5	22,9	21,5	20,0	19,5	19,4	21,9	184,342
2VV07EC15	33,5	29,3	28,0	25,9	25,0	24,6	24,4	23,8	22,4	25,4	238,764
3VV07EC15	30,4	25,1	24,5	24,2	24,0	24,0	23,8	23,6	22,5	24,7	227,039
4VV07EC15	29,7	25,4	24,0	23,8	23,6	22,5	22,1	21,3	21,2	23,0	200,970
5VV07EC15	29,7	27,8	25,6	24,8	23,5	23,5	22,5	21,9	20,0	24,4	222,193
6VV07EC15	27,0	25,8	25,1	24,5	24,1	23,5	23,3	23,2	23,0	24,4	222,539
$f'c$ promedio=											215,974

Fuente: Propia.

**Tabla 265: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 20% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV07EC20	26,8	25,7	25,1	24,6	24,3	23,8	21,0	20,4	18,8	23,4	207,103
2VV07EC20	30,1	27,8	26,9	26,8	26,1	25,5	24,2	23,4	23,3	26,0	248,047
3VV07EC20	30,2	27,8	26,0	24,1	22,9	22,8	22,6	21,6	19,1	23,4	206,699
4VV07EC20	28,0	26,0	25,5	25,1	24,2	23,4	22,4	20,8	19,7	23,9	214,965
5VV07EC20	29,7	27,5	26,8	25,3	24,5	24,0	21,9	21,8	18,1	24,4	222,712
6VV07EC20	26,7	26,0	25,9	25,0	24,7	24,3	23,0	22,2	21,7	24,4	222,539
<b>f'c promedio=</b>										220,344	

Fuente: Propia.

**Tabla 266: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 25% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV07EC25	25,7	25,1	25,0	24,6	24,3	24,3	24,0	23,9	21,9	24,3	221,330
2VV07EC25	26,5	26,3	25,5	25,1	24,9	23,8	23,8	23,7	19,7	24,4	222,193
3VV07EC25	27,8	25,6	25,4	24,5	24,4	24,0	23,8	21,3	19,8	24,1	217,541
4VV07EC25	26,1	25,8	25,5	25,4	25,1	25,0	24,3	21,2	18,1	24,1	217,369
5VV07EC25	28,0	26,5	26,1	25,8	25,5	25,1	24,0	20,5	19,9	24,6	225,826
6VV07EC25	25,5	25,5	24,8	24,7	24,3	24,1	23,8	23,8	22,4	24,3	221,503
<b>f'c promedio=</b>										220,960	

Fuente: Propia.

**Tabla 267: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 30% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV07EC30	28,3	28,1	25,0	24,9	24,6	24,5	24,0	23,8	21,9	25,0	232,254
2VV07EC30	28,2	26,8	25,1	24,4	23,9	23,5	23,0	22,7	22,4	24,4	223,403
3VV07EC30	28,2	27,3	26,7	25,8	23,8	23,6	23,5	22,8	21,7	24,8	229,296
4VV07EC30	30,1	29,8	28,1	27,0	25,3	24,8	23,8	22,7	22,1	26,0	247,340
5VV07EC30	26,8	26,7	26,4	26,0	25,7	25,4	23,7	22,3	21,8	25,0	231,732
6VV07EC30	27,1	25,7	25,6	25,3	25,0	24,5	24,4	23,7	23,4	25,0	231,557
<b>f'c promedio=</b>										232,597	

Fuente: Propia.



**Tabla 268: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 35% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV07EC35	27,5	26,6	25,3	25,1	24,6	24,4	24,0	23,4	22,0	24,8	228,427
2VV07EC35	30,8	26,5	26,5	25,5	25,3	24,0	23,9	23,8	23,8	25,6	241,001
3VV07EC35	30,2	25,1	24,6	23,5	22,9	22,9	22,4	21,4	21,4	23,0	201,541
4VV07EC35	28,0	26,9	26,7	26,5	25,3	25,1	24,4	24,0	22,4	25,5	239,597
5VV07EC35	28,6	28,3	27,4	26,4	26,1	25,3	24,8	22,0	21,6	25,6	241,703
6VV07EC35	26,8	26,1	25,8	25,5	24,7	24,5	24,3	23,4	23,3	24,9	231,035
<b>f'c promedio=</b>										<b>230,551</b>	

Fuente: Propia.

**Tabla 269: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 40% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV07EC40	23,3	23,8	25,4	23,2	27,1	24,2	23,0	22,5	21,9	23,8	213,765
2VV07EC40	25,0	25,9	26,1	25,1	24,4	23,0	24,5	25,1	22,3	24,6	225,826
3VV07EC40	25,2	23,8	27,5	27,7	22,2	24,1	23,5	22,9	24,0	24,5	224,960
4VV07EC40	24,1	21,8	23,8	26,2	25,6	24,1	23,6	23,7	19,5	23,6	210,344
5VV07EC40	26,0	27,2	30,0	21,1	29,7	25,8	25,9	25,1	24,6	26,2	250,346
6VV07EC40	24,3	24,1	25,8	23,1	22,9	24,8	25,0	24,4	20,8	23,9	215,137
<b>f'c promedio=</b>										<b>223,396</b>	

Fuente: Propia.

**Tabla 270: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 50% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV07EC50	26,8	26,7	26,0	25,5	24,7	23,0	21,5	20,0	17,9	23,6	209,831
2VV07EC50	27,2	26,5	26,2	26,1	25,4	23,5	22,2	19,5	18,0	23,8	214,108
3VV07EC50	30,9	27,7	25,6	25,1	24,8	24,2	23,8	22,9	20,0	25,0	232,080
4VV07EC50	27,8	26,5	26,0	24,9	22,2	20,2	18,4	18,4	17,6	22,4	192,727
5VV07EC50	26,3	26,1	25,0	24,6	24,5	24,3	24,0	21,5	21,0	24,1	218,745
6VV07EC50	25,8	25,4	25,1	24,9	23,6	23,1	22,2	22,0	20,5	23,6	210,685
<b>f'c promedio=</b>										<b>213,030</b>	

Fuente: Propia.



**Tabla 271: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 0% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV14EC00	27,2	24,6	24,0	23,8	23,8	23,2	22,8	22,6	19,8	23,5	209,319
2VV14EC00	30,0	24,1	23,9	23,7	23,5	23,2	23,2	23,1	22,0	24,1	217,713
3VV14EC00	25,2	24,9	24,5	23,9	23,6	22,5	21,2	20,8	17,5	22,7	196,261
4VV14EC00	25,0	24,2	23,9	23,7	23,7	23,6	23,4	23,1	23,0	23,7	212,395
5VV14EC00	25,3	25,0	24,9	24,7	24,5	23,9	22,7	21,7	21,4	23,8	213,251
6VV14EC00	24,8	24,4	24,2	24,0	23,7	23,4	22,9	22,9	22,1	23,6	210,344
<b>f'c promedio=</b>											209,881

Fuente: Propia.

**Tabla 272: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 5% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV14EC05	26,9	26,1	25,7	25,2	24,6	24,2	24,1	22,8	20,1	24,4	222,884
2VV14EC05	34,8	25,0	24,8	24,5	23,6	22,5	22,1	21,0	19,8	22,9	199,827
3VV14EC05	28,3	27,8	26,2	25,7	25,4	22,1	21,6	20,5	19,9	24,2	219,090
4VV14EC05	28,9	26,5	26,1	24,9	23,8	22,9	22,6	22,3	22,0	24,4	223,403
5VV14EC05	32,2	29,6	27,8	26,8	26,5	26,4	26,1	24,1	23,8	27,0	264,417
6VV14EC05	26,0	25,5	25,3	25,1	24,9	24,7	24,6	24,5	24,2	25,0	231,732
<b>f'c promedio=</b>											226,892

Fuente: Propia.

**Tabla 273: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 10% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV14EC10	25,6	25,2	25,1	25,1	24,9	24,8	23,5	22,9	20,6	24,2	219,434
2VV14EC10	31,5	27,0	26,6	26,5	26,2	25,3	24,9	24,7	24,2	26,3	253,005
3VV14EC10	31,1	27,5	27,3	26,1	25,6	24,9	24,6	23,9	23,8	26,1	249,284
4VV14EC10	29,2	26,0	25,6	25,5	25,2	24,9	24,5	23,9	22,0	25,2	235,220
5VV14EC10	28,8	25,0	24,9	24,8	24,1	24,1	23,8	23,8	22,0	24,6	225,652
6VV14EC10	25,2	24,6	24,6	24,1	23,9	23,8	23,8	22,1	21,5	23,7	212,395
<b>f'c promedio=</b>											232,499

Fuente: Propia.

**Tabla 274: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 15% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	$f'c$ gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV14EC15	29,9	27,7	26,0	25,6	24,9	24,2	22,6	21,2	21,1	24,8	228,948
2VV14EC15	29,7	28,5	25,4	25,3	24,8	24,3	23,2	22,7	22,0	25,1	233,649
3VV14EC15	28,1	27,3	26,4	25,9	25,7	25,7	24,6	24,0	23,1	25,6	242,231
4VV14EC15	29,1	28,0	26,1	25,8	25,7	25,5	25,0	24,9	23,2	25,9	246,634
5VV14EC15	30,5	26,1	26,1	25,8	25,4	25,0	24,0	23,9	21,3	25,3	237,494
6VV14EC15	28,1	26,6	26,3	25,8	25,7	25,3	24,8	24,4	23,8	25,6	242,231
$f'c$ promedio=											238,531

Fuente: Propia.

**Tabla 275: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 20% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	$f'c$ gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV14EC20	35,1	27,0	26,6	24,9	24,9	24,4	23,8	23,7	23,4	24,8	229,535
2VV14EC20	27,7	25,8	25,5	25,5	25,3	25,1	24,9	24,9	21,8	25,2	234,696
3VV14EC20	32,0	27,1	26,3	26,2	25,7	24,4	24,0	22,9	20,6	25,5	239,421
4VV14EC20	27,5	26,6	26,2	26,0	25,8	24,9	24,8	24,3	24,2	25,6	241,352
5VV14EC20	30,2	28,5	26,1	26,0	25,5	25,2	25,2	24,8	24,7	26,2	251,763
6VV14EC20	27,2	26,8	26,3	26,0	25,4	25,3	25,1	25,0	24,8	25,8	244,166
$f'c$ promedio=											240,156

Fuente: Propia.

**Tabla 276: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 25% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	$f'c$ gráfico (kg/cm <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV14EC25	27,9	27,9	27,6	27,4	27,0	26,6	26,5	25,7	24,5	26,8	260,482
2VV14EC25	38,0	30,6	25,9	25,8	25,1	24,1	24,0	23,9	23,6	25,4	237,975
3VV14EC25	29,0	28,2	28,0	26,6	26,1	25,5	25,0	24,6	23,0	26,2	251,409
4VV14EC25	33,6	28,0	27,6	27,1	26,3	26,2	25,9	25,6	25,5	26,5	256,248
5VV14EC25	27,1	27,0	26,4	26,2	26,1	25,9	25,6	25,5	25,5	26,1	250,169
6VV14EC25	28,2	27,6	26,5	26,3	26,0	25,5	24,9	24,3	23,3	25,8	245,399
$f'c$ promedio=											250,280

Fuente: Propia.

**Tabla 277: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 30% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV14EC30	33,8	32,7	29,1	27,5	27,4	27,1	26,9	26,6	25,2	28,5	287,942
2VV14EC30	28,9	27,6	27,4	27,4	27,4	27,3	27,0	26,8	26,3	27,3	269,445
3VV14EC30	26,5	26,3	26,0	25,9	25,9	25,8	25,5	25,4	23,5	25,6	242,231
4VV14EC30	27,4	27,3	26,9	26,6	26,4	26,3	26,1	25,7	24,6	26,4	253,715
5VV14EC30	29,7	28,3	28,2	27,5	27,3	27,1	27,0	26,5	26,1	27,5	272,328
6VV14EC30	28,2	28,1	27,3	27,2	26,8	26,5	26,4	26,3	26,0	27,0	263,522
<b>f'c promedio=</b>											264,864

Fuente: Propia.

**Tabla 278: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 35% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV14EC35	32,0	32,0	27,8	27,7	27,6	27,6	27,1	26,8	25,9	28,3	284,657
2VV14EC35	28,0	27,7	27,4	27,2	26,9	26,6	25,5	25,3	25,3	26,7	258,341
3VV14EC35	28,4	28,1	28,0	27,9	27,6	27,4	27,0	26,8	26,5	27,5	272,328
4VV14EC35	32,6	28,5	28,2	27,5	27,2	27,0	26,8	26,2	25,0	27,7	274,676
5VV14EC35	27,9	27,8	27,0	27,0	26,6	26,5	26,4	26,1	25,8	26,8	260,482
6VV14EC35	28,8	27,6	27,5	27,5	27,4	27,2	26,8	26,7	26,1	27,3	268,546
<b>f'c promedio=</b>											269,838

Fuente: Propia.

**Tabla 279: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 40% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV14EC40	29,7	28,1	27,8	26,2	26,0	25,9	24,8	24,5	24,5	26,4	254,070
2VV14EC40	30,2	27,3	26,2	26,1	25,3	25,1	24,8	24,2	23,6	25,9	245,752
3VV14EC40	32,9	28,0	26,6	26,5	26,2	25,4	23,9	23,8	20,8	25,2	234,434
4VV14EC40	30,1	28,8	26,3	26,0	25,3	24,8	24,5	24,3	24,2	26,0	248,400
5VV14EC40	28,0	27,5	27,0	26,7	25,5	25,1	24,5	24,4	24,0	25,9	245,576
6VV14EC40	28,1	27,6	26,6	26,1	25,9	25,8	25,5	25,1	24,7	26,2	250,346
<b>f'c promedio=</b>											246,430

Fuente: Propia.

**Tabla 280: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 50% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV14EC50	30,1	29,7	27,5	26,1	25,9	25,4	25,3	24,5	24,0	26,5	255,848
2VV14EC50	28,8	28,6	26,1	24,9	24,9	23,8	23,1	22,9	17,5	25,4	238,173
3VV14EC50	26,3	26,1	25,8	25,7	25,5	24,6	24,2	24,0	21,1	24,8	229,122
4VV14EC50	26,1	26,1	25,6	24,6	24,5	24,1	24,1	23,9	23,4	24,7	227,559
5VV14EC50	26,6	26,1	25,8	25,6	25,1	24,3	24,1	22,7	21,3	24,6	226,172
6VV14EC50	26,1	26,1	25,5	25,4	25,3	24,7	24,5	24,5	23,3	25,0	232,777
<b>f'c promedio=</b>											234,942

Fuente: Propia.

**Tabla 281: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 0% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV28EC00	29,5	27,0	25,3	25,2	25,0	24,6	24,1	23,7	18,5	25,6	240,737
2VV28EC00	28,5	27,3	26,7	26,5	26,1	25,6	25,4	24,9	23,3	26,0	248,400
3VV28EC00	28,0	27,2	26,0	25,7	24,9	24,1	24,0	23,9	23,3	25,2	235,745
4VV28EC00	27,3	27,2	26,8	26,3	26,2	26,2	26,1	24,5	23,8	26,0	248,577
5VV28EC00	28,1	27,4	27,0	26,8	26,8	26,7	26,1	26,1	25,5	26,7	259,411
6VV28EC00	27,1	26,8	26,1	25,5	25,4	25,3	25,2	25,1	23,5	25,6	240,825
<b>f'c promedio=</b>											245,616

Fuente: Propia.

**Tabla 282: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 5% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV28EC05	30,1	29,2	27,1	26,8	26,8	26,6	26,3	25,8	24,8	27,1	264,776
2VV28EC05	28,2	26,9	25,6	25,5	24,9	24,1	24,0	23,0	22,3	24,9	231,209
3VV28EC05	31,0	30,2	30,1	29,7	29,6	25,3	24,8	23,9	23,5	27,6	273,050
4VV28EC05	32,0	31,4	29,2	27,3	27,1	27,1	27,1	26,6	26,2	28,2	283,747
5VV28EC05	28,0	27,8	27,8	27,5	27,5	27,4	26,9	26,8	26,3	27,3	269,266
6VV28EC05	28,0	27,0	25,8	25,8	24,6	24,3	24,2	24,2	23,7	25,3	236,619
<b>f'c promedio=</b>											259,778

Fuente: Propia.

**Tabla 283: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 10% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV28EC10	34,0	34,0	33,1	29,4	28,4	28,1	26,9	26,5	23,8	29,4	302,462
2VV28EC10	26,4	25,8	25,6	25,4	24,2	24,1	21,2	20,0	17,5	24,1	217,864
3VV28EC10	30,1	28,5	28,3	28,1	27,4	27,0	26,9	26,0	25,3	27,5	272,148
4VV28EC10	36,3	30,1	28,6	28,2	28,0	27,3	27,3	25,8	25,3	27,6	273,185
5VV28EC10	33,9	31,3	29,1	29,1	29,1	28,6	28,1	27,8	24,6	29,1	297,664
6VV28EC10	28,7	28,6	28,4	28,0	27,6	27,5	27,4	26,3	25,9	27,6	273,592
<b>f'c promedio=</b>											272,819

Fuente: Propia.

**Tabla 284: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 15% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV28EC15	33,8	29,8	28,5	28,0	27,2	27,1	26,7	26,3	26,0	28,2	282,654
2VV28EC15	35,2	32,3	30,8	30,0	29,1	28,1	27,8	26,8	26,4	28,9	295,112
3VV28EC15	34,2	29,3	28,5	28,4	28,3	28,1	27,6	27,2	27,1	28,1	281,132
4VV28EC15	32,1	29,9	28,0	27,4	27,1	26,6	26,2	25,5	24,8	27,5	272,148
5VV28EC15	32,7	27,8	27,8	27,4	27,3	26,8	26,7	26,7	26,0	27,1	264,888
6VV28EC15	37,8	28,2	28,0	27,6	27,4	27,3	26,1	26,0	25,8	27,1	264,686
<b>f'c promedio=</b>											276,770

Fuente: Propia.

**Tabla 285: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 20% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV28EC20	31,8	31,5	30,8	30,3	30,0	29,8	28,9	26,5	26,3	29,5	305,609
2VV28EC20	34,7	32,1	31,9	31,1	30,5	29,2	29,0	28,7	26,0	30,4	319,210
3VV28EC20	28,1	27,6	27,6	27,3	27,2	25,7	24,5	24,2	23,8	26,2	251,409
4VV28EC20	30,2	29,0	29,0	28,0	27,7	26,5	25,9	24,3	23,9	27,2	266,570
5VV28EC20	28,0	27,8	27,5	26,9	26,6	26,0	25,7	25,0	24,8	26,5	255,492
6VV28EC20	33,2	31,5	30,6	30,5	30,2	29,9	28,9	28,2	26,9	30,0	313,044
<b>f'c promedio=</b>											285,222

Fuente: Propia.

**Tabla 286: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 25% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV28EC25	30,3	29,8	29,4	29,2	28,7	28,0	27,2	26,1	25,2	28,2	283,564
2VV28EC25	38,5	36,1	29,6	28,7	28,1	27,8	27,3	26,8	26,0	27,8	276,148
3VV28EC25	33,7	29,3	28,8	28,3	27,5	27,4	26,8	26,6	24,1	28,1	281,018
4VV28EC25	33,8	30,0	28,9	28,8	27,0	26,7	25,9	24,7	24,0	27,8	276,122
5VV28EC25	38,3	29,8	28,5	27,8	27,7	27,4	27,0	26,3	24,3	28,6	289,405
6VV28EC25	32,1	29,8	29,3	28,5	28,1	27,6	27,2	27,1	26,4	28,5	287,577
<b>f'c promedio=</b>											282,306

Fuente: Propia.

**Tabla 287: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 30% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV28EC30	38,3	34,5	34,2	33,0	30,5	30,1	29,7	29,4	27,5	31,1	332,034
2VV28EC30	36,2	30,1	29,4	29,1	28,6	27,9	26,1	25,8	25,5	27,8	277,050
3VV28EC30	32,5	32,0	29,7	28,3	28,0	27,5	27,4	27,3	26,6	28,8	293,436
4VV28EC30	35,5	30,2	29,9	29,9	27,9	27,8	27,3	26,0	25,8	28,1	281,745
5VV28EC30	30,5	30,1	29,8	28,8	28,1	27,9	26,9	26,9	26,3	28,4	286,116
6VV28EC30	35,8	35,6	35,3	33,9	30,2	29,7	29,7	29,5	29,1	32,1	348,762
<b>f'c promedio=</b>											303,190

Fuente: Propia.

**Tabla 288: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 35% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV28EC35	36,1	36,1	35,7	34,2	34,0	31,3	28,8	27,9	25,6	33,0	364,778
2VV28EC35	38,0	34,3	33,9	33,6	29,8	28,1	27,3	26,9	24,2	30,6	322,613
3VV28EC35	38,0	34,9	32,1	31,7	31,2	30,2	29,7	29,0	27,6	30,8	326,724
4VV28EC35	35,6	34,7	30,2	30,1	29,1	29,0	28,2	28,2	27,6	30,3	318,274
5VV28EC35	32,1	30,1	28,5	28,1	27,7	27,4	27,0	26,2	26,0	28,1	282,109
6VV28EC35	36,0	33,8	30,5	30,1	29,1	28,8	28,8	28,0	27,8	30,3	318,648
<b>f'c promedio=</b>											322,191

Fuente: Propia.

**Tabla 289: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 40% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV28EC40	33,4	31,3	29,2	29,0	28,6	28,6	28,2	28,0	27,9	29,4	302,462
2VV28EC40	37,8	34,9	30,3	30,0	29,8	29,3	28,7	28,5	28,1	30,0	312,391
3VV28EC40	33,9	33,4	31,8	30,7	30,5	30,5	30,0	29,6	29,1	31,1	331,065
4VV28EC40	32,3	30,8	30,0	30,0	29,3	28,5	28,2	28,1	28,0	29,5	304,312
5VV28EC40	37,4	33,5	32,0	32,0	31,1	30,0	29,7	29,4	28,5	31,5	338,838
6VV28EC40	32,1	32,0	31,0	30,5	30,1	30,0	29,3	28,5	27,7	30,1	315,469
<b>f'c promedio=</b>											317,423

Fuente: Propia.

**Tabla 290: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 50% EFC, mediante esclerometría.**

Código de espécimen	Disparo									Promedio	f'c gráfico (kg/cm2)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1VV28EC50	30,7	30,5	29,9	29,0	28,5	28,0	26,1	25,9	24,4	28,1	281,927
2VV28EC50	35,8	30,2	29,6	29,1	28,6	27,3	27,3	25,5	20,7	28,2	283,851
3VV28EC50	29,3	28,9	28,9	28,0	27,9	27,8	27,5	27,0	26,0	27,9	278,840
4VV28EC50	34,2	30,2	30,1	28,5	27,4	26,9	26,3	25,3	23,9	27,3	269,131
5VV28EC50	30,1	29,3	29,1	28,8	28,3	27,8	27,6	26,4	25,9	28,1	282,473
6VV28EC50	30,3	29,2	29,0	28,5	27,8	27,7	27,3	27,1	26,1	28,1	281,927
<b>f'c promedio=</b>											279,691

Fuente: Propia.

Como se mencionó antes, los valores en fondo gris son los números o índices de rebote que no fueron considerados en la estimación de la resistencia a la compresión del concreto porque tuvieron una diferencia de 6 respecto al promedio de las nueve lecturas, por exceder o por quedar por debajo de dicho promedio.

En consecuencia, tras haber obtenido los valores promedio de la resistencia a la compresión del concreto mediante el ensayo de índice de rebote con esclerómetro, se reunieron los resultados *f'c* promedio de todas las tablas, tal y cual se muestra a continuación:



**Tabla 291: Resistencia a la compresión promedio mediante esclerometría, para cementos tipo IP y tipo V, para 7, 14 y 28 días de curado.**

Tipo de cemento	Cantidad de EFC	<i>f</i> 'c esclerometría promedio (kg/cm <sup>2</sup> ) respecto al tiempo de curado		
		7 días	14 días	28 días
IP	0%	140,895	180,484	205,764
	5%	160,443	180,989	230,698
	10%	179,583	189,203	239,426
	15%	189,340	201,992	241,284
	20%	207,707	208,774	244,210
	25%	210,039	236,923	257,495
	30%	214,148	244,671	256,644
	35%	219,711	242,243	262,196
	40%	213,654	232,644	241,937
	50%	193,125	210,920	211,343
V	0%	158,256	209,881	245,616
	5%	191,435	226,892	259,778
	10%	196,853	232,499	272,819
	15%	215,974	238,531	276,770
	20%	220,344	240,156	285,222
	25%	220,960	250,280	282,306
	30%	232,597	264,864	303,190
	35%	230,551	269,838	322,191
	40%	223,396	246,430	317,423
	50%	213,030	234,942	279,691

Fuente: Propia.

Como se puede apreciar en la Tabla 291, algunos valores difieren muy poco entre ellos y la diferencia de resistencia del concreto entre una proporción de escoria de cobre y otra aparentemente no es significativa. Sin embargo, es preciso aclarar que el modelo de esclerómetro utilizado (Procek, modelo N) especifica una dispersión de  $\pm 60$  kg/cm<sup>2</sup> para resultados entre 201 kg/cm<sup>2</sup> y 300 kg/cm<sup>2</sup>, y  $\pm 65$  kg/cm<sup>2</sup> para resistencias comprendidas entre 301 kg/cm<sup>2</sup> y 400 kg/cm<sup>2</sup>, debido a ello los resultados obtenidos fueron considerados satisfactorios. Pero el análisis de resultados posterior evidenció que era necesario conocer un valor más aproximado de la dispersión que describa de manera apropiada el comportamiento de la resistencia a la compresión del concreto planteada en esta tesis. Tales valores de dispersión (véase 3.6.14.) se hallaron en función de modelos de aproximación, los cuales permitieron obtener un rango más fiable para conocer la resistencia del concreto mediante prueba de esclerometría.



Pero, volviendo a los objetivos principales de la investigación, es importante notar que el máximo valor de la resistencia a la compresión del concreto se manifiesta con porcentajes de sustitución de agregado fino por escoria de fundición de cobre de 35%, lo cual se verifica para tiempos de curado de 7 días, 14 días y 28 días (valores resaltados en fondo amarillo en la tabla anterior). También se puede ver que en el cemento tipo V curado durante 7 días el valor máximo se ubica con una cantidad de 30% de escoria de cobre; lo mismo sucede en el caso del cemento tipo IP sumergido durante 14 días. No obstante, los resultados más resaltantes son los obtenidos para probetas sumergidas durante 28 días, donde, en teoría, se logra el 100% de resistencia del concreto endurecido.

### 3.6.10.2. Determinación de la resistencia a la compresión del concreto mediante compresión axial de probetas cilíndricas

Para calcular la resistencia a la compresión del concreto, primero fue necesario hallar el promedio de los diámetros obtenidos por cada una de las probetas fabricadas con cementos tipo IP y tipo V, los cuales se detallan entre la Tabla 79 y la Tabla 138. Con dichos promedios se obtuvo el área real de cada espécimen, para hallar un valor de  $f'c$  más preciso y aproximado a la realidad.

El área de la superficie plana circular, o sección transversal, de los cilindros se calculó empleando la ecuación siguiente:

$$A_o = \frac{\pi D_{prom}^2}{4} \quad (3.28)$$

Donde:

$A_o$ : área de la sección circular ( $\text{cm}^2$ ).

$D_{prom}$ : promedio de dos diámetros de cada probeta (cm).

Asimismo, el valor de la resistencia a la compresión de cada una de las briquetas fabricadas se obtuvo dividiendo el valor de la carga máxima aplicada entre el área, tal cual se aprecia en la siguiente ecuación:

$$f'c = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_o} \quad (3.29)$$



Donde:

$f'c$ : resistencia a la compresión del concreto endurecido ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ).

$P_{\text{máx}}$ : carga máxima aplicada antes del colapso de la probeta (kg).

$A_o$ : área de la sección circular ( $\text{cm}^2$ ).

En las tablas siguientes se aprecian los resultados encontrados para los especímenes elaborados con cemento tipo IP.

**Tabla 292: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 0% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área ( $\text{cm}^2$ )	$P_{\text{máx}}$ (kg)	$f'c$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
1IP07EC00	15,046	177,800	22400	125,984
2IP07EC00	15,179	180,957	24010	132,683
3IP07EC00	15,339	184,792	24380	131,932
4IP07EC00	15,173	180,814	27030	149,490
5IP07EC00	15,224	182,032	23480	128,988
6IP07EC00	15,209	181,661	24620	135,527
$f'c$ promedio=				<b>134,101</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 293: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 5% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área ( $\text{cm}^2$ )	$P_{\text{máx}}$ (kg)	$f'c$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
1IP07EC05	15,188	181,172	23920	132,029
2IP07EC05	15,187	181,148	27390	151,202
3IP07EC05	14,998	176,667	20500	116,037
4IP07EC05	15,241	182,439	26990	147,940
5IP07EC05	15,213	181,769	25820	142,048
6IP07EC05	15,169	180,719	24630	136,289
$f'c$ promedio=				<b>137,591</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 294: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 10% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP07EC10	15,145	180,148	24070	133,613
2IP07EC10	15,072	178,415	30300	169,829
3IP07EC10	15,266	183,038	27480	150,133
4IP07EC10	15,297	183,782	22270	121,176
5IP07EC10	15,229	182,151	22620	124,182
6IP07EC10	15,196	181,351	29480	162,558
<b>f'c promedio=</b>				<b>143,582</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 295: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 15% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP07EC15	15,209	181,673	26420	145,426
2IP07EC15	15,069	178,344	27240	152,738
3IP07EC15	15,246	182,558	26630	145,871
4IP07EC15	15,096	178,984	27060	151,187
5IP07EC15	15,214	181,793	31260	171,954
6IP07EC15	15,163	180,576	27560	152,623
<b>f'c promedio=</b>				<b>153,300</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 296: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 20% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP07EC20	15,150	180,267	29540	163,868
2IP07EC20	15,219	181,912	28180	154,910
3IP07EC20	15,240	182,415	27670	151,687
4IP07EC20	15,198	181,411	26880	148,172
5IP07EC20	15,151	180,290	29690	164,679
6IP07EC20	15,200	181,446	28450	156,796
<b>f'c promedio=</b>				<b>156,685</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 297: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 25% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP07EC25	15,314	184,190	31240	169,607
2IP07EC25	15,131	179,815	31040	172,622
3IP07EC25	15,084	178,699	32020	179,184
4IP07EC25	15,114	179,411	29730	165,709
5IP07EC25	15,130	179,791	23450	130,429
6IP07EC25	15,138	179,969	30880	171,585
<b>f'c promedio=</b>				<b>164,856</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 298: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 30% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP07EC30	15,116	179,458	33890	188,846
2IP07EC30	15,181	181,005	32580	179,995
3IP07EC30	15,243	182,487	29770	163,135
4IP07EC30	15,087	178,770	30760	172,064
5IP07EC30	15,200	181,458	32320	178,112
6IP07EC30	15,137	179,945	31910	177,332
<b>f'c promedio=</b>				<b>176,581</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 299: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 35% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP07EC35	14,986	176,385	32020	181,535
2IP07EC35	14,991	176,503	33110	187,589
3IP07EC35	15,193	181,291	31790	175,353
4IP07EC35	15,062	178,178	39700	222,810
5IP07EC35	15,249	182,630	36850	201,774
6IP07EC35	15,108	179,257	34840	194,358
<b>f'c promedio=</b>				<b>193,903</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 300: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 40% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP07EC40	15,187	181,148	31770	175,381
2IP07EC40	15,172	180,790	33890	187,455
3IP07EC40	15,110	179,316	32570	181,635
4IP07EC40	15,045	177,776	30460	171,339
5IP07EC40	15,230	182,175	32720	179,607
6IP07EC40	15,130	179,791	32520	180,877
<b>f'c promedio=</b>				<b>179,382</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 301: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, 50% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP07EC50	15,226	182,080	30190	165,807
2IP07EC50	15,177	180,910	26490	146,427
3IP07EC50	15,098	179,031	27690	154,666
4IP07EC50	15,133	179,862	28360	157,676
5IP07EC50	15,188	181,172	31080	171,550
6IP07EC50	15,160	180,493	28900	160,117
<b>f'c promedio=</b>				<b>159,374</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 302: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 0% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP14EC00	15,200	181,458	33640	185,387
2IP14EC00	15,076	178,510	30940	173,324
3IP14EC00	15,065	178,249	29140	163,479
4IP14EC00	15,201	181,482	35360	194,840
5IP14EC00	15,264	182,990	32830	179,409
6IP14EC00	15,162	180,540	32520	180,126
<b>f'c promedio=</b>				<b>179,427</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 303: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 5% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP14EC05	15,244	182,510	31200	170,949
2IP14EC05	15,229	182,151	36000	197,638
3IP14EC05	15,197	181,387	35680	196,707
4IP14EC05	15,075	178,486	31630	177,213
5IP14EC05	15,005	176,832	32060	181,302
6IP14EC05	15,166	180,648	33290	184,282
<b>f'c promedio=</b>				<b>184,682</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 304: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 10% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP14EC10	15,097	179,007	34030	190,104
2IP14EC10	15,185	181,100	35530	196,189
3IP14EC10	15,217	181,865	34420	189,262
4IP14EC10	15,214	181,793	32330	177,840
5IP14EC10	15,273	183,206	35420	193,335
6IP14EC10	15,198	181,411	34490	190,121
<b>f'c promedio=</b>				<b>189,475</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 305: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 15% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP14EC15	14,968	175,961	33100	188,109
2IP14EC15	15,192	181,267	36000	198,602
3IP14EC15	15,199	181,435	37560	207,017
4IP14EC15	15,196	181,363	38940	214,708
5IP14EC15	15,232	182,223	36580	200,743
6IP14EC15	15,158	180,457	36620	202,929
<b>f'c promedio=</b>				<b>202,018</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 306: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 20% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP14EC20	15,140	180,029	39000	216,632
2IP14EC20	15,213	181,769	39730	218,574
3IP14EC20	15,054	177,989	36320	204,057
4IP14EC20	15,206	181,602	39580	217,950
5IP14EC20	15,216	181,841	39490	217,168
6IP14EC20	15,166	180,648	38840	215,004
<b>f'c promedio=</b>				<b>214,898</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 307: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 25% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP14EC25	15,149	180,243	37500	208,053
2IP14EC25	15,188	181,172	38560	212,836
3IP14EC25	15,209	181,673	41840	230,303
4IP14EC25	15,189	181,196	41250	227,654
5IP14EC25	15,075	178,486	39580	221,754
6IP14EC25	15,157	180,421	39780	220,484
<b>f'c promedio=</b>				<b>220,181</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 308: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 30% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP14EC30	15,221	181,960	43290	237,909
2IP14EC30	15,139	180,005	40550	225,272
3IP14EC30	15,100	179,079	42920	239,671
4IP14EC30	15,190	181,220	43500	240,040
5IP14EC30	15,065	178,249	41810	234,559
6IP14EC30	15,137	179,945	42500	236,183
<b>f'c promedio=</b>				<b>235,606</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 309: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 35% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP14EC35	15,180	180,981	44470	245,716
2IP14EC35	15,197	181,387	42830	236,125
3IP14EC35	15,227	182,104	45690	250,901
4IP14EC35	15,193	181,291	42840	236,305
5IP14EC35	15,311	184,118	42160	228,983
6IP14EC35	15,167	180,671	43440	240,437
<b>f'c promedio=</b>				<b>239,745</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 310: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 40% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP14EC40	15,258	182,846	37680	206,075
2IP14EC40	15,230	182,175	47620	261,396
3IP14EC40	15,145	180,148	39850	221,208
4IP14EC40	15,169	180,719	38260	211,710
5IP14EC40	14,972	176,055	42730	242,708
6IP14EC40	15,156	180,397	39280	217,741
<b>f'c promedio=</b>				<b>226,806</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 311: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, 50% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP14EC50	15,208	181,649	32190	177,209
2IP14EC50	15,068	178,320	33530	188,032
3IP14EC50	15,221	181,960	32160	176,742
4IP14EC50	15,000	176,715	34990	198,003
5IP14EC50	15,196	181,363	34550	190,502
6IP14EC50	15,139	179,993	33400	185,563
<b>f'c promedio=</b>				<b>186,009</b>

Fuente: Propia.



**Tabla 312: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 0% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP28EC00	14,943	175,374	36640	208,925
2IP28EC00	15,216	181,841	37610	206,829
3IP28EC00	15,104	179,174	35590	198,634
4IP28EC00	15,214	181,781	36350	199,966
5IP28EC00	15,214	181,793	37280	205,069
6IP28EC00	15,135	179,910	36850	204,825
<b>f'c promedio=</b>				<b>204,041</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 313: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 5% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP28EC05	15,030	177,422	40850	230,242
2IP28EC05	15,059	178,107	34530	193,872
3IP28EC05	15,233	182,247	40460	222,006
4IP28EC05	15,225	182,056	39170	215,154
5IP28EC05	15,275	183,254	38230	208,618
6IP28EC05	15,192	181,267	35730	197,112
<b>f'c promedio=</b>				<b>211,167</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 314: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 10% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP28EC10	15,112	179,363	36580	203,944
2IP28EC10	15,153	180,338	39240	217,591
3IP28EC10	15,200	181,446	42290	233,072
4IP28EC10	15,137	179,957	40870	227,109
5IP28EC10	15,226	182,080	44550	244,673
6IP28EC10	15,173	180,802	41710	230,694
<b>f'c promedio=</b>				<b>226,180</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 315: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 15% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP28EC15	15,067	178,297	39830	223,392
2IP28EC15	15,568	190,351	40230	211,346
3IP28EC15	15,586	190,792	42200	221,184
4IP28EC15	15,146	180,171	44520	247,098
5IP28EC15	15,198	181,411	44490	245,245
6IP28EC15	15,312	184,142	42310	229,768
<b>f'c promedio=</b>				<b>229,672</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 316: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 20% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP28EC20	15,275	183,254	39830	217,349
2IP28EC20	15,194	181,315	43610	240,520
3IP28EC20	15,053	177,966	39760	223,414
4IP28EC20	15,254	182,750	42610	233,160
5IP28EC20	15,259	182,870	50910	278,395
6IP28EC20	15,236	182,319	42450	232,834
<b>f'c promedio=</b>				<b>237,612</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 317: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 25% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP28EC25	15,157	180,433	44810	248,347
2IP28EC25	15,162	180,552	43960	243,475
3IP28EC25	15,082	178,652	44630	249,815
4IP28EC25	15,184	181,077	45270	250,005
5IP28EC25	15,332	184,624	45750	247,801
6IP28EC25	15,260	182,894	41610	227,509
<b>f'c promedio=</b>				<b>244,492</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 318: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 30% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP28EC30	15,286	183,518	42290	230,441
2IP28EC30	15,029	177,399	41010	231,174
3IP28EC30	15,200	181,458	44960	247,770
4IP28EC30	15,171	180,767	47600	263,323
5IP28EC30	15,162	180,552	48890	270,780
6IP28EC30	15,170	180,743	45050	249,249
<b>f'c promedio=</b>				<b>248,790</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 319: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 35% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP28EC35	15,175	180,862	44780	247,592
2IP28EC35	15,207	181,626	49150	270,612
3IP28EC35	15,216	181,841	51200	281,565
4IP28EC35	15,127	179,720	48690	270,922
5IP28EC35	15,044	177,753	46660	262,499
6IP28EC35	15,115	179,435	51480	286,901
<b>f'c promedio=</b>				<b>270,015</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 320: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 40% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP28EC40	15,162	180,540	53560	296,665
2IP28EC40	15,197	181,387	42650	235,133
3IP28EC40	15,223	182,008	39670	217,958
4IP28EC40	15,134	179,886	44410	246,879
5IP28EC40	15,200	181,458	40860	225,176
6IP28EC40	15,189	181,196	40790	225,116
<b>f'c promedio=</b>				<b>241,154</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 321: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, 50% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1IP28EC50	15,137	179,957	45090	250,559
2IP28EC50	15,262	182,942	36910	201,758
3IP28EC50	15,172	180,790	35210	194,756
4IP28EC50	15,173	180,814	39980	221,111
5IP28EC50	15,318	184,287	37910	205,712
6IP28EC50	15,213	181,757	38090	209,566
<b>f'c promedio=</b>				<b>213,910</b>

Fuente: Propia.

De manera similar al caso del concreto fabricado con cemento tipo IP, la resistencia a la compresión del concreto con escoria de cobre en sustitución del agregado fino en proporciones de peso obtenida tras los cálculos correspondientes con los datos encontrados en los ensayos realizados sobre las probetas fabricadas con cemento tipo V se muestran a continuación.

**Tabla 322: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 0% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV07EC00	14,962	175,820	27820	158,230
2VV07EC00	15,136	179,934	31470	174,898
3VV07EC00	15,021	177,210	31740	179,110
4VV07EC00	15,183	181,053	27820	153,657
5VV07EC00	14,938	175,257	25100	143,218
6VV07EC00	15,047	177,812	29890	168,099
<b>f'c promedio=</b>				<b>162,869</b>

Fuente: Propia.



**Tabla 323: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 5% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV07EC05	15,158	180,457	28230	156,436
2VV07EC05	15,162	180,552	34150	189,142
3VV07EC05	15,072	178,415	27440	153,799
4VV07EC05	15,172	180,790	33710	186,459
5VV07EC05	15,212	181,745	34110	187,681
6VV07EC05	15,131	179,815	32200	179,073
<b>f'c promedio=</b>				<b>175,432</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 324: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 10% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV07EC10	14,997	176,644	33710	190,836
2VV07EC10	15,076	178,510	36010	201,726
3VV07EC10	15,268	183,086	25650	140,098
4VV07EC10	15,249	182,630	35500	194,382
5VV07EC10	15,035	177,540	32980	185,761
6VV07EC10	15,123	179,613	30870	171,870
<b>f'c promedio=</b>				<b>180,779</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 325: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 15% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV07EC15	15,243	182,487	35640	195,302
2VV07EC15	15,288	183,566	37830	206,084
3VV07EC15	15,254	182,750	35400	193,707
4VV07EC15	15,207	181,626	33170	182,628
5VV07EC15	15,269	183,110	33730	184,207
6VV07EC15	15,245	182,534	35250	193,114
<b>f'c promedio=</b>				<b>192,507</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 326: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 20% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV07EC20	15,067	178,297	28680	160,855
2VV07EC20	15,190	181,220	41860	230,990
3VV07EC20	15,192	181,267	33040	182,272
4VV07EC20	15,123	179,625	38420	213,891
5VV07EC20	15,212	181,745	36620	201,491
6VV07EC20	15,162	180,552	35910	198,890
<b>f'c promedio=</b>				<b>198,065</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 327: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 25% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV07EC25	15,180	180,981	39510	218,310
2VV07EC25	15,168	180,695	38040	210,520
3VV07EC25	15,016	177,092	36460	205,882
4VV07EC25	15,119	179,530	38500	214,449
5VV07EC25	15,228	182,128	37670	206,833
6VV07EC25	15,129	179,767	38220	212,608
<b>f'c promedio=</b>				<b>211,434</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 328: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 30% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV07EC30	15,199	181,435	40950	225,701
2VV07EC30	15,202	181,506	40660	224,014
3VV07EC30	15,027	177,351	37510	211,501
4VV07EC30	15,058	178,084	34400	193,167
5VV07EC30	15,139	180,005	42010	233,383
6VV07EC30	15,125	179,660	40200	223,756
<b>f'c promedio=</b>				<b>218,587</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 329: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 35% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV07EC35	15,181	181,005	38600	213,254
2VV07EC35	15,065	178,249	45170	253,409
3VV07EC35	14,971	176,032	37190	211,268
4VV07EC35	15,249	182,630	40630	222,471
5VV07EC35	15,070	178,368	41860	234,684
6VV07EC35	15,098	179,019	40410	225,730
<b>f'c promedio=</b>				<b>226,803</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 330: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 40% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV07EC40	15,170	180,743	38710	214,172
2VV07EC40	15,202	181,506	42850	236,080
3VV07EC40	15,187	181,148	40760	225,009
4VV07EC40	15,177	180,910	38950	215,301
5VV07EC40	15,209	181,673	37520	206,525
6VV07EC40	15,177	180,910	37110	205,130
<b>f'c promedio=</b>				<b>217,036</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 331: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, 50% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV07EC50	14,973	176,079	35060	199,115
2VV07EC50	15,176	180,886	37880	209,414
3VV07EC50	15,069	178,344	36980	207,352
4VV07EC50	15,212	181,745	35500	195,329
5VV07EC50	15,218	181,888	39500	217,166
6VV07EC50	15,136	179,934	37130	206,354
<b>f'c promedio=</b>				<b>205,788</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 332: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 0% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV14EC00	15,223	182,008	35880	197,134
2VV14EC00	15,100	179,079	36240	202,369
3VV14EC00	15,182	181,029	35840	197,979
4VV14EC00	15,187	181,148	33310	183,883
5VV14EC00	15,158	180,457	36300	201,156
6VV14EC00	15,173	180,814	35650	197,164
<b>f'c promedio=</b>				<b>196,614</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 333: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 5% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV14EC05	15,193	181,291	36360	200,561
2VV14EC05	15,167	180,671	36040	199,478
3VV14EC05	15,231	182,199	42990	235,950
4VV14EC05	15,085	178,723	37270	208,535
5VV14EC05	15,177	180,910	39240	216,904
6VV14EC05	15,172	180,779	38490	212,912
<b>f'c promedio=</b>				<b>212,390</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 334: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 10% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV14EC10	14,960	175,773	38220	217,439
2VV14EC10	15,051	177,918	45720	256,972
3VV14EC10	15,187	181,148	39170	216,232
4VV14EC10	15,128	179,743	41540	231,107
5VV14EC10	15,269	183,110	42750	233,467
6VV14EC10	15,104	179,174	41530	231,786
<b>f'c promedio=</b>				<b>231,167</b>

Fuente: Propia.



**Tabla 335: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 15% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV14EC15	15,189	181,196	43750	241,451
2VV14EC15	14,987	176,408	43630	247,324
3VV14EC15	15,158	180,457	43050	238,561
4VV14EC15	15,155	180,386	42490	235,551
5VV14EC15	15,258	182,846	43250	236,538
6VV14EC15	15,153	180,326	43330	240,287
<b>f'c promedio=</b>				<b>239,952</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 336: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 20% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV14EC20	15,154	180,362	47900	265,577
2VV14EC20	15,251	182,678	46390	253,944
3VV14EC20	15,240	182,415	45720	250,638
4VV14EC20	15,104	179,174	43440	242,447
5VV14EC20	15,121	179,577	42130	234,607
6VV14EC20	15,176	180,874	45010	248,847
<b>f'c promedio=</b>				<b>249,343</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 337: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 25% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV14EC25	15,089	178,818	48770	272,736
2VV14EC25	15,184	181,077	48970	270,438
3VV14EC25	15,222	181,984	47970	263,595
4VV14EC25	15,041	177,682	47570	267,726
5VV14EC25	15,286	183,518	36600	199,436
6VV14EC25	15,175	180,862	48330	267,220
<b>f'c promedio=</b>				<b>256,858</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 338: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 30% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV14EC30	15,219	181,912	47530	261,280
2VV14EC30	15,204	181,554	50510	278,209
3VV14EC30	15,191	181,244	46570	256,947
4VV14EC30	15,180	180,981	48660	268,868
5VV14EC30	15,150	180,267	49180	272,818
6VV14EC30	15,188	181,172	48530	267,867
<b>f'c promedio=</b>				<b>267,665</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 339: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 35% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV14EC35	14,945	175,421	49140	280,126
2VV14EC35	15,345	184,937	52040	281,393
3VV14EC35	15,052	177,942	51970	292,062
4VV14EC35	15,189	181,196	49340	272,302
5VV14EC35	15,021	177,210	46200	260,708
6VV14EC35	15,121	179,565	49930	278,061
<b>f'c promedio=</b>				<b>277,442</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 340: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 40% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV14EC40	15,245	182,534	48330	264,772
2VV14EC40	15,109	179,292	47110	262,755
3VV14EC40	15,234	182,271	43020	236,022
4VV14EC40	15,157	180,433	42260	234,214
5VV14EC40	15,205	181,578	54320	299,156
6VV14EC40	15,192	181,256	46790	258,144
<b>f'c promedio=</b>				<b>259,177</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 341: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, 50% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV14EC50	15,224	182,032	45090	247,704
2VV14EC50	15,064	178,226	43110	241,884
3VV14EC50	15,207	181,626	41180	226,730
4VV14EC50	15,156	180,409	42020	232,915
5VV14EC50	15,174	180,838	40790	225,561
6VV14EC50	15,164	180,588	42880	237,447
<b>f'c promedio=</b>				<b>235,373</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 342: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 0% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV28EC00	15,160	180,505	40230	222,875
2VV28EC00	15,216	181,841	58160	319,841
3VV28EC00	15,139	180,005	35620	197,884
4VV28EC00	15,275	183,254	40690	222,042
5VV28EC00	15,190	181,220	41740	230,328
6VV28EC00	15,196	181,363	48180	265,655
<b>f'c promedio=</b>				<b>243,104</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 343: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 5% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV28EC05	15,259	182,870	45840	250,670
2VV28EC05	15,065	178,249	50850	285,274
3VV28EC05	15,281	183,398	42360	230,974
4VV28EC05	15,217	181,865	47140	259,204
5VV28EC05	15,197	181,387	41600	229,344
6VV28EC05	15,204	181,554	45530	250,780
<b>f'c promedio=</b>				<b>251,041</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 344: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 10% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV28EC10	15,125	179,672	44690	248,731
2VV28EC10	15,239	182,391	45360	248,697
3VV28EC10	15,194	181,315	47880	264,071
4VV28EC10	15,200	181,458	51480	283,701
5VV28EC10	15,066	178,273	44240	248,159
6VV28EC10	14,925	174,952	44120	252,184
<b>f'c promedio=</b>				<b>257,590</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 345: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 15% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV28EC15	15,129	179,767	49390	274,744
2VV28EC15	15,216	181,841	49280	271,007
3VV28EC15	15,048	177,847	46210	259,830
4VV28EC15	15,288	183,566	46190	251,627
5VV28EC15	15,193	181,291	50850	280,488
6VV28EC15	15,176	180,886	48470	267,959
<b>f'c promedio=</b>				<b>267,609</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 346: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 20% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV28EC20	14,992	176,526	45910	260,075
2VV28EC20	15,183	181,053	52740	291,296
3VV28EC20	15,141	180,041	49150	272,994
4VV28EC20	15,091	178,865	51650	288,765
5VV28EC20	15,107	179,245	45420	253,397
6VV28EC20	15,200	181,458	58890	324,537
<b>f'c promedio=</b>				<b>281,844</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 347: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 25% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV28EC25	15,225	182,056	50690	278,431
2VV28EC25	15,156	180,409	55760	309,075
3VV28EC25	15,122	179,601	57220	318,595
4VV28EC25	15,205	181,578	54390	299,541
5VV28EC25	15,218	181,888	52010	285,945
6VV28EC25	15,190	181,220	54130	298,698
<b>f'c promedio=</b>				<b>298,381</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 348: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 30% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV28EC30	15,191	181,244	59600	328,839
2VV28EC30	15,209	181,673	57420	316,062
3VV28EC30	15,238	182,367	58310	319,740
4VV28EC30	15,069	178,344	56280	315,570
5VV28EC30	15,234	182,271	59800	328,083
6VV28EC30	15,076	178,510	57990	324,856
<b>f'c promedio=</b>				<b>322,192</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 349: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 35% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV28EC35	15,245	182,534	54190	296,876
2VV28EC35	15,194	181,315	61120	337,093
3VV28EC35	15,228	182,128	69220	380,063
4VV28EC35	15,284	183,470	59140	322,342
5VV28EC35	15,238	182,367	60110	329,610
6VV28EC35	15,226	182,068	59240	325,373
<b>f'c promedio=</b>				<b>331,893</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 350: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 40% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	<i>f'</i> c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV28EC40	15,085	178,723	59040	330,344
2VV28EC40	15,183	181,053	58900	325,320
3VV28EC40	15,217	181,865	60150	330,741
4VV28EC40	15,030	177,422	54990	309,939
5VV28EC40	15,202	181,506	58300	321,201
6VV28EC40	15,144	180,112	58130	322,744
<b><i>f'</i>c promedio=</b>				<b>323,381</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 351: Resistencia a la compresión de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, 50% EFC, mediante compresión axial.**

Código de espécimen	Dprom (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Pmáx (kg)	<i>f'</i> c (kg/cm <sup>2</sup> )
1VV28EC50	15,068	178,320	52280	293,180
2VV28EC50	15,161	180,528	47720	264,335
3VV28EC50	15,181	181,005	58230	321,704
4VV28EC50	15,306	183,998	56280	305,873
5VV28EC50	15,167	180,671	57720	319,475
6VV28EC50	15,088	178,794	56920	318,355
<b><i>f'</i>c promedio=</b>				<b>303,820</b>

Fuente: Propia.

Para poder apreciar mejor la variación de la resistencia a la compresión, calculada a partir del ensayo de compresión axial de probetas de concreto, en función del porcentaje de escoria de cobre que sustituyó proporcionalmente diferentes porcentajes de peso del agregado fino se incluye la Tabla 352, la cual reúne los resultados *f'*c promedio de todas las tablas de análisis de este apartado y permite ver las diferencias cuantitativas entre las diferentes mezclas diseñadas y elaboradas en el desarrollo de la tesis.

**Tabla 352: Resistencia a la compresión promedio de las probetas mediante ensayo de compresión axial.**

Tipo de cemento	% EFC	<i>f</i> 'c promedio respecto al tiempo de curado (kg/cm <sup>2</sup> )		
		7 días	14 días	28 días
IP	0%	134,101	179,427	204,041
	5%	137,591	184,682	211,167
	10%	143,582	189,475	226,180
	15%	153,300	202,018	229,672
	20%	156,685	214,898	237,612
	25%	164,856	220,181	244,492
	30%	176,581	235,606	248,790
	35%	193,903	239,745	270,015
	40%	179,382	226,806	241,154
	50%	159,374	186,009	213,910
V	0%	162,869	196,614	243,104
	5%	175,432	212,390	251,041
	10%	180,779	231,167	257,590
	15%	192,507	239,952	267,609
	20%	198,065	249,343	281,844
	25%	211,434	256,858	298,381
	30%	218,587	267,665	322,192
	35%	226,803	277,442	331,893
	40%	217,036	259,177	323,381
	50%	205,788	235,373	303,820

Fuente: Propia.

Se puede observar que el mayor incremento de resistencia del concreto se produce con proporciones de escoria de cobre de 35%, en probetas fabricadas con cemento tipo IP y tipo V. Así se confirman los indicios apreciados en los resultados del ensayo de esclerometría, donde la mayoría de promedios tienen un máximo valor con 35% de peso de arena sustituida por escoria de cobre.

La resistencia a la compresión se mide con una prensa, que aplica carga sobre la superficie superior del cilindro a una velocidad especificada mientras ocurre la falla (ASOCRETO, 2010, págs. 125-126). Por ahora, el ensayo de compresión simple es el más fiable para conocer la resistencia de un concreto endurecido.

La aclaración anterior le otorga a los datos consignados en la Tabla 352 un valor más apreciable que los datos obtenidos mediante el ensayo de índice de rebote con esclerómetro, los cuales se agrupan en la Tabla 291. El esclerómetro permite realizar un sondeo no destructivo del concreto in situ, lo cual es su principal ventaja; pero tiene la limitación de que incorpora cierta dispersión (o error) en las mediciones, la cual es establecida por el fabricante del instrumento. Por su parte, el ensayo de compresión tiene la desventaja de que puede realizarse únicamente en laboratorio y en la mayoría de casos termina con el colapso de los especímenes puestos a prueba; pero tiene la ventaja —calidad apreciable sobre cualquier otro método o ensayo— de proporcionar resultados bastante precisos de la resistencia a la compresión de muestras representativas del concreto. A partir de la relación de los resultados de ambos métodos de estimación de la resistencia del concreto se pudo hallar un valor más aproximado o real de la dispersión del ensayo de índice de rebote.

### 3.6.10.2.1. Análisis del tipo de falla

Asimismo, consecuencia del ensayo de compresión axial de las probetas de concreto es el análisis del tipo de falla que presentaron los especímenes al aplicárseles la carga máxima que pueden tolerar. La Tabla 353 muestra la cantidad de casos de falla por tipo (ver Figura 2), de acuerdo a lo especificado en el apartado 2.2.8.3.

**Tabla 353: Tipos de falla en probetas cilíndricas de cementos tipo IP y tipo V, a diferentes tiempos de curado.**

Tipo de cemento	7 días de curado		14 días de curado		28 días de curado	
	Tipo de falla	Cantidad de casos	Tipo de falla	Cantidad de casos	Tipo de falla	Cantidad de casos
IP	a	20	a	2	a	7
	b	11	b	26	b	33
	c	24	c	29	c	8
	d	1	d	1	d	8
	e	4	e	2	e	4
V	a	8	a	0	a	10
	b	34	b	45	b	18
	c	13	c	14	c	18
	d	3	d	0	d	10
	e	2	e	1	e	4

Fuente: Propia.



Si se acumulan en una sola tabla los datos registrados durante los ensayos de compresión axial de probetas de concreto de acuerdo al caso, se puede apreciar mejor la incidencia, en porcentaje, del tipo de falla más recurrente, lo cual se muestra a continuación:

**Tabla 354: Tipos de falla con más incidencia de acuerdo al tipo de cemento y tiempo de curado.**

Tiempo de curado	Tipo de cemento	Tipo de falla	Cantidad de casos	Incidencia (%)
7, 14 y 28 días	IP	a	29	8,06%
		b	70	19,44%
		c	61	16,94%
		d	10	2,78%
		e	10	2,78%
	V	a	18	5,00%
		b	97	26,94%
		c	45	12,50%
		d	13	3,61%
		e	7	1,94%
<b>Total=</b>			360	100,00%

Fuente: Propia.

En los especímenes fabricados con cemento tipo IP se nota que el tipo de falla **b** (cono y rotura vertical) con 19,44% es el de mayor incidencia entre las 180 probetas puestas a prueba. Le sigue el tipo **c** (cono y corte) con 16,94%, y el tipo **a** (cono) con 8,06% sobre los casos totales. Los tipos **d** y **e** son menos recurrentes.

En probetas de cemento tipo V, también el tipo de falla **b** es el de mayor incidencia con 26,94% sobre los 180 especímenes fabricados. Le siguen los tipos **c**, con 12,50%, y **a**, con 5,00%. También en este caso los tipos **d** y **e** son menos frecuentes.

En el apartado 2.2.8.3. se indica que el tipo de falla más usual durante los ensayos de compresión axial de probetas es el cono, pero también suelen presentarse fallas como los casos mostrados.

Además, si se observan los resultados puestos entre la Tabla 139 y Tabla 198 se puede advertir que la incidencia del tipo de falla no guarda relación con las proporciones de arena sustituida por escoria de cobre, porque en todos los casos y todas las proporciones de EFC se presentan combinaciones de todos los tipos de fallas, sin seguir patrón de ocurrencia alguno.

**3.6.10.3. Análisis del incremento de resistencia a la compresión respecto al concreto patrón**

Es posible analizar de manera cuantitativa el incremento de resistencia a la compresión del concreto sobre los resultados del ensayo de compresión axial mostrados en la Tabla 352.

**Tabla 355: Incremento de la resistencia a la compresión en concretos con cementos tipo IP y tipo V respecto al concreto patrón (0% EFC), mediante compresión axial.**

Tipo de cemento	% EFC	Incremento efectivo de $f'c$ respecto al patrón en función del tiempo de curado ( $kg/cm^2$ )			Incremento porcentual de $f'c$ respecto al patrón en función del tiempo de curado			
		7 días	14 días	28 días	7 días	14 días	28 días	Promedio
IP	0%	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	5%	3,490	5,254	7,126	2,60%	2,93%	3,49%	3,01%
	10%	9,481	10,048	22,139	7,07%	5,60%	10,85%	7,84%
	15%	19,199	22,591	25,631	14,32%	12,59%	12,56%	13,16%
	20%	22,585	35,470	33,571	16,84%	19,77%	16,45%	17,69%
	25%	30,755	40,753	40,451	22,93%	22,71%	19,82%	21,82%
	30%	42,480	56,178	44,748	31,68%	31,31%	21,93%	28,31%
	35%	59,802	60,317	65,974	44,60%	33,62%	32,33%	36,85%
	40%	45,281	47,379	37,113	33,77%	26,41%	18,19%	26,12%
	50%	25,273	6,581	9,869	18,85%	3,67%	4,84%	9,12%
V	0%	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	5%	12,563	15,776	7,937	7,71%	8,02%	3,26%	6,33%
	10%	17,910	34,553	14,486	11,00%	17,57%	5,96%	11,51%
	15%	29,639	43,338	24,505	18,20%	22,04%	10,08%	16,77%
	20%	35,196	52,729	38,740	21,61%	26,82%	15,94%	21,45%
	25%	48,565	60,244	55,277	29,82%	30,64%	22,74%	27,73%
	30%	55,718	71,051	79,087	34,21%	36,14%	32,53%	34,29%
	35%	63,934	80,828	88,789	39,25%	41,11%	36,52%	38,96%
	40%	54,167	62,563	80,277	33,26%	31,82%	33,02%	32,70%
	50%	42,920	38,759	60,716	26,35%	19,71%	24,98%	23,68%

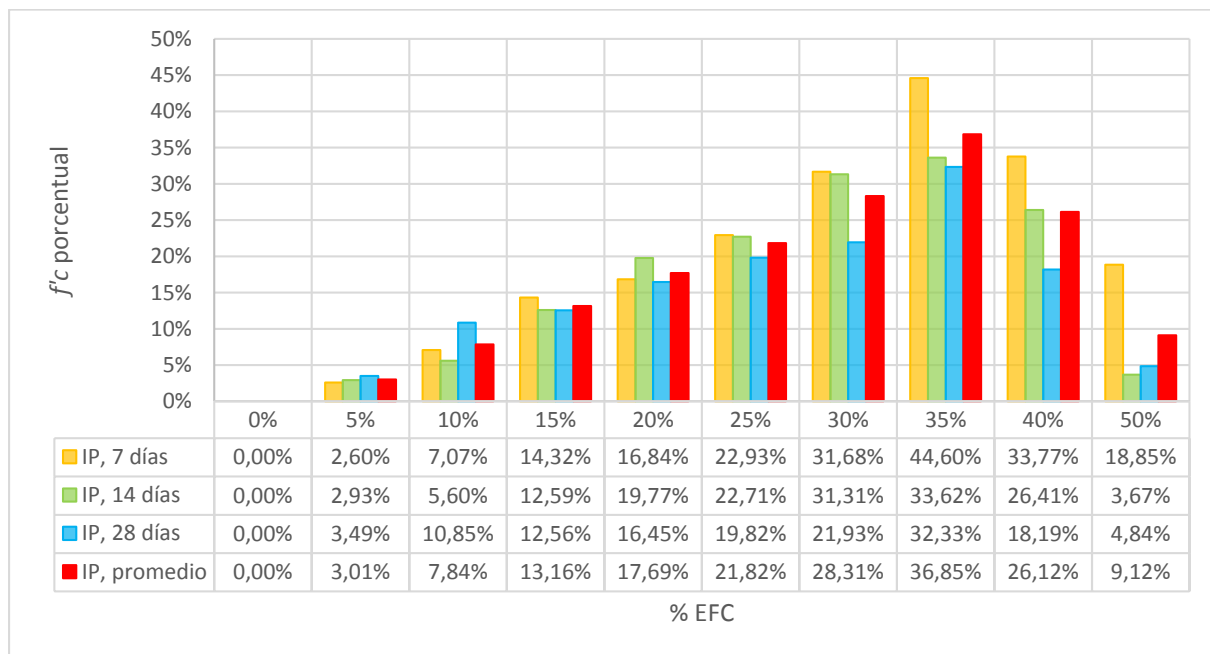
Fuente: Propia.

En la Tabla 355 el incremento efectivo se refiere a la diferencia entre el valor de la  $f'c$  y el concreto patrón expresado en  $kg/cm^2$ , donde el concreto patrón, estándar, convencional o de referencia es aquel fabricado sin sustituir agregado fino, es decir, con 0% de escoria de cobre.

Sería inapropiado analizar la variación de la resistencia en función de los resultados numéricos encontrados porque a diferentes tiempos sumergidas, las probetas desarrollarán su resistencia a la compresión de forma diferente: el incremento de  $f'c$  es más acelerado durante los primeros días de edad del concreto y depende de las condiciones de humedad que permitan que la

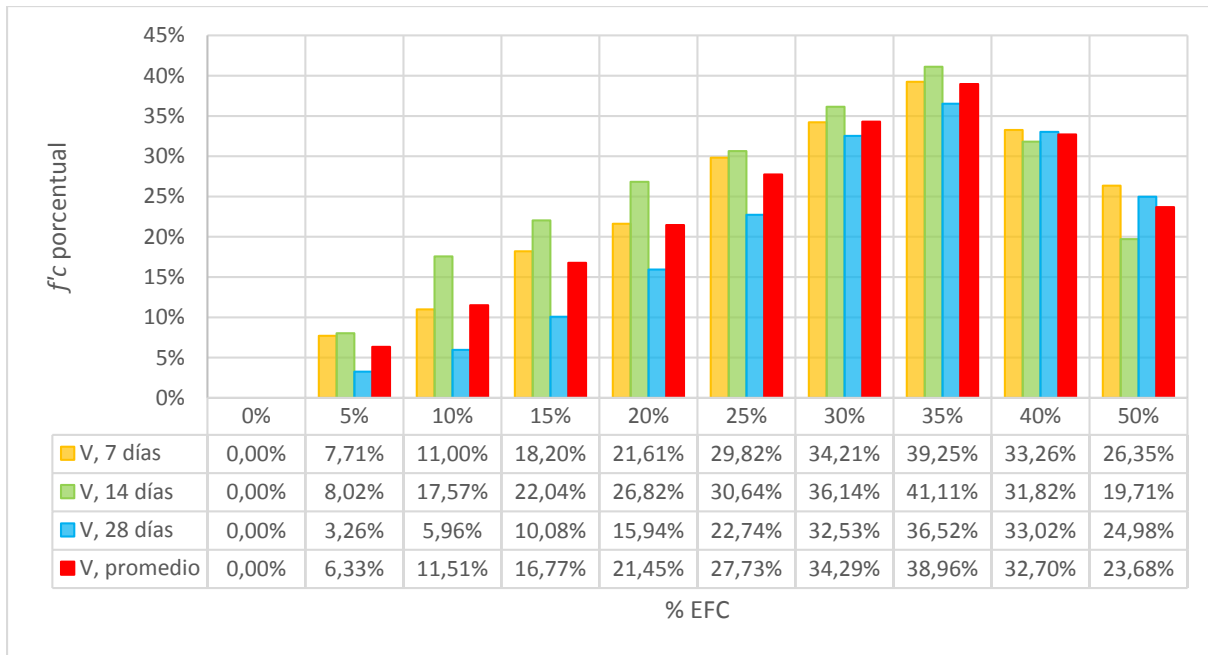
reacción entre el cemento y el agua desarrollen adecuadamente los productos de la hidratación, los cuales llenarán los pequeños vacíos interiores que inicialmente estaban ocupados por agua. Así, un concreto curado durante 7 días desarrollará más rápidamente su resistencia que uno curado durante 14 días, y mucho más rápido será el proceso si se compara con uno sumergido 28 días.

No obstante, sí es posible analizar la variación de la resistencia del concreto a partir de la estimación del incremento de su  $f'c$  en términos porcentuales respecto al concreto patrón. Un concreto curado durante 7 días desarrollará su resistencia a la compresión rápidamente, y esa resistencia tendrá la misma velocidad de desarrollo en todas las proporciones de agregado fino sustituido por escoria de cobre. Esa proporcionalidad de incremento de  $f'c$  tendrá un proceso de desarrollo similar para un concreto sumergido 14 días, aunque más lentamente, y será mucho más lento en las probetas curadas durante 28 días. Entonces, vista la proporcionalidad porcentual de variación de la resistencia a la compresión del concreto respecto a los tiempos de curado, se puede determinar el incremento promedio de dicha resistencia y aprovechar los resultados obtenidos para llegar a conclusiones más sólidas en cuanto se refiere al incremento de la resistencia a la compresión del concreto.



Fuente: Propia.

**Figura 72: Incremento porcentual de  $f'c$  respecto al patrón, con cemento tipo IP y 7, 14 y 28 días de curado.**



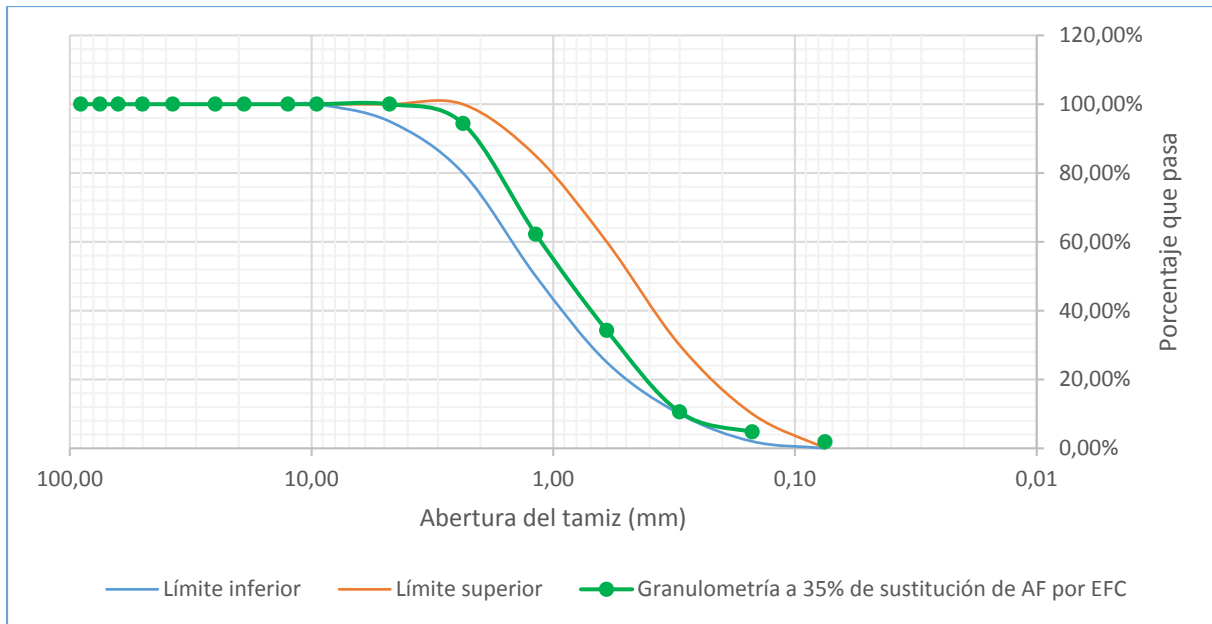
Fuente: Propia.

**Figura 73: Incremento porcentual de  $f'c$  respecto al patrón, con cemento tipo V y 7, 14 y 28 días de curado.**

En la Figura 72 se puede ver el incremento porcentual de la resistencia a la compresión del concreto elaborado con cemento tipo IP. Las diferencias entre los incrementos se deben en gran medida a factores externos que influyeron durante la fabricación de las probetas. Sin embargo, si se halla el promedio de los incrementos se puede hallar un patrón de progresión del desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto (barra roja), el cual tiene una secuencia evolutiva más ordenada y coherente. A partir de allí se puede estimar de manera más precisa cuál es el porcentaje de aporte óptimo de la escoria de cobre a la resistencia de los especímenes.

Lo que se observa en la Figura 73, donde el concreto se elaboró con cemento tipo V, requiere una interpretación similar.

Además, otro fenómeno observado es la curva granulométrica que se obtuvo de la combinación que formó el agregado fino para la fabricación del concreto en el porcentaje óptimo de sustitución de arena por escoria de cobre, que es 35%. Dicha curva, que es el resultado de la combinación por sustitución de agregado fino y EFC de acuerdo a los pesos retenidos por tamiz hallados durante el ensayo granulométrico del agregado fino, se muestra a continuación.



Fuente: Propia.

**Figura 74: Curva granulométrica en el porcentaje óptimo (35%) de sustitución de agregado fino por escoria de cobre.**

En la Figura 74, la curva verde resulta de la combinación del agregado fino y la escoria de cobre cuando el porcentaje de sustitución es 35%. Anteriormente se había visto que el agregado fino de la cantera de Cunyac estaba en el límite superior establecido por las normas (véase Figura 67), y por su parte la escoria de cobre tuvo una granulometría que estaba por debajo del límite inferior (véase Figura 69), donde gran parte del material fue retenido en el tamiz #16. Sin embargo, se puede ver que la combinación de ambos materiales en el porcentaje óptimo de sustitución tiene una curva granulométrica que se inserta de manera adecuada entre los límites superior e inferior establecidos para la granulometría del agregado fino, aunque en el inferior está casi en el límite.

La teoría dice que para obtener un buen concreto, la combinación de la arena y de la piedra debe alcanzar una granulometría que logre una masa unitaria máxima ya que de esa manera el volumen de espacios entre partículas será mínimo y se requerirá menos pasta para unirlos y llenar los espacios entre ellas, lo cual dará lugar a una mezcla de mejores condiciones técnicas y, además, económica. La granulometría tiene relación directa con la trabajabilidad de la mezcla y con las resistencias mecánicas del concreto debido a su influencia sobre la densidad y compacidad, aunque la forma y textura de los granos también influyen en el acomodo de las partículas en la mezcla (ASOCRETO, 2010, págs. 64, 65).



La curva granulométrica de la Figura 74, inserta de manera apropiada dentro de los límites, se obtuvo con un porcentaje de sustitución de arena por EFC de 35% en proporción de peso; y en 35% se obtuvo también la máxima resistencia a la compresión que alcanzó un concreto  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup> con escoria de cobre.

Entonces, se puede afirmar que la granulometría influye también en el incremento de la resistencia a la compresión del concreto porque la combinación de agregado fino y escoria de cobre tienen una compacidad, densidad, forma y textura que aseguran una superficie específica que optimiza la cantidad de pasta requerida para que el concreto mejore sus características mecánicas.

#### **3.6.10.4. Análisis de la relación entre el asentamiento y la resistencia a la compresión del concreto**

Con los resultados de resistencia a la compresión de los ítems 3.6.10.1. y 3.6.10.2., mediante índice de rebote con esclerómetro y compresión axial, y con los resultados de la consistencia hallados en 3.6.8., se pudo realizar un análisis más específico, para discutir la relación entre el asentamiento y la resistencia a la compresión del concreto a diferentes proporciones de EFC. No obstante, es importante precisar que si se aplicara el análisis correlacional de Pearson al par de grupos de datos en mención (*asentamiento-resistencia a la compresión*) dentro del rango experimental, el valor de coeficiente de correlación sería muy bajo porque a partir de una proporción de 35% del peso de agregado fino sustituido por escoria de cobre en la mezcla, el valor de la resistencia empieza a disminuir (ver Tabla 356).

Es preciso aclarar que el análisis de la relación que existe entre el asentamiento y la resistencia del concreto se realizó por pares de datos *asentamiento-resistencia a la compresión* por tiempo de curado, porque sería un error estudiar la correlación por medio de los promedios correspondientes de dichos parámetros, sobre todo de  $f'c$  ya que, como se ve más adelante, en la Tabla 387, los resultados presentan mucha diferencia entre ellos a diferentes tiempos de inmersión, lo que podría ocasionar que el error introducido al utilizar promedios sea considerable.

**Tabla 356: Coeficientes de correlación y de determinación, datos *asentamiento* –  $f'c$ , en probetas fabricadas con cementos tipo IP y tipo V, hasta 50% de EFC.**

Tipo de cemento	Coeficiente	Tiempo de curado		
		7 días	14 días	28 días
IP	$R$	0,7787	0,5225	0,4298
	$R^2$	0,6063	0,2730	0,1847
V	$R$	0,7934	0,6813	0,7830
	$R^2$	0,6294	0,4642	0,6131

Fuente: Propia.

De acuerdo a la Tabla 356, aparentemente la correlación es baja o media, lo cual se debe a que el asentamiento tiene una tendencia de crecimiento lineal, mientras la resistencia a la compresión también sigue un patrón lineal ascendente pero sólo hasta una proporción de escoria de cobre de 35%, luego empieza a decrecer.

En vista de lo precedente, fue necesario verificar la relación entre el asentamiento y la resistencia a la compresión del concreto hasta la proporción óptima de escoria de cobre (35%, donde el concreto adquiere su máxima resistencia), mediante los coeficientes de correlación de Pearson.

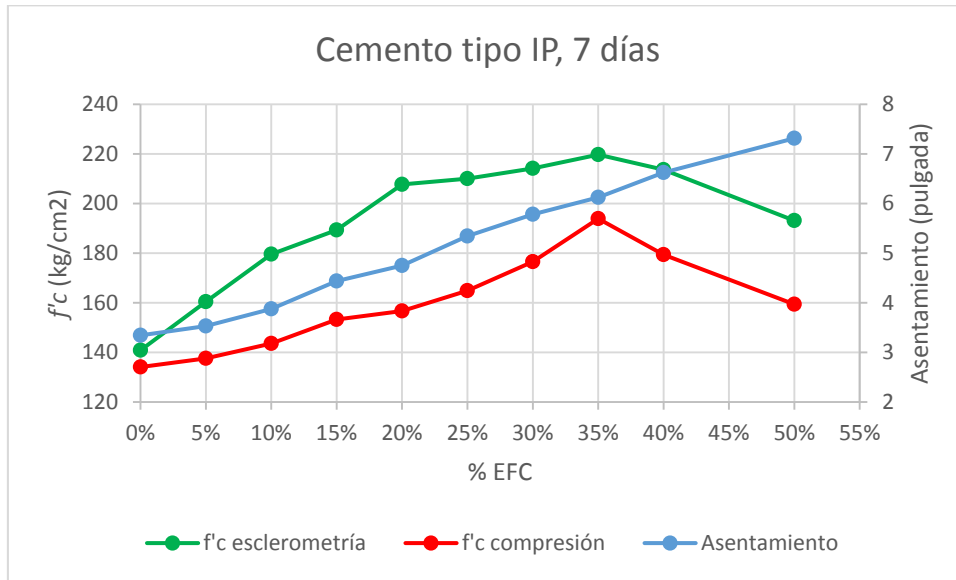
**Tabla 357: Coeficientes de correlación y de determinación, datos *asentamiento* –  $f'c$ , hasta 35% de EFC.**

Tipo de cemento	Coeficiente	Tiempo de curado		
		7 días	14 días	28 días
IP	$R$	0,9788	0,9705	0,9888
	$R^2$	0,9581	0,9419	0,9778
V	$R$	0,9911	0,9830	0,9779
	$R^2$	0,9822	0,9662	0,9563

Fuente: Propia.

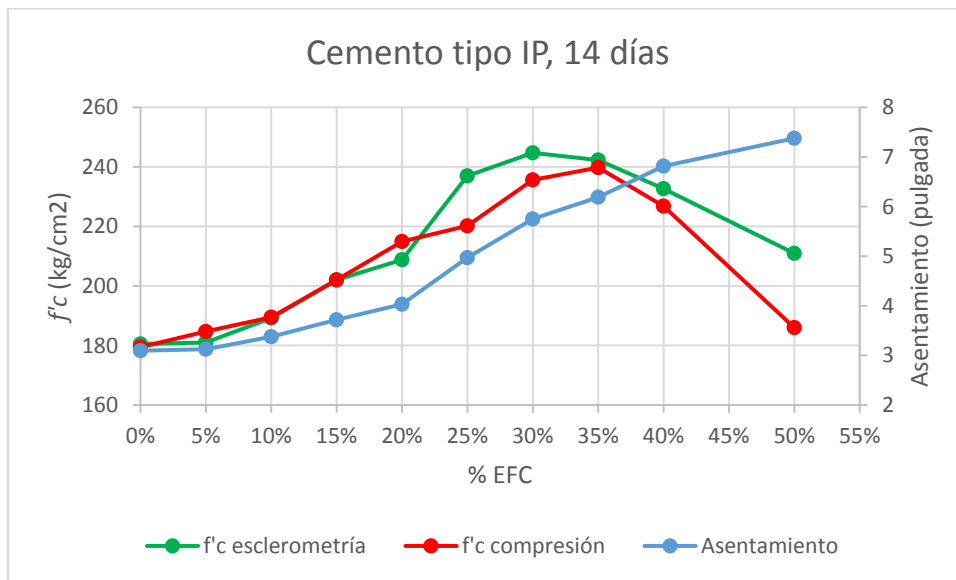
Los coeficientes de correlación de Pearson mostrados en la Tabla 357 tienen valores muy próximos a 1; es decir, el asentamiento y la resistencia a la compresión tienen una correlación positiva muy fuerte. Asimismo, los coeficientes de determinación evidencian una probabilidad de variación de un parámetro respecto al otro en proporciones muy cercanas al 100%.

En consecuencia, es evidente que existe una estrecha relación entre el asentamiento del concreto fresco y la resistencia a la compresión del concreto endurecido, pero creciente sólo hasta 35% de escoria de cobre (porcentaje óptimo), y decreciente a proporciones mayores.



Fuente: Propia.

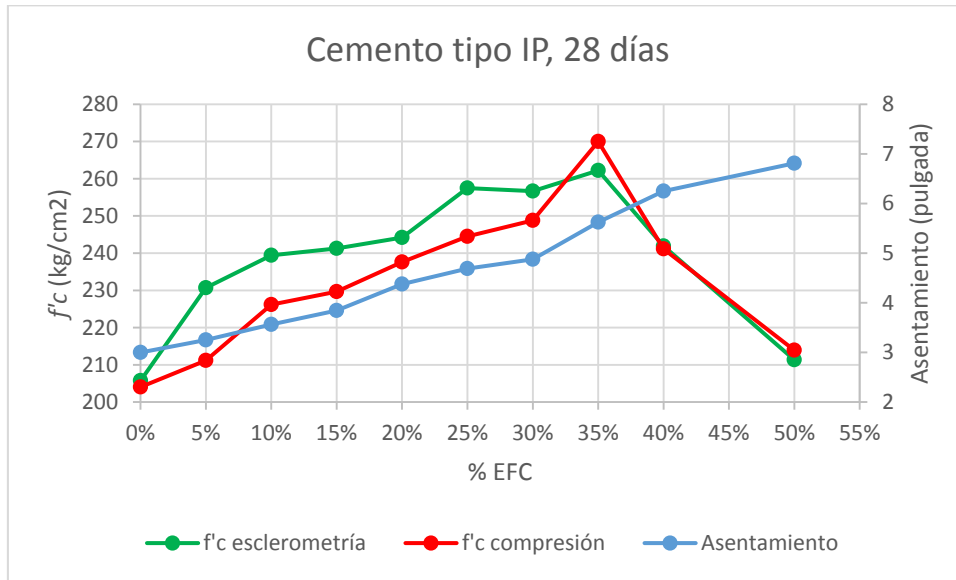
**Figura 75: Desarrollo del asentamiento y resistencia a la compresión del concreto con cemento tipo IP y 7 días de curado.**



Fuente: Propia.

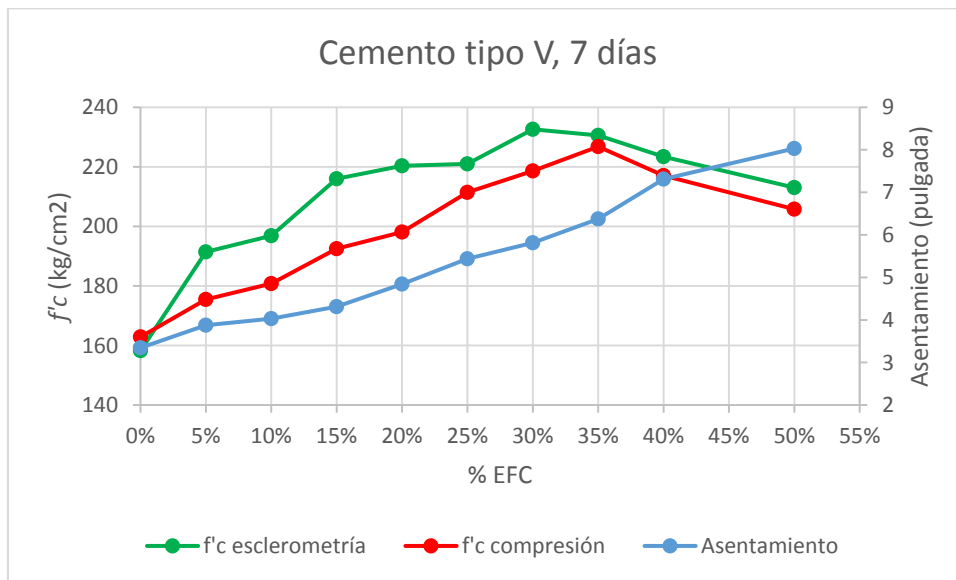
**Figura 76: Desarrollo del asentamiento y resistencia a la compresión del concreto con cemento tipo IP y 14 días de curado.**





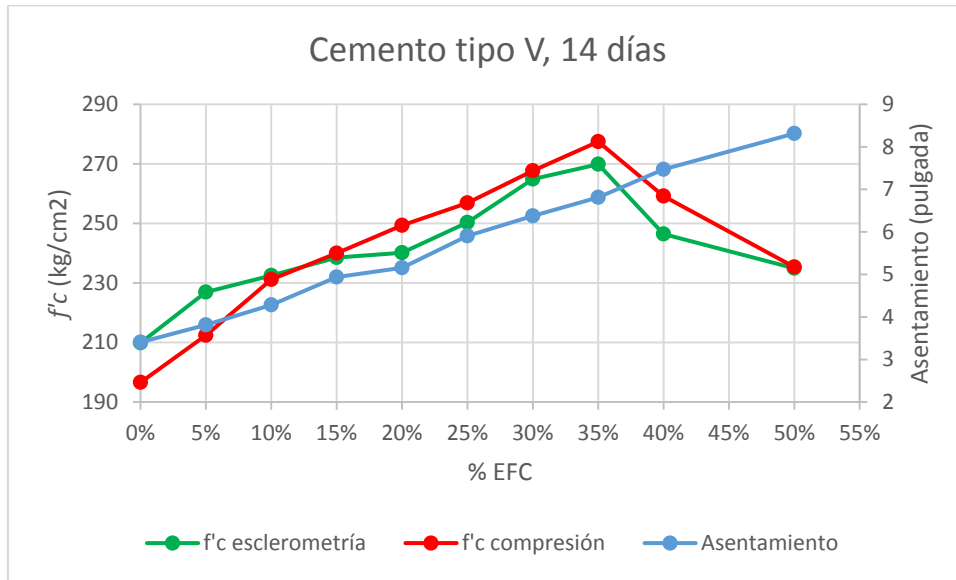
Fuente: Propia.

**Figura 77: Desarrollo del asentamiento y resistencia a la compresión del concreto con cemento tipo IP y 28 días de curado.**



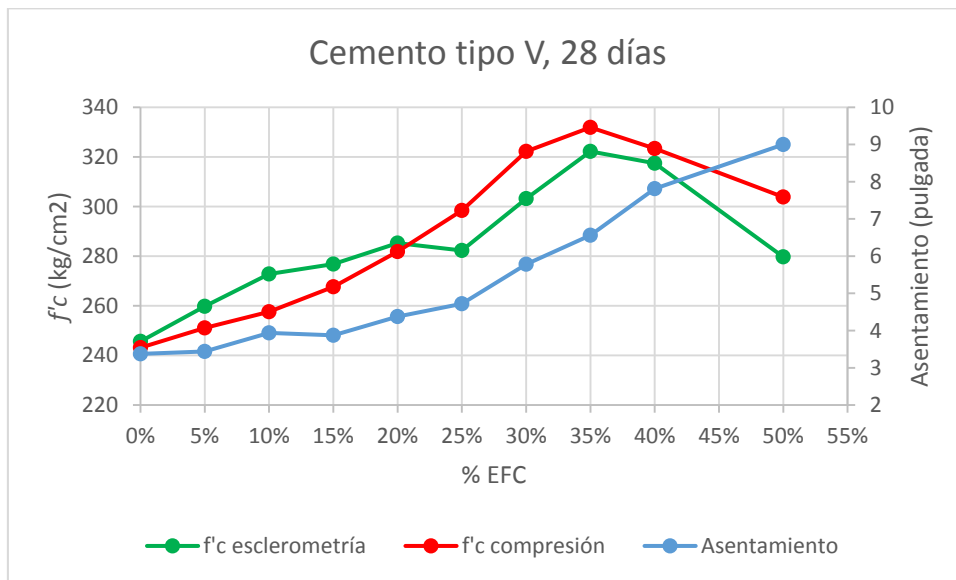
Fuente: Propia.

**Figura 78: Desarrollo del asentamiento y resistencia a la compresión del concreto con cemento tipo V y 7 días de curado.**



Fuente: Propia.

**Figura 79: Desarrollo del asentamiento y resistencia a la compresión del concreto con cemento tipo V y 14 días de curado.**



Fuente: Propia.

**Figura 80: Desarrollo del asentamiento y resistencia a la compresión del concreto con cemento tipo V y 28 días de curado.**

Lo mostrado de la Figura 75 a la Figura 80 permite apreciar con claridad cómo el asentamiento de la mezcla fresca (curva azul) continúa creciendo a medida que se incrementan los porcentajes de escoria en el concreto a través del rango experimental de la investigación (0% a 50%). La resistencia a la compresión del concreto, obtenida mediante esclerometría (curva verde) y compresión axial (curva roja), tiene un comportamiento no lineal porque experimenta crecimiento sólo hasta un porcentaje de 35% del peso de agregado fino sustituido por escoria de cobre, después empieza a decrecer. Sin embargo, con el análisis correlacional de Pearson se pudo determinar la estrecha relación que existe entre asentamiento y resistencia a la compresión entre 0% y 35%, que es el porcentaje óptimo de sustitución.

Las figuras anteriores también permiten comparar de manera gráfica los resultados obtenidos mediante los dos métodos de medición de la resistencia a la compresión del concreto propuestos por la investigación: índice de rebote, cuyas curvas son relativamente irregulares; y compresión axial, con curvas más regulares y valores más precisos por su metodología de ensayo.

### 3.6.10.5. Análisis de la relación entre el porcentaje de escoria de cobre y la resistencia a la compresión del concreto

El análisis propuesto en 3.6.10.4. se emplea también en el análisis de la relación entre el porcentaje de escoria de cobre y la resistencia a la compresión del concreto.

También es necesario aclarar que si se hiciera el análisis de correlacional en todo el rango experimental, se estaría comparando un patrón de tendencia lineal (% EFC) con un patrón de tendencia no lineal ( $f'c$  compresión), lo cual arrojaría coeficientes de correlación de Pearson relativamente bajos, pero no por ello despreciables, como se muestra a continuación.

**Tabla 358: Coeficientes de correlación y de determinación, datos %EFC- $f'c$ , en probetas fabricadas con cementos tipo IP y tipo V, hasta 50% de EFC.**

Tipo de cemento	Coeficiente	Tiempo de curado		
		7 días	14 días	28 días
IP	$R$	0,7657	0,5154	0,4737
	$R^2$	0,5863	0,2656	0,2244
V	$R$	0,8417	0,6849	0,8747
	$R^2$	0,7085	0,4692	0,7651

Fuente: Propia.

Las proporciones de escoria de cobre como sustituta del agregado fino en porcentajes de peso se incrementan desde 0% hasta 50%, que es el rango experimental propuesto por la investigación. Sin embargo, de acuerdo al ensayo de compresión axial (véase la curva roja desde la Figura 75 hasta la Figura 80) el incremento de  $f'c$  alcanza su vértice máximo en 35. Por eso el análisis correlacional de Pearson se aplicó solamente en el segmento comprendido entre 0% y 35% de escoria de cobre que sustituyó al agregado fino en proporciones porcentuales de peso.

**Tabla 359: Coeficientes de correlación y de determinación, datos %EFC- $f'c$ , en probetas fabricadas con cementos tipo IP y tipo V, hasta 35% de EFC.**

Tipo de cemento	Coeficiente	Tiempo de curado		
		7 días	14 días	28 días
IP	$R$	0,9755	0,9911	0,9818
	$R^2$	0,9515	0,9822	0,9639
V	$R$	0,9971	0,9893	0,9828
	$R^2$	0,9942	0,9787	0,9658

Fuente: Propia.

Los  $R$  de Pearson tienen valores muy próximos a 1, por lo tanto se puede asegurar que entre el porcentaje de escoria de cobre y la resistencia a la compresión del concreto existe una relación positiva muy fuerte.

### 3.6.11. Modelos de aproximación y patrones de tendencia

Según Mario Triola (2009, pág. 576), los modelos de aproximación son modelos matemáticos o funciones matemáticas que se “ajustan” o describen datos del mundo real. En lugar de emplear datos muestrales dispuestos al azar, estos modelos consideran datos que varían en el tiempo u otra unidad de medición.

El orden mostrado en la Tabla 291 (resultados del ensayo de índice de rebote) y Tabla 352 (resultados del ensayo de compresión axial) permite realizar de manera más sencilla un análisis respecto de la relación que existe entre un método y otro. Para ello fue necesario recurrir a modelos de aproximación, para encontrar un patrón que describa los patrones de tendencia de las curvas descritas por las secuencias de datos mencionados.

Para arribar a los modelos que llevaron a obtener los patrones de tendencia, se emplearon diferentes modelos que, aunque no son lineales, permiten un tratamiento similar a formas lineales; lo cual es posible en la mayoría de casos gracias a la aplicación de logaritmos, logaritmos naturales y antilogaritmos, para linealizar modelos de variable con potencias



diferentes a la unidad. También fue necesario aplicar un tratamiento matricial en el caso del modelo de aproximación cúbico.

El quid aquí es hallar una curva de tendencia aproximada que permita determinar de manera más confiable los verdaderos rangos de dispersión que introduce el ensayo de esclerometría y de esa forma plantear ecuaciones que permitan realizar estimaciones del error en la medición de la resistencia a la compresión del concreto entre los valores esperados y los valores encontrados con los dos métodos empleados en este trabajo de investigación.

Para realizar el análisis correlacional de los resultados encontrados, se emplearon los siguientes modelos de aproximación (Triola, 2009, pág. 577):

Modelo lineal:

$$R = a + bE$$

Modelo exponencial:

$$R = a e^{bE}$$

Modelo logarítmico:

$$R = a \ln(E) + b$$

Modelo potencial:

$$R = a E^b$$

Modelo cúbico:

$$R = a + bE + cE^2 + dE^3$$

Donde:

R: resistencia a la compresión del concreto ( $\text{kg/cm}^2$ ).

E: resistencia a la compresión del concreto mediante esclerometría ( $\text{kg/cm}^2$ ).

a, b, c y d: coeficientes.



En cuanto a los resultados de esclerometría, es necesario aclarar que se emplearon los datos correspondientes a la resistencia a la compresión del concreto hallados a partir de los valores del índice de rebote leídos directamente en el esclerómetro e introducidos en la curva de calibración del instrumento. Si se hubieran empleado directamente los datos del índice de rebote, se estaría incurriendo en un error debido a que el comportamiento gráfico del esclerómetro describe una forma no lineal, por lo que al utilizar su equivalencia en términos de resistencia a la compresión elimina la necesidad de realizar alguna forma de linealización previa.

Al aplicar los modelos de aproximación se obtienen dos datos muy importantes: el coeficiente de correlación ( $R$ ) y el coeficiente de determinación ( $r^2$ , o  $R^2$  en el caso de esta tesis).

### **3.6.12. Análisis de la confiabilidad de la curva de tendencia**

El grado de confiabilidad de una curva de tendencia es más elevado cuando su coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es 1 o se aproxima a 1.

«El coeficiente de determinación  $R^2$  nos brinda la proporción de la variación en la variable de respuesta ( $y$ ) que puede explicarse por medio de la correlación lineal entre  $x$  y  $y$ , lo cual puede explicarse con la línea de regresión» (Triola, 2009, págs. 582, 808). El coeficiente de determinación se obtiene de elevar al cuadrado el coeficiente de correlación y permite establecer el grado de relación entre dos variables; puede variar entre 0 (variables que no tienen dependencia) y 1 (dependencia perfecta entre variables), y desde el punto de vista estadístico permite predecir el comportamiento de la variable dependiente en función de las variaciones de la variable independiente. Como  $R^2$  permite estudiar el grado de relación de las variables en los diferentes modelos de aproximación, se puede emplear para elegir el modelo que introduzca menos dispersión en la relación existente entre la esclerometría y la compresión axial de probetas.

El análisis se realizó por pares de grupos de resultados, en función del tiempo de curado y del tipo de cemento. Los coeficientes de determinación obtenidos por cada modelo de aproximación se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 360: Nivel de correlación entre los valores de resistencia a la compresión mediante compresión axial y esclerometría.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	$R^2$ en función del modelo de aproximación				
		Lineal	Exponencial	Logarítmico	Potencial	Cúbico
IP	7 días	0,8001	0,8369	0,7633	0,8031	0,9224
V	7 días	0,8526	0,8781	0,8230	0,8519	0,9147
IP	14 días	0,8533	0,8509	0,8459	0,8454	0,8683
V	14 días	0,9362	0,9215	0,9459	0,9355	0,9697
IP	28 días	0,8254	0,8428	0,8075	0,8269	0,8923
V	28 días	0,8653	0,8600	0,8668	0,8645	0,8950

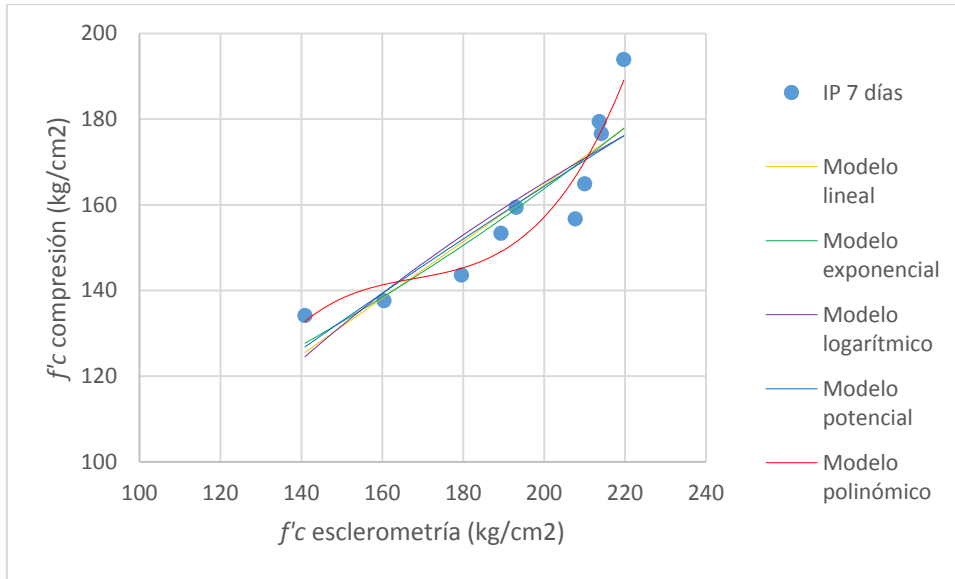
Fuente: Propia.

Se resalta en fondo amarillo los dos datos mayores hallados por tipo de cemento y por tiempo de inmersión. La primera conclusión es que el modelo de aproximación cúbico logra los mayores valores en todos los casos; la segunda es que el modelo exponencial logra en tres de los casos el segundo mayor valor y cuando no lo es, la diferencia con la segunda mayor cantidad no es considerable. Mario Triola (2009, pág. 577) da una recomendación que sirve para escoger los modelos más apropiados: «Al delimitar sus posibles modelos, seleccione funciones que den como resultado valores más grandes de  $R^2$ , ya que corresponden a funciones que se ajustan mejor a los puntos observados. Sin embargo, no dé demasiada importancia a las diferencias pequeñas, como la diferencia entre  $R^2=0.984$  y  $R^2=0.989$ ».

Con sustento en lo anterior y por simple análisis, se puede afirmar que los modelos de aproximación que describen de manera más ajustada la correlación entre variable son la exponencial y la cúbica.

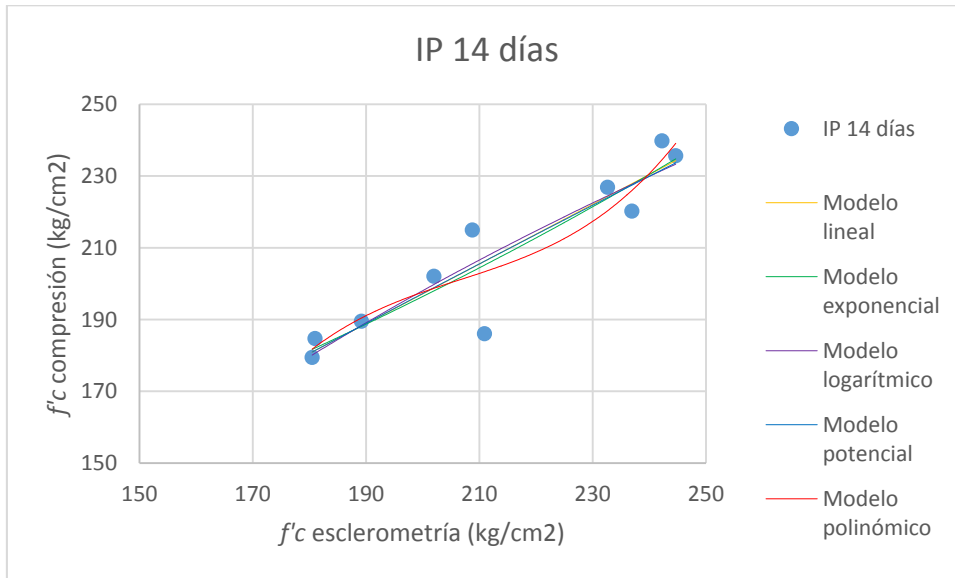
Si se grafican los puntos generados por la asociación del par  $f'c$  compresión- $f'c$  esclerometría, por cada tipo de cemento y por cada tiempo de curado, se puede apreciar mejor qué línea de tendencia se acomoda mejor a la dispersión de puntos. De esa forma se justifica el desarrollo del análisis de los coeficientes de correlación mostrados en la Tabla 360, que corresponden a una determinada línea de tendencia.

Las curvas de tendencia para probetas curadas durante 7, 14 y 28 días y fabricadas con los dos tipos de cemento, de acuerdo a los valores de  $R^2$  mostrados en la Tabla 360, que permiten apreciar el ajuste de los diferentes modelos de aproximación a la dispersión de datos obtenidos hasta este punto son las mostradas en las figuras siguientes. Para efectos prácticos, las normas indican que se considere que el concreto endurecido alcanza el 100% de su resistencia a los 28 días desde su fabricación.



Fuente: Propia.

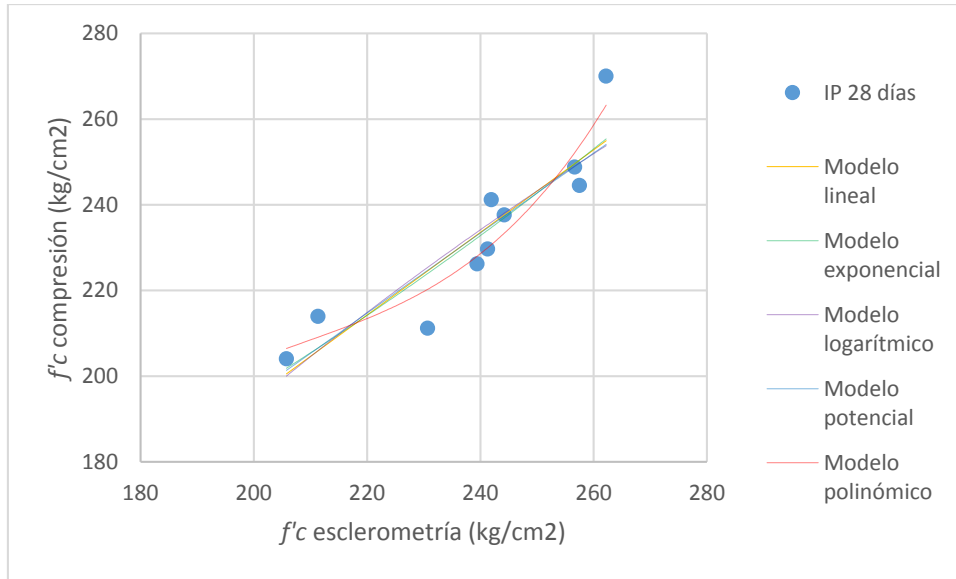
**Figura 81:** Curvas de ajuste de tendencia sobre datos de esclerometría y compresión axial de probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado.



Fuente: Propia.

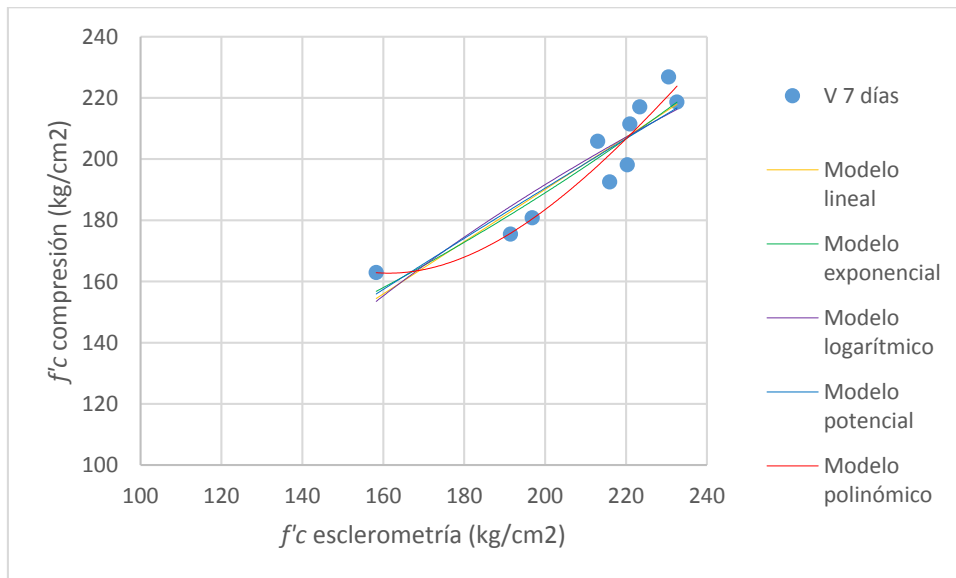
**Figura 82:** Curvas de ajuste de tendencia sobre datos de esclerometría y compresión axial de probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado.





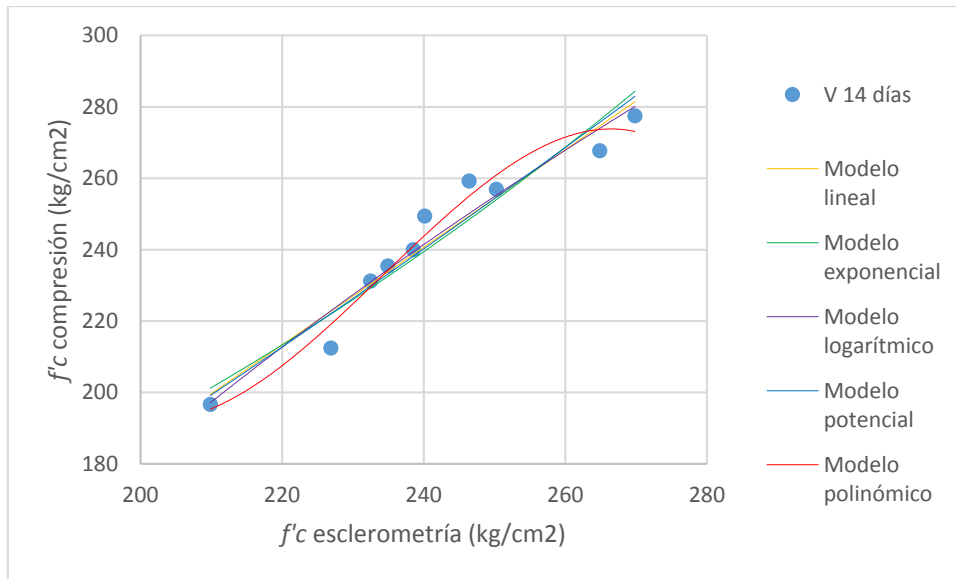
Fuente: Propia.

**Figura 83: Curvas de ajuste de tendencia sobre datos de esclerometría y compresión axial de probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado.**



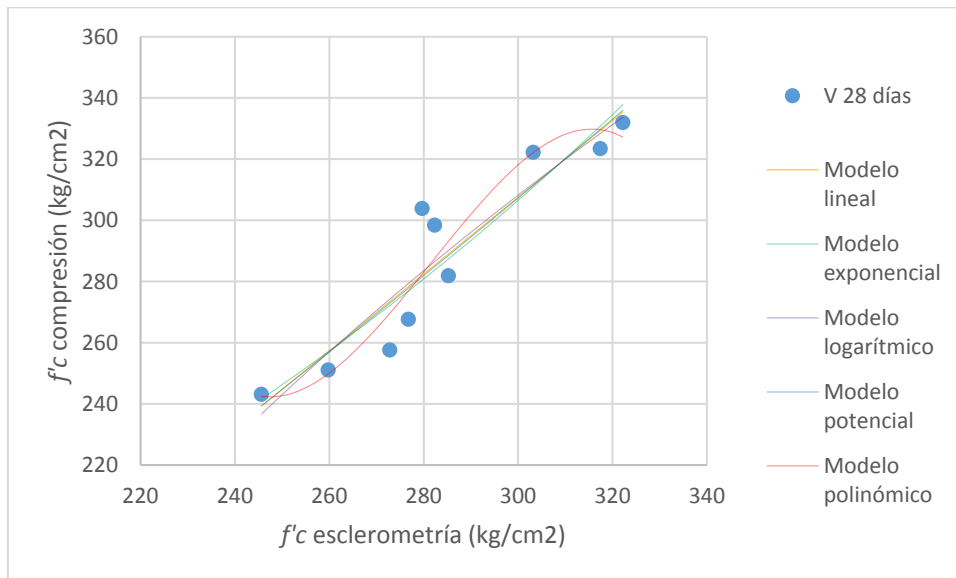
Fuente: Propia.

**Figura 84: Curvas de ajuste de tendencia sobre datos de esclerometría y compresión axial de probetas de cemento tipo V, 7 días de curado.**



Fuente: Propia.

**Figura 85:** Curvas de ajuste de tendencia sobre datos de esclerometría y compresión axial de probetas de cemento tipo V, 14 días de curado.



Fuente: Propia.

**Figura 86:** Curvas de ajuste de tendencia sobre datos de esclerometría y compresión axial de probetas de cemento tipo V, 28 días de curado.



Por otra parte, en su tesis de grado Valencia e Ibarra (2013) afirman que se debe analizar los porcentajes residuales que resulten de los modelos de aproximación elegidos, para establecer el error o desviación entre la obtención experimental de la resistencia a la compresión del concreto y los resultados de una ecuación de tendencia que se ajuste a la dispersión de datos encontrados en laboratorio. De esa forma, se puede establecer una ecuación de tendencia que describa mejor el nivel de confiabilidad de las estimaciones realizadas. Posteriormente, se realiza un análisis de la sobrevaloración y subvaloración de los porcentajes residuales hallados, para marcar los valores de dispersión reales.

Como ya se seleccionaron los modelos aproximación en función de  $R^2$ , o sea de su grado de confiabilidad, se buscará una ecuación de tendencia que dé como resultado un valor de resistencia a la compresión del concreto en función de los resultados del ensayo de índice de rebote con esclerómetro obtenidos experimentalmente.

La forma básica de las ecuaciones de tendencia asumidas son:

Ecuación de tendencia exponencial:

$$f'c_{est} = e^{a+b(f'c_{esc})} \quad (3.30)$$

Ecuación de tendencia cúbica:

$$f'c_{est} = a + b(f'c_{esc} - \overline{f'c_{esc}}) + c(f'c_{esc} - \overline{f'c_{esc}})^2 + d(f'c_{esc} - \overline{f'c_{esc}})^3 \quad (3.31)$$

Donde:

$f'c_{est}$ : resistencia a la compresión del concreto calculada con la ecuación de tendencia correspondiente ( $kg/cm^2$ ).

$f'c_{esc}$ : resistencia a la compresión calculada a partir del índice de rebote con esclerómetro ( $kg/cm^2$ ).

$\overline{f'c_{esc}}$ : promedio de las resistencias a la compresión obtenidas mediante esclerometría con las cuales se determinó la ecuación de tendencia cúbica ( $kg/cm^2$ ).

a, b, c y d: coeficientes de la ecuación de tendencia correspondiente.



Para el cálculo de los porcentajes residuales, Valencia e Ibarra (2013) proponen la ecuación siguiente, la cual relaciona la resistencia a la compresión real del concreto, que en este caso corresponde a la resistencia experimental obtenida mediante compresión axial, y la resistencia a la compresión del concreto estimada mediante una ecuación de tendencia, previo cálculo de los coeficientes del modelo, la cual se expresa en porcentaje respecto a la resistencia experimental.

$$\text{Porcentaje residual} = \frac{\text{Resistencia experimental} - \text{Resistencia estimada}}{\text{Resistencia experimental}} \times 100 \quad (3.32)$$

Luego, se procedió a calcular la ecuación de tendencia para los resultados hallados tras los ensayos aplicados a las probetas fabricadas con cementos tipo IP y V, sumergidas durante 7, 14 y 28 días, respectivamente.

### 3.6.12.1. Análisis con el modelo de aproximación exponencial

Se empleó la ecuación (3.30) como modelo para establecer el patrón de aproximación exponencial, para estimar la resistencia a la compresión a partir de los datos obtenidos con el ensayo de índice de rebote, y se compararon los resultados estimados con los datos reales.

Los patrones de tendencia exponencial se muestran a continuación:

#### Cemento tipo IP, 7 días de curado

$$f'c_{est} = e^{4,257+4,206 \times 10^{-3}(f'c_{esc})}$$

**Tabla 361: Porcentajes residuales mediante aproximación exponencial, con cemento tipo IP y 7 días de curado.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	$f'c_{esc}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp} - f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje residual (%)
IP	7 días	0%	140,895	134,101	127,712	6,389	5%
		5%	160,443	137,591	138,655	-1,064	-1%
		10%	179,583	143,582	150,277	-6,696	-5%
		15%	189,340	153,300	156,572	-3,272	-2%
		20%	207,707	156,685	169,146	-12,460	-8%
		25%	210,039	164,856	170,813	-5,957	-4%
		30%	214,148	176,581	173,790	2,790	2%
		35%	219,711	193,903	177,904	15,999	8%
		40%	213,654	179,382	173,430	5,952	3%
		50%	193,125	159,374	159,085	0,289	0%

Fuente: Propia.

**Cemento tipo V, 7 días de curado**

$$f'c_{est} = e^{4,347+4,473x10^{-3}(f'c_{esc})}$$

**Tabla 362: Porcentajes residuales mediante aproximación exponencial, con cemento tipo V y 7 días de curado.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	$f'c_{esc}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp} - f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje residual (%)
V	7 días	0%	158,256	162,869	156,781	6,088	4%
		5%	191,435	175,432	181,865	-6,434	-4%
		10%	196,853	180,779	186,327	-5,548	-3%
		15%	215,974	192,507	202,965	-10,458	-5%
		20%	220,344	198,065	206,971	-8,906	-4%
		25%	220,960	211,434	207,543	3,891	2%
		30%	232,597	218,587	218,632	-0,045	0%
		35%	230,551	226,803	216,640	10,163	4%
		40%	223,396	217,036	209,816	7,220	3%
		50%	213,030	205,788	200,309	5,479	3%

Fuente: Propia.

**Cemento tipo IP, 14 días de curado**

$$f'c_{est} = e^{4,481+3,995x10^{-3}(f'c_{esc})}$$

**Tabla 363: Porcentajes residuales mediante aproximación exponencial, con cemento tipo IP y 14 días de curado.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	<i>f'c</i> esc (kg/cm2)	<i>f'c</i> exp (kg/cm2)	<i>f'c</i> est (kg/cm2)	<i>f'c</i> exp - <i>f'c</i> est (kg/cm2)	Porcentaje residual (%)
IP	14 días	0%	180,484	179,427	181,689	-2,261	-1%
		5%	180,989	184,682	182,056	2,626	1%
		10%	189,203	189,475	188,128	1,347	1%
		15%	201,992	202,018	197,989	4,028	2%
		20%	208,774	214,898	203,426	11,471	5%
		25%	236,923	220,181	227,637	-7,456	-3%
		30%	244,671	235,606	234,794	0,812	0%
		35%	242,243	239,745	232,527	7,218	3%
		40%	232,644	226,806	223,779	3,027	1%
		50%	210,920	186,009	205,178	-19,169	-10%

Fuente: Propia.

**Cemento tipo V, 14 días de curado**

$$f'c_{est} = e^{4,094+5,768x10^{-3}(f'c_{esc})}$$

**Tabla 364: Porcentajes residuales mediante aproximación exponencial, con cemento tipo V y 14 días de curado.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	<i>f'c</i> esc (kg/cm2)	<i>f'c</i> exp (kg/cm2)	<i>f'c</i> est (kg/cm2)	<i>f'c</i> exp - <i>f'c</i> est (kg/cm2)	Porcentaje residual (%)
V	14 días	0%	209,881	196,614	201,233	-4,619	-2%
		5%	226,892	212,390	221,982	-9,592	-5%
		10%	232,499	231,167	229,278	1,889	1%
		15%	238,531	239,952	237,397	2,555	1%
		20%	240,156	249,343	239,632	9,711	4%
		25%	250,280	256,858	254,045	2,814	1%
		30%	264,864	267,665	276,340	-8,675	-3%
		35%	269,838	277,442	284,385	-6,943	-3%
		40%	246,430	259,177	248,464	10,713	4%
		50%	234,942	235,373	232,533	2,841	1%

Fuente: Propia.

**Cemento tipo IP, 28 días de curado**

$$f'c_{est} = e^{4,450+4,170x10^{-3}(f'c_{esc})}$$

**Tabla 365: Porcentajes residuales mediante aproximación exponencial, con cemento tipo IP y 28 días de curado.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	$f'c_{esc}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp} - f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje residual (%)
IP	28 días	0%	205,764	204,041	201,844	2,198	1%
		5%	230,698	211,167	223,958	-12,790	-6%
		10%	239,426	226,180	232,258	-6,077	-3%
		15%	241,284	229,672	234,064	-4,392	-2%
		20%	244,210	237,612	236,936	0,676	0%
		25%	257,495	244,492	250,432	-5,940	-2%
		30%	256,644	248,790	249,545	-0,755	0%
		35%	262,196	270,015	255,389	14,627	5%
		40%	241,937	241,154	234,702	6,452	3%
		50%	211,343	213,910	206,593	7,317	3%

Fuente: Propia.

**Cemento tipo V, 28 días de curado**

$$f'c_{est} = e^{4,412+4,376x10^{-3}(f'c_{esc})}$$

**Tabla 366: Porcentajes residuales mediante aproximación exponencial, con cemento tipo V y 28 días de curado.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	$f'c_{esc}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp} - f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje residual (%)
V	28 días	0%	245,616	243,104	241,610	1,494	1%
		5%	259,778	251,041	257,058	-6,017	-2%
		10%	272,819	257,590	272,156	-14,565	-6%
		15%	276,770	267,609	276,902	-9,293	-3%
		20%	285,222	281,844	287,336	-5,492	-2%
		25%	282,306	298,381	283,692	14,689	5%
		30%	303,190	322,192	310,843	11,349	4%
		35%	322,191	331,893	337,795	-5,902	-2%
		40%	317,423	323,381	330,819	-7,438	-2%
		50%	279,691	303,820	280,465	23,355	8%

Fuente: Propia.

**3.6.12.2. Análisis con el modelo de aproximación cúbica**

Igual que en el caso anterior, se empleó la ecuación (3.31) como modelo de aproximación para encontrar el patrón de aproximación cúbico y así poder estimar la resistencia a la compresión con los datos obtenidos mediante el ensayo de esclerometría, los cuales fueron comparados con los datos reales.

Se encontraron los siguientes patrones de tendencia cúbica:

**Cemento tipo IP, 7 días de curado**

$$f'c_{est} = 1,512x10^2 + 6,736x10^{-1}(f'c_{esc} - 192,865) + 2,026x10^{-2}(f'c_{esc} - 192,865)^2 + 2,717x10^{-4}(f'c_{esc} - 192,865)^3$$

**Tabla 367: Porcentajes residuales mediante aproximación cúbica, con cemento tipo IP y 7 días de curado.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	<i>f'c</i> esc (kg/cm2)	<i>f'c</i> exp (kg/cm2)	<i>f'c</i> est (kg/cm2)	<i>f'c</i> exp - <i>f'c</i> est (kg/cm2)	Porcentaje residual (%)
IP	7 días	0%	140,895	134,101	132,775	1,325	1%
		5%	160,443	137,591	141,398	-3,807	-3%
		10%	179,583	143,582	145,191	-1,609	-1%
		15%	189,340	153,300	149,066	4,234	3%
		20%	207,707	156,685	166,549	-9,864	-6%
		25%	210,039	164,856	170,121	-5,265	-3%
		30%	214,148	176,581	177,333	-0,753	0%
		35%	219,711	193,903	189,142	4,761	2%
		40%	213,654	179,382	176,402	2,980	2%
		50%	193,125	159,374	151,377	7,997	5%

Fuente: Propia.

**Cemento tipo V, 7 días de curado**

$$f'c_{est} = 1,947x10^2 + 1,167(f'c_{esc} - 210,340) + 7,689x10^{-3}(f'c_{esc} - 210,340)^2 - 5,752x10^{-5}(f'c_{esc} - 210,340)^3$$



**Tabla 368: Porcentajes residuales mediante aproximación cúbica, con cemento tipo V y 7 días de curado.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	$f'c_{esc}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp} - f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje residual (%)
IP	7 días	0%	158,256	162,869	162,876	-0,007	0%
		5%	191,435	175,432	175,754	-0,322	0%
		10%	196,853	180,779	180,481	0,298	0%
		15%	215,974	192,507	201,492	-8,985	-5%
		20%	220,344	198,065	207,070	-9,005	-5%
		25%	220,960	211,434	207,876	3,558	2%
		30%	232,597	218,587	223,834	-5,247	-2%
		35%	230,551	226,803	220,937	5,866	3%
		40%	223,396	217,036	211,103	5,933	3%
		50%	213,030	205,788	197,876	7,913	4%

Fuente: Propia.

**Cemento tipo IP, 14 días de curado**

$$f'c_{est} = 2,044 \times 10^2 + 5,501 \times 10^{-1}(f'c_{esc} - 212,884) + 6,343 \times 10^{-3}(f'c_{esc} - 212,884)^2 + 3.373 \times 10^{-4}(f'c_{esc} - 212,884)^3$$

**Tabla 369: Porcentajes residuales mediante aproximación cúbica, con cemento tipo IP y 14 días de curado.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	$f'c_{esc}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp} - f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje residual (%)
IP	14 días	0%	180,484	179,427	181,762	-2,335	-1%
		5%	180,989	184,682	182,362	2,319	1%
		10%	189,203	189,475	190,450	-0,974	-1%
		15%	201,992	202,018	198,723	3,295	2%
		20%	208,774	214,898	202,220	12,677	6%
		25%	236,923	220,181	225,970	-5,789	-3%
		30%	244,671	235,606	239,124	-3,519	-1%
		35%	242,243	239,745	234,549	5,196	2%
		40%	232,644	226,806	220,345	6,461	3%
		50%	210,920	186,009	203,339	-17,330	-9%

Fuente: Propia.

**Cemento tipo V, 14 días de curado**

$$f'c_{est} = 2,464x10^2 + 1,813(f'c_{esc} - 241,431) - 1,320x10^{-2}(f'c_{esc} - 241,431)^2 - 6,155x10^{-4}(f'c_{esc} - 241,431)^3$$

**Tabla 370: Porcentajes residuales mediante aproximación cúbica, con cemento tipo V y 14 días de curado.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	f'c esc (kg/cm2)	f'c exp (kg/cm2)	f'c est (kg/cm2)	f'c exp - f'c est (kg/cm2)	Porcentaje residual (%)
V	14 días	0%	209,881	196,614	195,363	1,252	1%
		5%	226,892	212,390	219,107	-6,717	-3%
		10%	232,499	231,167	229,553	1,614	1%
		15%	238,531	239,952	241,007	-1,055	0%
		20%	240,156	249,343	244,027	5,316	2%
		25%	250,280	256,858	260,940	-4,082	-2%
		30%	264,864	267,665	273,669	-6,005	-2%
		35%	269,838	277,442	273,093	4,349	2%
		40%	246,430	259,177	255,013	4,164	2%
		50%	234,942	235,373	234,209	1,164	0%

Fuente: Propia.

**Cemento tipo IP, 28 días de curado**

$$f'c_{est} = 2,277x10^2 + 1,017(f'c_{esc} - 239,100) + 1,811x10^{-2}(f'c_{esc} - 239,100)^2 + 2,007x10^{-4}(f'c_{esc} - 239,100)^3$$

**Tabla 371: Porcentajes residuales mediante aproximación cúbica, con cemento tipo IP y 28 días de curado.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	f'c esc (kg/cm2)	f'c exp (kg/cm2)	f'c est (kg/cm2)	f'c exp - f'c est (kg/cm2)	Porcentaje residual (%)
IP	28 días	0%	205,764	204,041	206,456	-2,415	-1%
		5%	230,698	211,167	220,279	-9,111	-4%
		10%	239,426	226,180	227,996	-1,815	-1%
		15%	241,284	229,672	229,971	-0,299	0%
		20%	244,210	237,612	233,357	4,255	2%
		25%	257,495	244,492	253,743	-9,251	-4%
		30%	256,644	248,790	252,159	-3,369	-1%
		35%	262,196	270,015	263,278	6,737	2%
		40%	241,937	241,154	230,697	10,457	4%
		50%	211,343	213,910	209,099	4,811	2%

Fuente: Propia.

**Cemento tipo V, 28 días de curado**

$$f'c_{est} = 2,917 \times 10^2 + 1,912(f'c_{esc} - 284,501) - 4,915 \times 10^{-3}(f'c_{esc} - 284,501)^2 - 5,534 \times 10^{-4}(f'c_{esc} - 284,501)^3$$

**Tabla 372: Porcentajes residuales mediante aproximación cúbica, con cemento tipo V y 28 días de curado.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	$f'c_{esc}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{exp} - f'c_{est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje residual (%)
V	28 días	0%	245,616	243,104	242,509	0,595	0%
		5%	259,778	251,041	249,831	1,210	0%
		10%	272,819	257,590	269,613	-12,023	-5%
		15%	276,770	267,609	276,916	-9,307	-3%
		20%	285,222	281,844	293,107	-11,263	-4%
		25%	282,306	298,381	287,518	10,863	4%
		30%	303,190	322,192	322,127	0,065	0%
		35%	322,191	331,893	327,162	4,731	1%
		40%	317,423	323,381	329,586	-6,205	-2%
		50%	279,691	303,820	282,486	21,335	7%

Fuente: Propia.

**3.6.13. Análisis de la sobrevaloración y subvaloración de la resistencia del concreto**

De acuerdo a los resultados encontrados para los porcentajes residuales por cada tipo de cemento y tiempo de curado, se aprecia que hay resultados positivos y negativos. Es decir, cuando la resistencia experimental es mayor que la resistencia estimada mediante el modelo de aproximación, el resultado de su diferencia será positivo ( $f'c_{experimental} - f'c_{estimada} \geq 0$ ); lo contrario ocurrirá cuando el resultado sea negativo ( $f'c_{experimental} - f'c_{estimada} < 0$ ). En el caso en que el resultado es positivo, se trata de una subvaloración del concreto, ya que la resistencia a la compresión experimental es mayor al cálculo estimado con la ecuación de aproximación, lo cual quiere decir que el concreto no llega a requerir sus valores extremos de resistencia y trabaja de manera óptima. Pero, cuando el resultado es negativo se trata de una sobrevaloración del concreto, «es decir, que la resistencia estimada mediante la aproximación es mayor a la real (o experimental), por lo que se puede decir que se está sobreestimando la resistencia del concreto» (Valencia & Ibarra, 2013). Ello implica que se podría aceptar un concreto que no satisfaga los requisitos mínimos de resistencia y calidad establecidas por las normas, lo cual se traduce en un potencial riesgo, sobre todo si el material cumple funciones estructurales.

Los porcentajes residuales máximos según el modelo exponencial y cúbico, expresados en valor absoluto, por cada tipo de cemento y tiempo de curado, se muestran a continuación.

**Tabla 373: Porcentajes residuales máximos respecto a la resistencia experimental, mediante aproximación exponencial.**

Tipo de cemento y tiempo de curado	Ecuación de tendencia exponencial			
	Sobrevaloración		Subvaloración	
	$f'c \text{ exp} - f'c \text{ est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje residual respecto a la resistencia experimental (%)	$f'c \text{ exp} - f'c \text{ est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje residual respecto a la resistencia experimental (%)
IP 7 días	-12,460	-8%	15,999	8%
V 7 días	-10,458	-5%	10,163	4%
IP 14 días	-19,169	-10%	11,471	5%
V 14 días	-9,592	-5%	10,713	4%
IP 28 días	-12,790	-6%	14,627	5%
V 28 días	-14,565	-6%	23,355	8%

Fuente: Propia.

**Tabla 374: Porcentajes residuales máximos respecto a la resistencia experimental, mediante aproximación cúbica.**

Tipo de cemento y tiempo de curado	Ecuación de tendencia cúbica			
	Sobrevaloración		Subvaloración	
	$f'c \text{ exp} - f'c \text{ est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje residual respecto a la resistencia experimental (%)	$f'c \text{ exp} - f'c \text{ est}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje residual respecto a la resistencia experimental (%)
IP 7 días	-9,864	-6%	7,997	5%
V 7 días	-9,005	-5%	7,913	4%
IP 14 días	-17,330	-9%	12,677	6%
V 14 días	-6,717	-3%	5,316	2%
IP 28 días	-9,251	-4%	10,457	4%
V 28 días	-12,023	-5%	21,335	7%

Fuente: Propia.

Es fácil advertir que los valores máximos en cada patrón de ajuste se presentan como estimaciones sobrevaloradas (resultados negativos), por lo que se asumen esas cantidades como valores extremos de dispersión en la correlación entre métodos de medición de la resistencia a la compresión. Por lo tanto, son los porcentajes residuales correspondientes a las sobrevaloraciones los que son asumidos como los rangos de dispersión correspondientes al empleo del esclerómetro empleado en este estudio.

### 3.6.14. Análisis de porcentajes residuales máximos

A continuación se muestran los valores absolutos de los porcentajes residuales hallados mediante las ecuaciones de tendencia exponencial y cúbica.

**Tabla 375: Porcentajes residuales máximos finales para establecer la dispersión real entre métodos de medición de la resistencia a la compresión del concreto.**

Tipo de cemento	Porcentajes residuales máximos con la ecuación de tendencia exponencial			Porcentajes residuales máximos con la ecuación de tendencia cúbica		
	7 días	14 días	28 días	7 días	14 días	28 días
IP	8%	10%	6%	6%	9%	4%
V	5%	5%	8%	5%	3%	7%

Fuente: Propia.

En consecuencia, la dispersión máxima para el patrón de aproximación exponencial es  $\pm 10\%$  y para el modelo cúbico es  $\pm 9\%$  cuando las probetas se fabrican con cemento tipo IP. Asimismo, la dispersión ajustada al patrón de aproximación exponencial es  $\pm 8\%$  y  $\pm 7\%$  en el caso del modelo de aproximación cúbico en probetas fabricadas con cemento tipo V.

Aunque el modelo de aproximación cúbico ofrece un coeficiente de determinación más próximo a 1, se debe considerar como resultado los valores más elevados, que en el caso sujeto a estudio corresponden a los calculados mediante el modelo exponencial debido a que cuando se trata de elementos estructurales, se debe asumir los valores más desventajosos para el análisis y diseño, lo cual es comentado nuevamente en los apartados Resultados y Discusión.

Los resultados encontrados representan también de modo implícito el **nivel de correlación entre el ensayo de compresión axial de probetas y el ensayo de índice de rebote**. Si se sigue de manera ordenada la secuencia de análisis realizado, es fácil entender nivel correlativo.

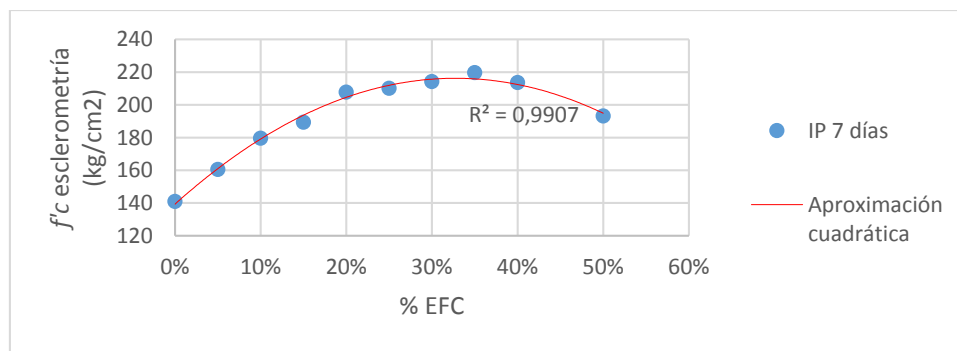
### 3.6.15. Análisis predictivo para estimar la resistencia del concreto

#### 3.6.15.1. Análisis predictivo de la resistencia a la compresión mediante índice de rebote

Se puede emplear el concepto de los modelos de aproximación para hallar una ecuación que permita calcular la resistencia a la compresión del concreto mediante el índice de rebote o esclerometría a través del rango de agregado fino que fue sustituido por escoria de cobre en proporciones de peso. Una vez hallada la expresión que permitió calcular la resistencia del

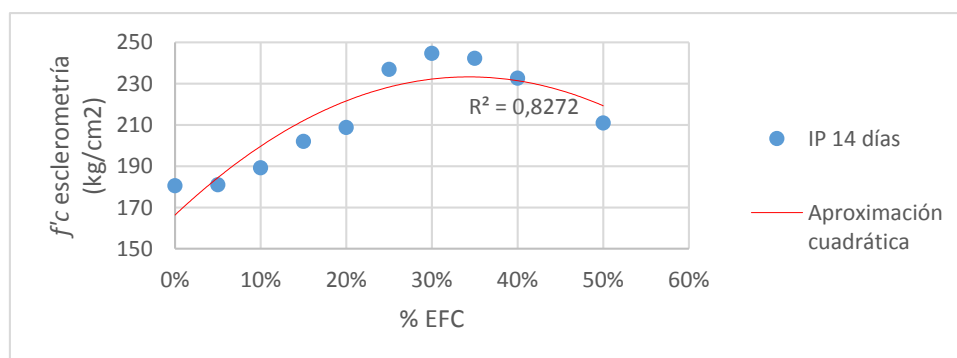
concreto a compresión en función de los valores obtenidos con el esclerómetro, se calculó la dispersión en porcentaje respecto al valor experimental obtenido y al valor estimado.

La dispersión de puntos con  $f'c$  esclerometría (resistencia a la compresión del concreto mediante esclerometría) en el eje de las ordenadas y % EFC (porcentaje de escoria de fundición de cobre) en el eje de las abscisas muestra una disposición curva o parabólica, por lo que se hace evidente que el modelo de aproximación o patrón de tendencia más conveniente es un modelo cuadrático de la forma  $y=a+bx+cx^2$ , lo cual se muestra a continuación para las probetas fabricadas con los cementos tipo IP y tipo V, a 7, 14 y 28 días de curado.



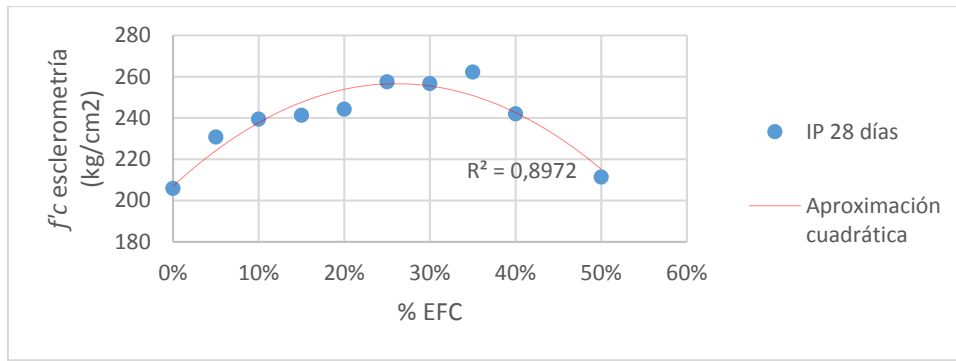
Fuente: Propia.

**Figura 87: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, mediante índice de rebote.**



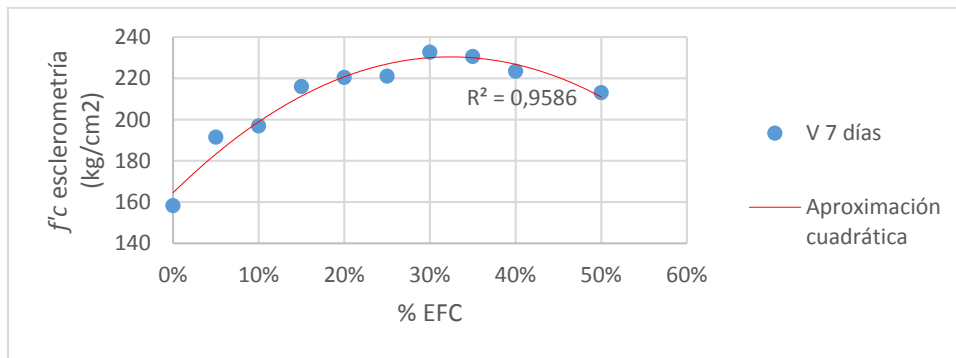
Fuente: Propia.

**Figura 88: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, mediante índice de rebote.**



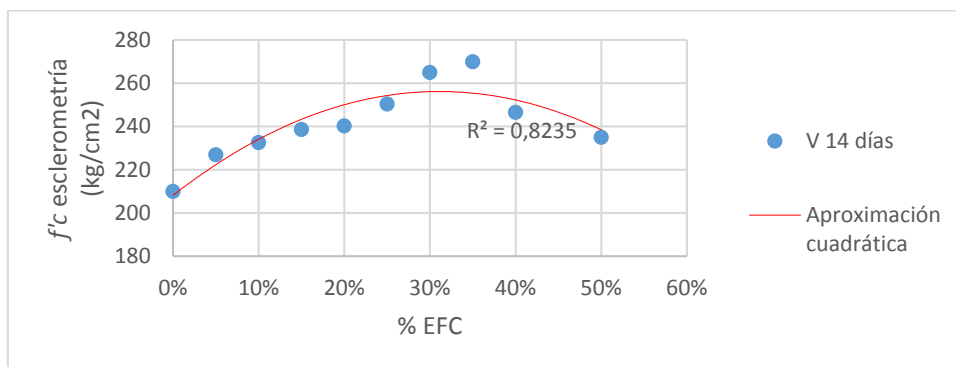
Fuente: Propia.

**Figura 89: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, mediante índice de rebote.**



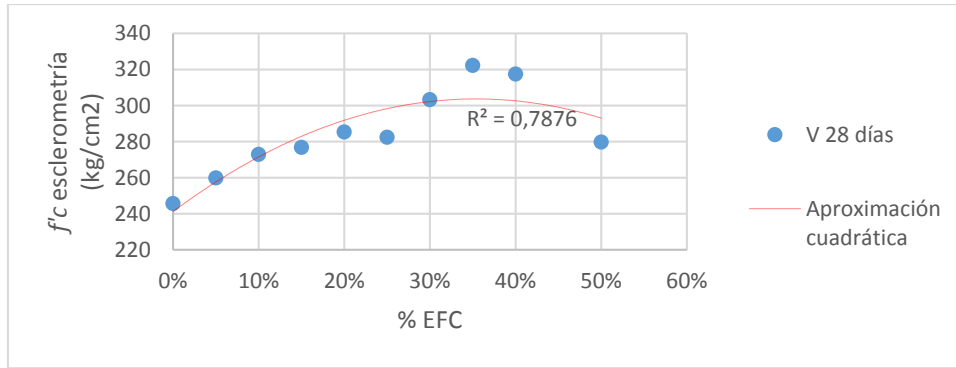
Fuente: Propia.

**Figura 90: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, mediante índice de rebote.**



Fuente: Propia.

**Figura 91: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, mediante índice de rebote.**



Fuente: Propia.

**Figura 92: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, mediante índice de rebote.**

Igual que en el análisis hecho en el apartado 3.6.13., entiéndase que cuando el resultado del cálculo del porcentaje residual (véase la ecuación (3.32)) es positivo, existe una subvaloración del material; es decir, se trata de un concreto que trabajará por debajo de sus sollicitaciones máximas de resistencia. Cuando el resultado es negativo, hay una sobrevaloración del concreto, lo cual quiere decir que la estimación matemática está otorgando al concreto una resistencia que excede sus características reales. Entonces, el razonamiento previo sustenta que la dispersión o margen de error que se considerará en la estimación matemática de la resistencia a la compresión del concreto dentro de los márgenes establecidos —entre 0% y 50% de escoria de cobre en esta tesis— será el valor del porcentaje residual máximo correspondiente a cada tipo de cemento. La tabla siguiente muestra los valores encontrados.

**Tabla 376: Porcentajes residuales máximos y mínimos por tipo de cemento y tiempo de curado en ensayo de índice de rebote.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	Porcentaje residual (%)	
		Máximo [subvaloración]	Mínimo [sobrevaloración]
IP	7 días	2%	-2%
	14 días	8%	-6%
	28 días	4%	-4%
V	7 días	4%	-4%
	14 días	5%	-4%
	28 días	6%	-6%

Fuente: Propia.





La dispersión se establece únicamente entre los valores que subvaloran la resistencia del concreto, o sea, entre los valores donde la resistencia experimental hallada con el esclerómetro es mayor a la resistencia calculada con el modelo matemático. Bajo esa premisa, se considera como dispersión  $\pm 8\%$  para las probetas fabricadas con cemento tipo IP; y  $\pm 6\%$  para los especímenes de cemento tipo V.

Además, dado que convencionalmente se considera que el concreto alcanza el 100% de su resistencia a la compresión a los 28 días, se halló la ecuación de cálculo de  $f'c$  de acuerdo a los resultados obtenidos con las probetas que estuvieron sumergidas durante 28 días antes de ser puestas a prueba con el esclerómetro.

La ecuación encontrada tras el análisis de los datos obtenidos en el ensayo de índice de rebote aplicado a las probetas fabricadas con cemento tipo IP, a 28 días de curado, es la que sigue.

$$f'c_{esc} = 255,900 + 45,387(\%EFC - 23\%) - 727,264(\%EFC - 23\%)^2$$

Donde:

$f'c_{esc}$ : resistencia a la compresión del concreto estimada mediante esclerometría ( $\text{kg/cm}^2$ ), en función de las proporciones de agregado fino sustituido por escoria de cobre (%).

$\%EFC$ : proporción de agregado fino sustituido por escoria de cobre (%).

23%: promedio de las proporciones de agregado fino sustituido por escoria de cobre definidas durante los ensayos experimentales.

Los coeficientes de la ecuación fueron encontrados empleando métodos matriciales de mínimos cuadrados.

**Tabla 377: Comparación de resultados experimentales y estimados en probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, mediante esclerometría.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	$f'c_{esc}$ [experimental] (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c_{esc}$ [estimada] (kg/cm <sup>2</sup> )	Dispersión (%)
IP	28 días	0%	205,764	206,988	±8%
		5%	230,698	224,167	
		10%	239,426	237,709	
		15%	241,284	247,614	
		20%	244,210	253,883	
		25%	257,495	256,516	
		30%	256,644	255,513	
		35%	262,196	250,874	
		40%	241,937	242,598	
		50%	211,343	215,137	

Fuente: Propia.

En la Tabla 377 se observan los resultados de las estimaciones realizadas con la ecuación encontrada. Al compararlos con los resultados experimentales, se puede notar que la diferencia entre ambos es compensada con el porcentaje de dispersión.

Por ejemplo, si el porcentaje de peso de agregado fino sustituido por escoria de cobre fuese 3%, el resultado sería 217,732 kg/cm<sup>2</sup>, con una dispersión de ±8% de ese valor que es 17,419 kg/cm<sup>2</sup>, que escrito de manera más ordenada es:  $f'c_{3\%} = 217,732 \text{ kg/cm}^2 \pm 17,419 \text{ kg/cm}^2$ .

En el caso donde se empleó cemento tipo V y se tuvo un tiempo de curado de 28 días, se aplicó el análisis precedente y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$f'c_{esc} = 296,024 + 123,626(\%EFC - 23\%) - 498,854(\%EFC - 23\%)^2$$

**Tabla 378: Comparación de resultados experimentales y estimados en probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, mediante esclerometría.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	$f'c$ esc [experimental] (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c$ esc [estimada] (kg/cm <sup>2</sup> )	Dispersión (%)
V	28 días	0%	245,616	241,201	±6%
		5%	259,778	257,608	
		10%	272,819	271,522	
		15%	276,770	282,941	
		20%	285,222	291,866	
		25%	282,306	298,297	
		30%	303,190	302,234	
		35%	322,191	303,676	
		40%	317,423	302,624	
		50%	279,691	293,037	

Fuente: Propia.

Si se hicieran pruebas donde se reemplace proporcionalmente el peso de la arena por porcentajes más elevados de escoria de cobre sería posible analizar de mejor manera el efecto de ese reemplazo en la calidad del concreto. También sería posible determinar una dispersión mucho más fiable dado que a mayor número de muestras, mayor será la precisión de los cálculos y estimaciones.

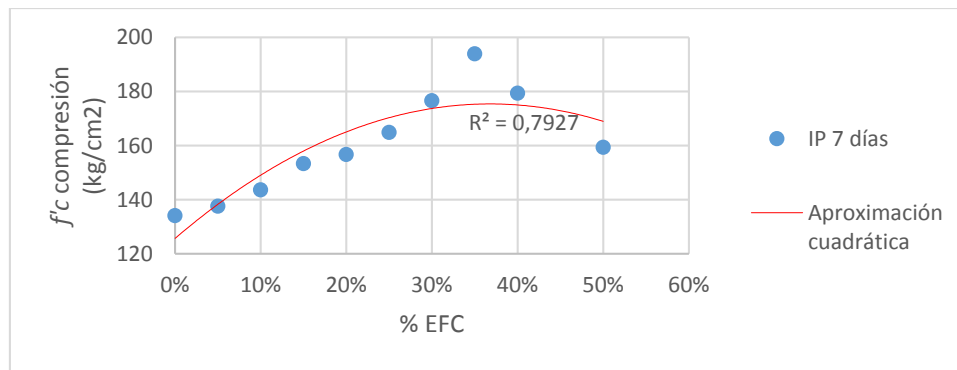
Como la escoria de cobre tiene una capacidad de absorción mucho menor que la del agregado fino, se prevé que a una proporción de escoria superior al 80% la mezcla se hará demasiado fluida y poco trabajable, a menos que se confine en moldes o encofrés herméticos, que impidan el escurrimiento de agua. Ello no significa que el resultado final llegue a ser un concreto de escasa resistencia; sin embargo, lo más probable es que las partículas más pesadas se sedimenten en la parte inferior y la parte superior quede escasa en agregado grueso y agregado fino.

### 3.6.15.2. Análisis predictivo de la resistencia a la compresión mediante compresión axial

En base lo explicado en el caso de la estimación de la resistencia a la compresión mediante índice de rebote con esclerómetro, se realizó también el análisis de los datos obtenidos experimentalmente con el ensayo de compresión axial de probetas de concreto. Los cálculos son los mismos y el procedimiento es similar.

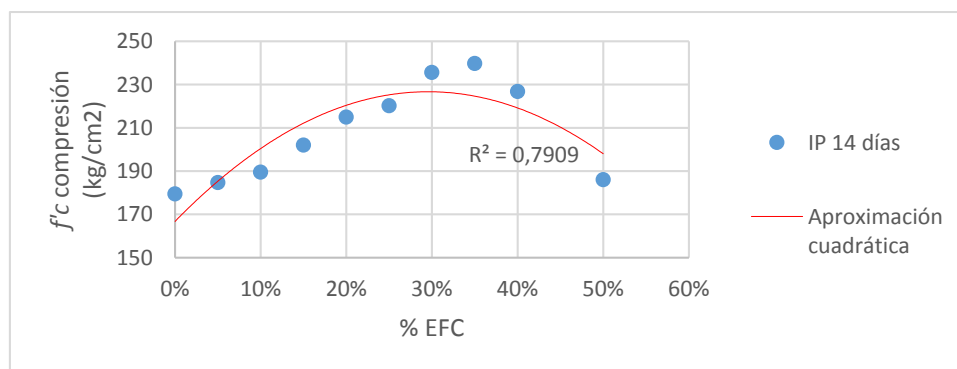
Además, y como se dijo anteriormente, el ensayo de compresión axial de probetas es el método más confiable para determinar la resistencia de un concreto, por lo que se considera que la ecuación calculada para la estimación de dicha resistencia y su respectiva dispersión serán muy útiles para conocer de manera muy aproximada la resistencia del material dentro del rango de escoria de cobre que sustituyó porcentualmente proporciones de peso de agregado fino en la mezcla.

Asimismo, primero fue necesario analizar la dispersión de datos sobre un plano, para asumir un patrón de tendencia adecuado. Las figuras se detallan a continuación.



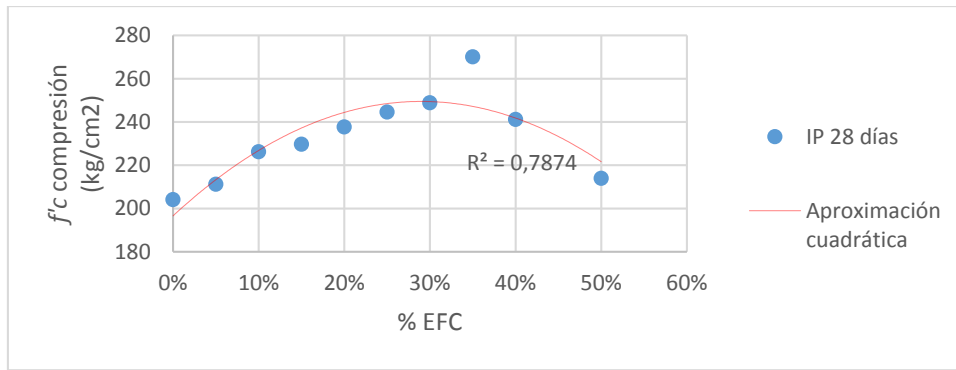
Fuente: Propia.

**Figura 93: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo IP, 7 días de curado, mediante compresión axial.**



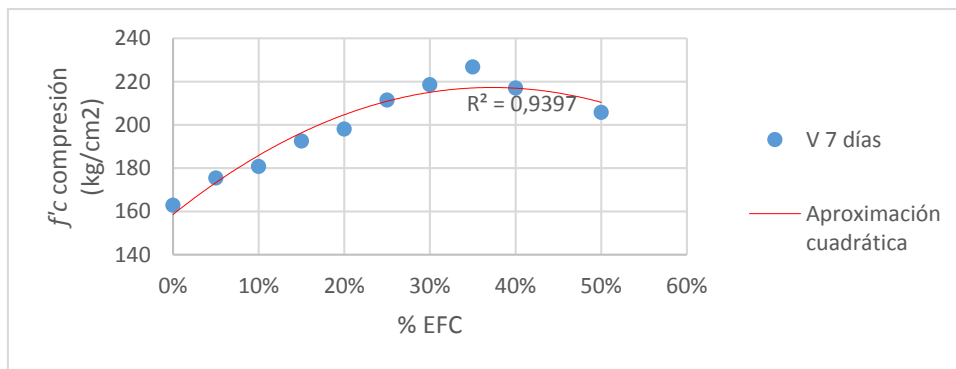
Fuente: Propia.

**Figura 94: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo IP, 14 días de curado, mediante compresión axial.**



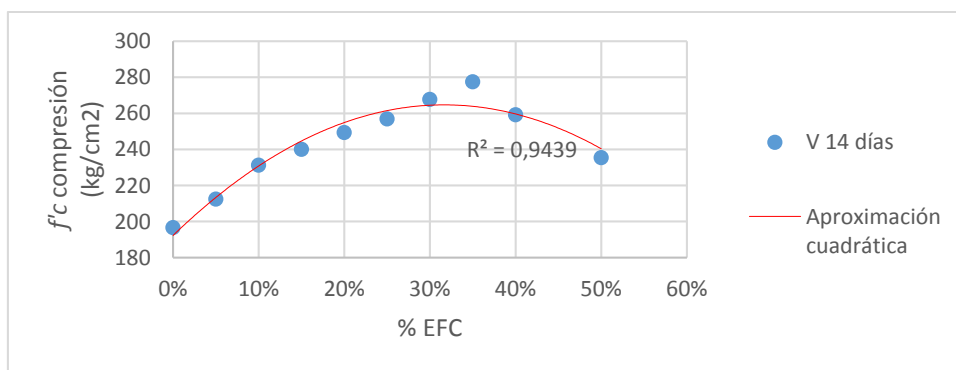
Fuente: Propia.

**Figura 95: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, mediante compresión axial.**



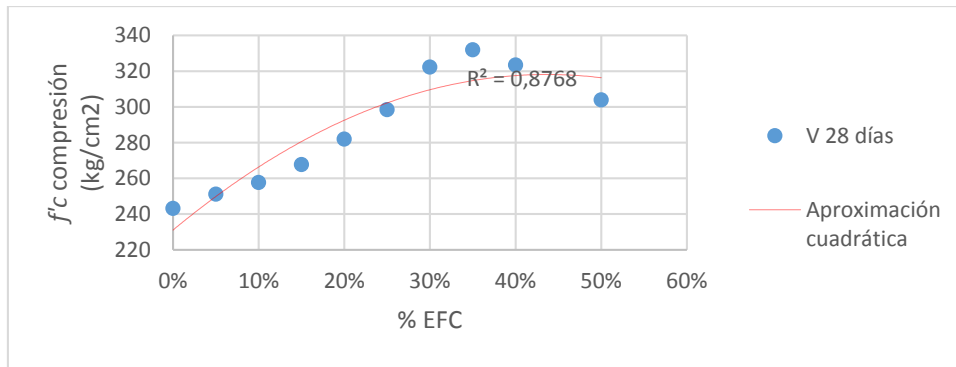
Fuente: Propia.

**Figura 96: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo V, 7 días de curado, mediante compresión axial.**



Fuente: Propia.

**Figura 97: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo V, 14 días de curado, mediante compresión axial.**



Fuente: Propia.

**Figura 98: Dispersión y curva de tendencia en probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, mediante compresión axial.**

También fue necesario analizar los porcentajes residuales, para establecer de manera coherente el valor de dispersión, lo cual se observa en la tabla que sigue.

**Tabla 379: Porcentajes residuales máximos y mínimos por tipo de cemento y tiempo de curado en ensayo de compresión axial.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	Porcentaje residual (%)	
		Máximo [subvaloración]	Mínimo [sobrevaloración]
IP	7 días	10%	-6%
	14 días	7%	-6%
	28 días	8%	-4%
V	7 días	4%	-3%
	14 días	5%	-2%
	28 días	5%	-5%

Fuente: Propia.

Lo más razonable es asumir como resultados para la dispersión aquellos valores que no sobrevaloran la resistencia del concreto, como ya antes se explicó (véase el ítem 3.6.13.) Entonces, la dispersión encontrada es  $\pm 10\%$  para las probetas fabricadas con cemento tipo IP; y  $\pm 5\%$  para los especímenes de cemento tipo V.

Luego, se propone la siguiente ecuación, para estimar la resistencia del concreto a los 28 días de curado, mediante compresión axial de probetas, dentro del rango de reemplazo de agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso.

$$f'c \text{ comp} = 247,263 + 75,142(\%EFC - 23\%) - 630,297(\%EFC - 23\%)^2$$

Donde:

$f'c_{comp}$ : resistencia del concreto estimada mediante compresión axial ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), en función de las proporciones de agregado fino sustituido por escoria de cobre (%).

%EFC: proporción de agregado fino sustituido por escoria de cobre (%).

23%: promedio de las proporciones de agregado fino sustituido por escoria de cobre definidas durante los ensayos experimentales.

**Tabla 380: Comparación de resultados experimentales y estimados en probetas de cemento tipo IP, 28 días de curado, mediante compresión axial.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	$f'c_{comp}$ [experimental] ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	$f'c_{comp}$ [estimada] ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Dispersión (%)
IP	28 días	0%	204,041	196,638	±10%
		5%	211,167	213,316	
		10%	226,180	226,843	
		15%	229,672	237,218	
		20%	237,612	244,442	
		25%	244,492	248,514	
		30%	248,790	249,435	
		35%	270,015	247,204	
		40%	241,154	241,822	
		50%	213,910	221,603	

Fuente: Propia.

La Tabla 380 muestra los resultados de las estimaciones realizadas con la ecuación respectiva. La diferencia entre los resultados experimentales y las estimaciones realizadas con el modelo encontrado se compensa aplicando una dispersión de  $\pm 10\%$  del valor de la estimación.

El resultado de las estimaciones no es exacto, pero la ecuación resulta de la aproximación de la dispersión de puntos sobre una línea de tendencia que demuestra ser apropiada por su coeficiente de determinación próximo a 1.

En probetas fabricadas con cemento tipo V y tiempo de curado de 28 días, se encontró la ecuación:

$$f'c_{comp} = 298,635 + 188,810(\%EFC - 23\%) - 456,682(\%EFC - 23\%)^2$$

**Tabla 381: Comparación de resultados experimentales y estimados en probetas de cemento tipo V, 28 días de curado, mediante compresión axial.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	$f'c$ comp [experimental] (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'c$ comp [estimada] (kg/cm <sup>2</sup> )	Dispersión (%)
V	28 días	0%	243,104	231,050	±5%
		5%	251,041	249,853	
		10%	257,590	266,372	
		15%	267,609	280,607	
		20%	281,844	292,560	
		25%	298,381	302,228	
		30%	322,192	309,614	
		35%	331,893	314,716	
		40%	323,381	317,534	
		50%	303,820	316,321	

Fuente: Propia.

### 3.6.16. Análisis químico del concreto y de la escoria de cobre

Las pruebas a que fueron sometidas muestras de concreto, descritas en b. del ítem 3.5.11., permitieron entender el fenómeno de interacción entre el cemento y la escoria de cobre. También se pudo averiguar de forma cualitativa la composición de la EFC empleando diferentes compuestos y reactivos.

#### 3.6.16.1. Contenido de cobre

El ácido nítrico es un compuesto químico que reacciona con los metales. Usualmente se usa el ácido nítrico para verificar la presencia de cobre en una sustancia; bajo dicha premisa, se observó su reacción con la escoria de cobre.



Fuente: Propia.

**Figura 99: Reacción del ácido nítrico con la escoria de cobre.**



En la Figura 99 se puede apreciar el resultado de la reacción entre el ácido nítrico y la escoria de cobre, donde la solución se tornó de color verdoso. Esa tonalidad verde indica presencia de cobre; sin embargo, el color no es muy intenso. El color pudo verse afectado porque en la escoria de cobre también hay hierro, cuya reacción con el ácido nítrico tiene una tonalidad amarilla intensa, la cual pudo haber atenuado el verde característico de la reacción con el cobre.

Entonces, de acuerdo al color de la solución se puede asegurar que hay cobre en la escoria, por lo menos en cantidades pequeñas.

Es importante aclarar que la escoria de cobre sometida a reacción con el ácido nítrico sufrió poca degradación durante el ensayo, lo cual puede deberse a que la escoria tiene componentes que le otorgan una textura vítrea y a simple vista exenta de porosidad, lo cual dificulta el ingreso de líquidos en su interior.

### 3.6.16.2. Contenido de hierro

En el caso del contenido de hierro, se puso un poco de escoria de cobre en un tubo de ensayo y se vertió ferricianuro de potasio.



Fuente: Propia.

**Figura 100: Reacción del ferricianuro de potasio con la escoria de cobre.**

Las partículas de color azul que aparecen adheridas al recipiente en la Figura 100 indican presencia de hierro en la escoria de cobre, ya que la reacción del ferricianuro de potasio con el hierro da como resultado una sustancia de color azul. Por lo tanto se puede afirmar que uno de los componentes de la escoria de cobre es el hierro.

En este caso el color del líquido resultante de la reacción tampoco tomó una tonalidad intensa, debido a la textura de la escoria de cobre.

### 3.6.16.3. Contenido de sílice

La Sílice, conocida también como dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), es un material que se encuentra como componente de la mayoría de tipos de rocas. Posee una dureza elevada y es, probablemente, responsable de la textura vítrea de la escoria de cobre.



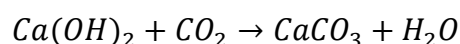
Fuente: Propia.

**Figura 101: Reacción del ácido clorhídrico con la escoria de cobre.**

Cuando el ácido clorhídrico reacciona con la sílice, la solución resultante de dicha reacción debe ser incolora, y la sílice se precipita al fondo del recipiente. La Figura 101 muestra eso mismo: el ensayo aplicado a la escoria de cobre da como resultado un fluido un poco turbio pero casi incoloro, y la escoria se sedimenta, lo cual quiere decir que las partículas de EFC contienen sílice. Esa sílice es la que otorga a la escoria de cobre su textura vítrea.

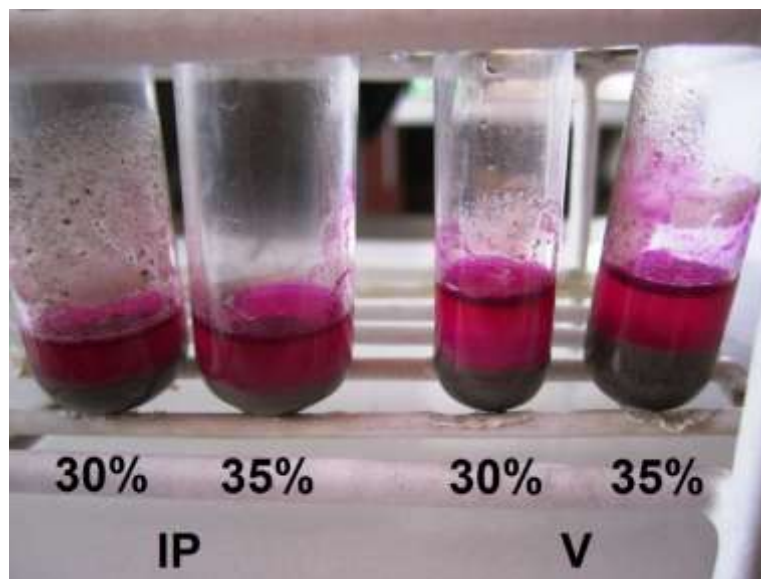
### 3.6.16.4. Verificación de la carbonatación del concreto con escoria de cobre

Carbonatación es la formación de carbonato de calcio insoluble cuando el hidróxido de calcio, que se encuentra en el concreto, reacciona ante la presencia del dióxido de carbono. Dicha reacción también origina la aparición de agua.



No obstante, al haber empleado escoria de cobre, con importante presencia de hierro, en la fabricación del concreto en esta investigación, se hace necesario analizar la carbonatación del concreto, para descartar reacciones adversas de la escoria al ver reducido el pH del concreto ante el proceso de formación de carbonato de calcio.

El pH usual en un concreto bien fabricado oscila alrededor de 12,5. El pH es un parámetro muy importante que debe ser tomado en cuenta cuando se habla de concreto armado o reforzado.



Fuente: Propia.

**Figura 102: Reacción de la fenolftaleína y el concreto con escoria de cobre.**

Cuando la fenolftaleína reacciona con el carbonato de calcio, la solución se torna blanquecina. En la Figura 102 se puede apreciar las pruebas realizadas en concretos fabricados con escoria de cobre en proporciones de 30% y 35%, curados durante 28 días. El primer par de muestras de concreto fue fabricado con cemento tipo IP y es fácil observar que la solución tiene un color rosado intenso o púrpura, lo cual indica que no existen indicios de carbonatación. En el segundo par de muestras de concreto, fabricado con cemento tipo V, el reactivo también tomó un color rosado intenso, lo que es un indicador de ausencia de carbonato de calcio en el concreto.

El color rosado intenso o púrpura indica que la fenolftaleína está en reacción con un medio básico o alcalino, lo cual es una condición deseable para proteger el acero de refuerzo de la corrosión cuando se habla de concreto armado. Al contener hierro, la escoria de cobre podría ser analizada dentro del concreto como si se tratara del acero de refuerzo; así, los resultados del análisis indican que la escoria se encuentra en un medio o fase básica, libre de carbonatación y no habrá reacciones adversas con el hierro presente en el material. Sin embargo, se debe aclarar que la prueba con fenolftaleína es cualitativa y el color rosado únicamente indica que no existe carbonatación, o si la hay existe en pequeñas proporciones, y que el pH del concreto se encuentra por encima de 10, pero no se puede saber cuánto es su valor real.

### 3.6.16.5. Análisis del pH del concreto con escoria de cobre

Visto lo anterior, se sabe que el concreto con escoria de cobre constituye una fase básica o alcalina y, además, está libre de carbonatación o la cantidad de carbonato de calcio en dicha fase no es considerable.



Fuente: Propia.

**Figura 103: Medición del pH del concreto con 35% de escoria de cobre.**

El pH del concreto, para asegurar un medio que proteja el acero de refuerzo en concreto armado o elementos que contengan hierro, debe ser igual o superior a 12,5. Por eso, se midió el pH del concreto, sobre todo el fabricado con el porcentaje óptimo, para averiguar las condiciones en las cuales se encuentra la escoria de cobre.

**Tabla 382: pH del concreto con escoria de cobre.**

Tipo de cemento	% EFC	pH promedio del concreto con escoria de cobre
IP	30%	12,321
	35%	12,440
	40%	12,890
V	30%	12,243
	35%	12,830
	40%	13,180

Fuente: Propia.



En la Tabla 382 se puede observar que los resultados de la medición del pH exceden, en la mayoría de casos, el valor de 12,5. Entonces, se puede asegurar que el concreto es apropiado para proteger elementos que contengan hierro, como la escoria de cobre o el acero de refuerzo.

Es preciso recalcar que los primeros cuatro ensayos químicos realizados en laboratorio son cualitativos, o sea que se evaluaron parámetros componentes de la escoria de cobre únicamente comparando matices de color. Solamente el pH del concreto pudo ser evaluado cuantitativamente.

De esa forma, se puede asegurar que el empleo de la escoria de cobre no introducirá ningún elemento o agente que pueda alterar o afectar las propiedades resistivas o materiales del concreto.

Finalmente, se demuestra que la escoria de cobre tendrá un desempeño óptimo como componente de un concreto que tiene un pH altamente básico y que está libre de carbonatación, lo cual es un aporte importante cuando se habla de concreto estructural.

### **3.6.17. Análisis de costos de producción**

La Tabla 383 y la Tabla 384 muestran un análisis de costos donde los insumos, mano de obra y equipo necesarios para elaborar un metro cúbico ( $m^3$ ) de concreto, con cementos tipo IP y tipo V, se homologan con los precios actuales.

El análisis no contempla un estudio minucioso del costo de fabricación ya que no es un objetivo de este estudio; sin embargo, es preciso aclarar que los rendimientos varían en función del lugar y de las condiciones en las cuales se elabora el concreto, lo cual incide de manera directa en los costos de producción.

En Cusco, comúnmente se asume que una cuadrilla compuesta por seis peones y asistidos por un operario puede elaborar  $10 m^3$  de concreto en un día. En función de ello, se hizo un análisis de costos para averiguar el precio aproximado de un metro cúbico de concreto con los precios actuales de los materiales e insumos necesarios.

Para consolidar lo propuesto en la investigación, en la sección Anexos se incluye el análisis de costos de  $1 m^3$  de concreto con cementos tipo IP y tipo V sin sustitución de agregado fino por escoria de cobre.

**Tabla 383: Costo de 1 m<sup>3</sup> de concreto con cemento tipo IP y 35% de EFC.**

Rendimiento: 10 m<sup>3</sup>/día  
Unidad: m<sup>3</sup>

	Unidad	Cantidad	Unitario	Parcial	Subtotal
<b>Materiales</b>					
Cemento Portland tipo IP	bls	8,76	23,00	201,48	
Piedra chancada 3/4"	m <sup>3</sup>	0,65	55,00	35,70	
Arena	m <sup>3</sup>	0,17	110,00	18,39	
Agua	m <sup>3</sup>	0,22	10,00	2,23	
Escoria de cobre	kg	231,25	0,20	46,25	
					304,05
<b>Mano de obra</b>					
Peón	hh	6,00	9,50	57,00	
					57,00
<b>Herramientas y equipo</b>					
Mezcladora tipo trompo de media					
bolsa	hm	1,00	6,25	6,25	
Herramientas manuales	% mo	5,00	19,00	0,95	
					7,20
				<b>Total=</b>	<b>368,25</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 384: Costo de 1 m<sup>3</sup> de concreto con cemento tipo V y 35% de EFC.**

Rendimiento: 10 m<sup>3</sup>/día  
Unidad: m<sup>3</sup>

	Unidad	Cantidad	Unitario	Parcial	Subtotal
<b>Materiales</b>					
Cemento Portland tipo V	bls	8,76	23,00	201,48	
Piedra chancada 3/4"	m <sup>3</sup>	0,65	55,00	35,70	
Arena	m <sup>3</sup>	0,18	110,00	19,28	
Agua	m <sup>3</sup>	0,22	10,00	2,24	
Escoria de cobre	kg	242,44	0,20	48,49	
					307,18
<b>Mano de obra</b>					
Peón	hh	6,00	9,50	57,00	
					57,00
<b>Herramientas y equipo</b>					
Mezcladora tipo trompo de media					
bolsa	hm	1,00	6,25	6,25	
Herramientas manuales	% mo	5,00	19,00	0,95	
					7,20
				<b>Total=</b>	<b>371,38</b>

Fuente: Propia.



El precio de fabricación del concreto con cemento tipo V es apenas mayor que el fabricado con cemento tipo IP.

Asimismo, el precio de un metro cúbico de concreto con 35% del peso del agregado fino reemplazado por escoria de cobre (porcentaje óptimo) es similar al precio de producción de un metro cúbico de concreto convencional.



## Capítulo IV: Resultados

Los ensayos realizados y sus respectivos análisis permitieron arribar a resultados muy importantes, ajustados a las normas y reglamentos que establecen los parámetros fundamentales sobre la fabricación y verificación de la consistencia en la mezcla fresca y resistencia a la compresión del concreto endurecido.

Asimismo, los resultados obtenidos en cada análisis permitieron entender de mejor manera muchos fenómenos físicos que ocurren desde que el cemento es hidratado, como el asentamiento en función de la cantidad de agregado fino sustituido por escoria de cobre en la etapa más temprana de la fabricación del concreto, así como también el mecanismo de desarrollo de la resistencia a la compresión a través del tiempo.

Además, se realizó un análisis profundo sobre la relación que existe entre el ensayo de índice de rebote o esclerometría y el ensayo de compresión axial de probetas, lo cual permitió determinar un rango de dispersiones más preciso que el que proporciona el fabricante del esclerómetro.

También se hizo un análisis predictivo que permitió arribar a ecuaciones para estimar la resistencia a la compresión del concreto a proporciones de escoria de cobre no contempladas en el estudio, dentro del rango experimental establecido.

### 4.1. Consistencia del concreto fresco

Las mediciones realizadas durante la fabricación de la mezcla permitieron comprender el concepto de consistencia del concreto. El asentamiento, *slump* o revenimiento, es el parámetro que permite cuantificar la consistencia.

La Tabla 385, a continuación, muestra los valores del asentamiento promedio de los concretos fabricados en la investigación, los cuales fueron curados durante 7, 14 y 28 días. También se muestra una clasificación del concreto según su consistencia de acuerdo a lo explicado en el ítem 2.2.10.



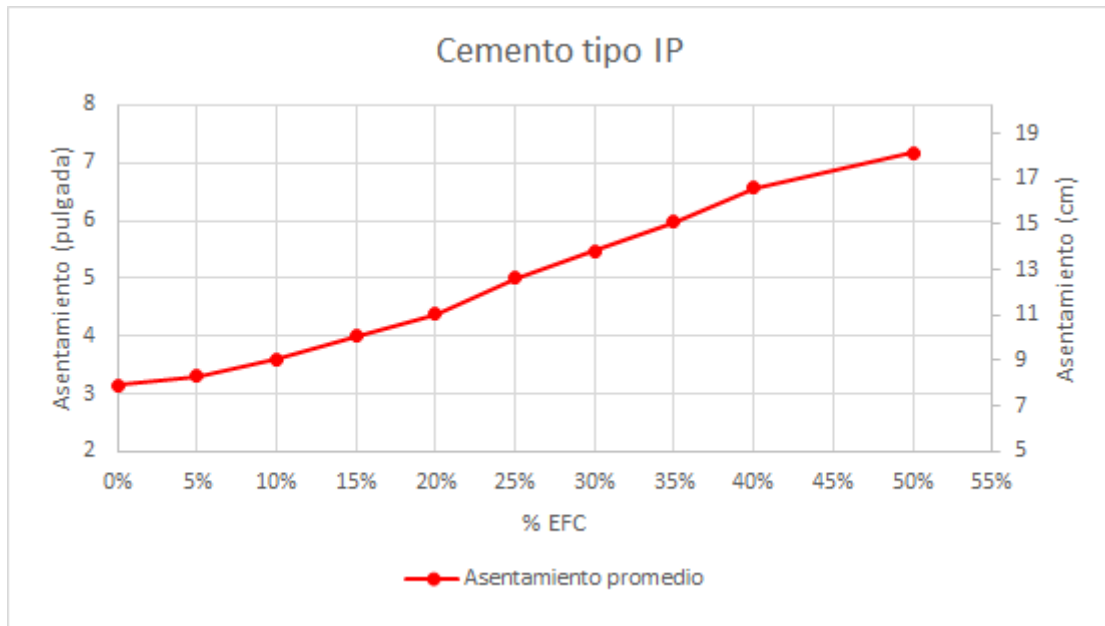
**Tabla 385: Resultados promedio del asentamiento y clasificación del concreto según su consistencia.**

Tipo de cemento	% EFC	Asentamiento promedio del concreto fresco		Incremento del asentamiento respecto al patrón (pulgada)	Consistencia del concreto según su consistencia
		pulgada	cm		
IP	0%	3,15	7,99	0,00	Media/blanda
	5%	3,30	8,39	0,16	Media/blanda
	10%	3,60	9,15	0,46	Media/blanda
	15%	4,00	10,16	0,85	Húmeda/fluida
	20%	4,39	11,14	1,24	Húmeda/fluida
	25%	5,00	12,70	1,85	Húmeda/fluida
	30%	5,47	13,89	2,32	Húmeda/fluida
	35%	5,98	15,19	2,83	Muy húmeda/fluida
	40%	6,56	16,67	3,42	Muy húmeda/líquida
	50%	7,17	18,20	4,02	Muy húmeda/líquida
V	0%	3,38	8,57	0,00	Media/blanda
	5%	3,71	9,42	0,33	Media/blanda
	10%	4,08	10,37	0,71	Húmeda/fluida
	15%	4,38	11,11	1,00	Húmeda/fluida
	20%	4,79	12,17	1,42	Húmeda/fluida
	25%	5,35	13,60	1,98	Húmeda/fluida
	30%	5,99	15,21	2,61	Muy húmeda/fluida
	35%	6,58	16,72	3,21	Muy húmeda/líquida
	40%	7,53	19,13	4,16	Muy húmeda/líquida
	50%	8,45	21,46	5,07	Muy húmeda/líquida

Fuente: Propia.

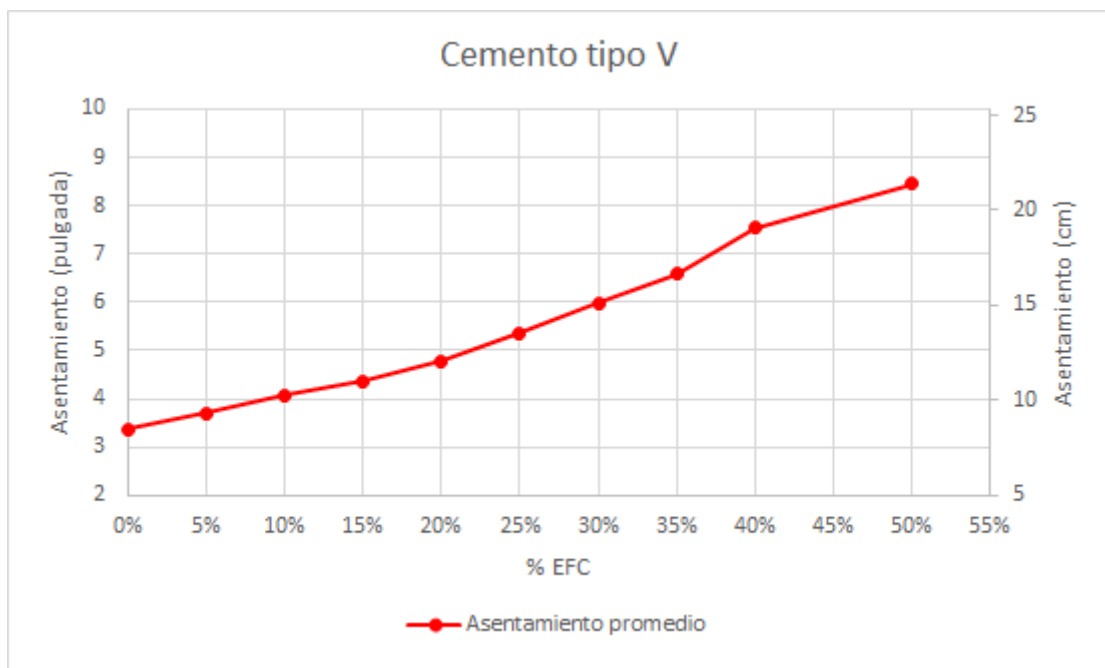
La mezcla se hace más fluida debido a que la escoria de cobre tiene una baja capacidad de absorción y al incrementarse las proporciones de agregado fino sustituido hay más agua suelta dentro de la mezcla. Asimismo, la clasificación mostrada en la Tabla 385 demuestra que el concreto fabricado con cemento tipo V desarrolla asentamientos más altos y consistencias más fluidas que la mezcla elaborada con cemento tipo IP, lo cual es evidente en la proporción de sustitución de 50% de la arena por escoria de cobre, donde el *slump* del concreto con cemento tipo V es mayor que el del fabricado con cemento tipo IP en más de una pulgada.

El asentamiento medido durante la preparación de las mezclas con cementos tipo IP y tipo V resultó tener un patrón de progreso lineal con respecto a los porcentajes de escoria de cobre introducidos como sustituta del agregado fino en proporciones de peso, comparado con el *slump* de un concreto patrón; y se aprecia también que la consistencia varía en función de la humedad en la mezcla. Lo anterior se describe en las figuras que siguen.



Fuente: Propia.

**Figura 104: Desarrollo del asentamiento promedio de la mezcla, fabricada con cemento tipo IP, con el incremento de escoria de cobre.**



Fuente: Propia.

**Figura 105: Desarrollo del asentamiento promedio de la mezcla, fabricada con cemento tipo V, con el incremento de escoria de cobre.**

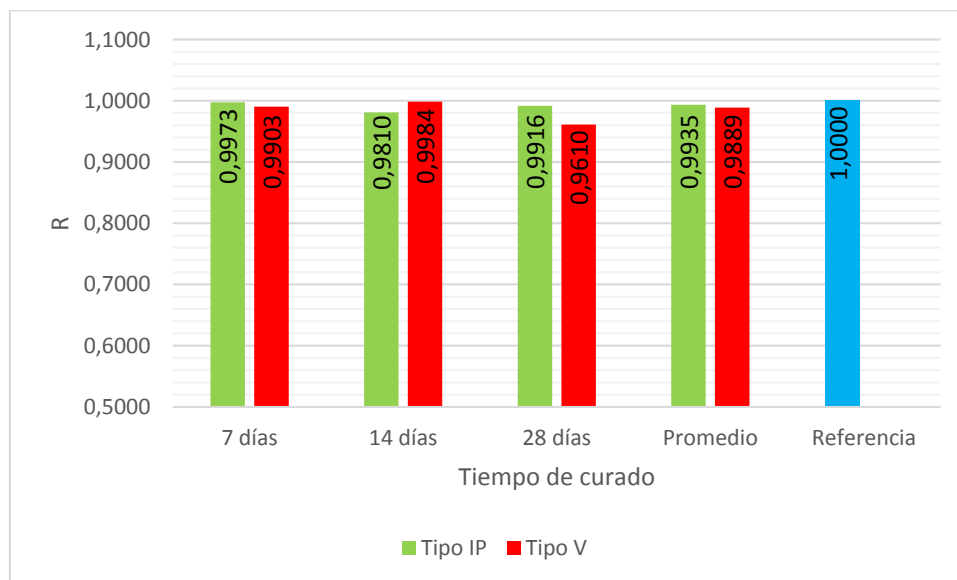
En ambas figuras, la línea roja representa el promedio de los asentamientos registrados para las mezclas con que fueron fabricadas las probetas curadas durante 7, 14 y 28 días. Se justifica, además, el análisis del promedio de dichos valores porque las proporciones de escoria de cobre y las condiciones de fabricación del material fueron las mismas en el concreto fresco preparado con cementos tipo IP y tipo V para los diferentes tiempos de curado.

Como se dijo antes, se aprecia que el asentamiento de la mezcla describe un crecimiento lineal, directamente proporcional a la cantidad de agregado fino sustituido por escoria de fundición de cobre en proporciones de peso en kilogramos. Esa proporcionalidad se verificó empleando los coeficientes de correlación de Pearson, cuyos resultados se aprecian a continuación.

**Tabla 386: Coeficientes de correlación de Pearson %EFC–asentamiento.**

Tipo de cemento	Coeficientes de correlación de Pearson del promedio de los asentamientos de los tres tiempos de curado	
IP	$R$	0,9935
	$R^2$	0,9871
V	$R$	0,9889
	$R^2$	0,9780

Fuente: Propia.

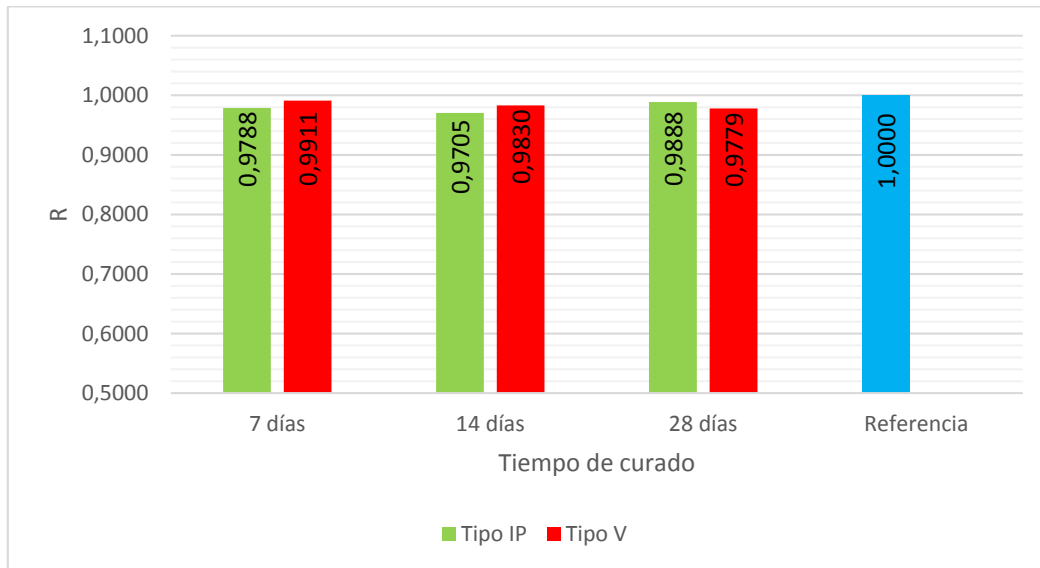


Fuente: Propia.

**Figura 106: Coeficientes de correlación de Pearson del % EFC–asentamiento, en concretos fabricados con cementos tipo IP y tipo V [0%–50% de EFC].**

Se observa que los coeficientes de correlación de Pearson en las mezclas fabricadas con cementos tipo IP (barra verde) y tipo V (barra roja) se aproximan a 1 (barra azul), por lo cual se puede asegurar que entre las proporciones de escoria de cobre y el asentamiento hay una correlación positiva muy fuerte.

De forma similar, se analizó la relación que existe entre el asentamiento y la resistencia a la compresión del concreto.



Fuente: Propia.

**Figura 107: Coeficientes de correlación de Pearson del *asentamiento*– $f'_c$ , en concretos fabricados con cementos tipo IP y tipo V [0%–35% de EFC].**

La Figura 107 muestra la correlación que existe entre el asentamiento de la mezcla fresca y la resistencia a la compresión de los concretos fabricados con cementos tipo IP (barra verde) y tipo V (barra roja), respecto a una correlación positiva perfecta (barra azul). La correlación también resulta positiva muy fuerte, ya que los resultados están muy próximos a 1. Por consiguiente, se puede afirmar que la resistencia a la compresión del concreto se incrementa de forma directamente proporcional al asentamiento de la mezcla fresca y el incremento se mantiene hasta alcanzar el contenido óptimo de escoria de cobre (35%). Es preciso aclarar que el análisis correlacional se hizo solamente en el rango experimental de 0% a 35% de escoria de cobre (ver justificación en el ítem 3.6.10.3.)

En teoría, la resistencia de un concreto será afectada en la medida en que una mezcla se haga más fluida. Se debe tener en cuenta que la escoria de cobre tiene una baja capacidad de absorción. Así, al aumentar los porcentajes de escoria que sustituyó al agregado fino en

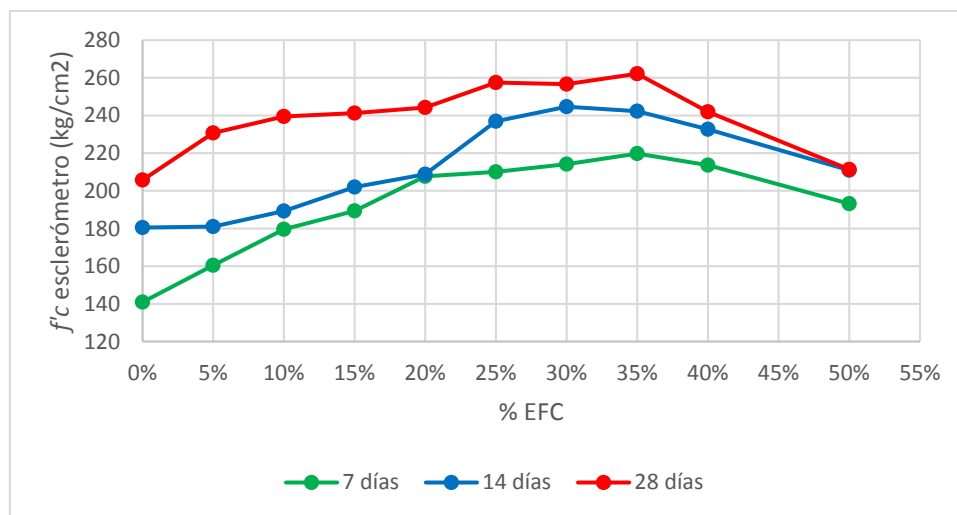
proporciones de peso, la mezcla empezó a mostrar una consistencia más fluida. La Figura 107 demuestra que el incremento de fluidez en la mezcla fresca es proporcional al incremento de la resistencia a la compresión del concreto endurecido hasta una proporción de 35% de escoria de cobre, a partir de ese punto la resistencia empieza a decrecer mientras el asentamiento sigue aumentando. De esa manera se confirma la validez de la hipótesis que indica que la consistencia mejora a medida que las proporciones de escoria de cobre en el concreto fresco se incrementan. Sin embargo, una mezcla de consistencia demasiado fluida podría ocasionar problemas de trabajabilidad; también podría introducir el problema de la sedimentación de las partículas de agregado grueso y riesgo de pérdida de agua y cemento por escurrimiento.

En conclusión, la consistencia mejora cuando la mezcla se hace más fluida, es decir, a medida que la escoria de cobre aumenta en el concreto, pero podría haber problemas de trabajabilidad.

## 4.2. Resistencia del concreto fabricado con cementos tipo IP y tipo V

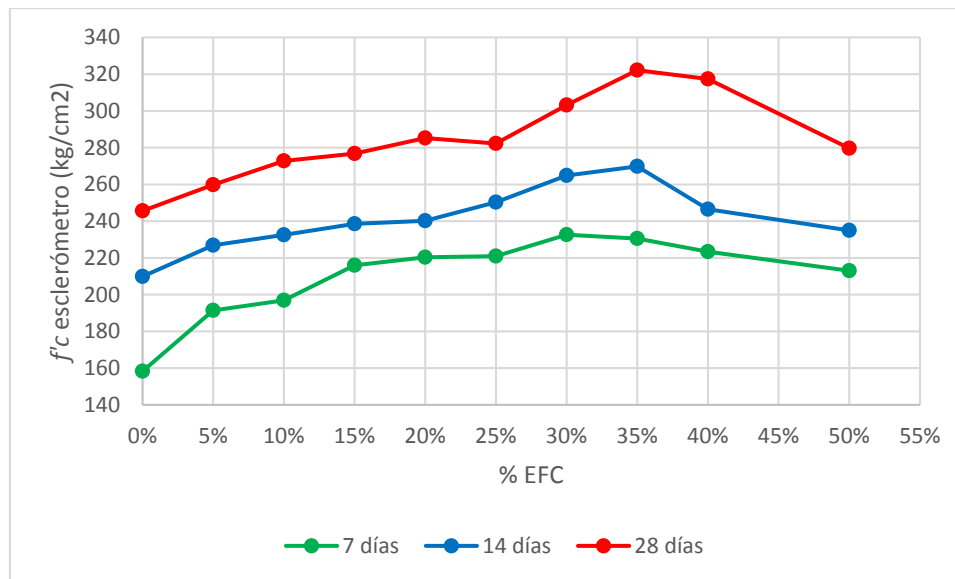
### 4.2.1. Resistencia a la compresión del concreto determinada mediante índice de rebote o esclerometría

La Tabla 291 muestra los resultados de la resistencia a la compresión que se obtuvieron mediante el ensayo de índice de rebote o esclerometría. Para ver de mejor manera el desarrollo de la resistencia del concreto, esos resultados se muestran de forma gráfica a continuación.



Fuente: Propia.

**Figura 108: Resistencia a la compresión mediante esclerometría en concreto con cemento tipo IP a 7, 14 y 28 días de curado.**



Fuente: Propia.

**Figura 109: Resistencia a la compresión mediante esclerometría en concreto con cemento tipo V a 7, 14 y 28 días de curado.**

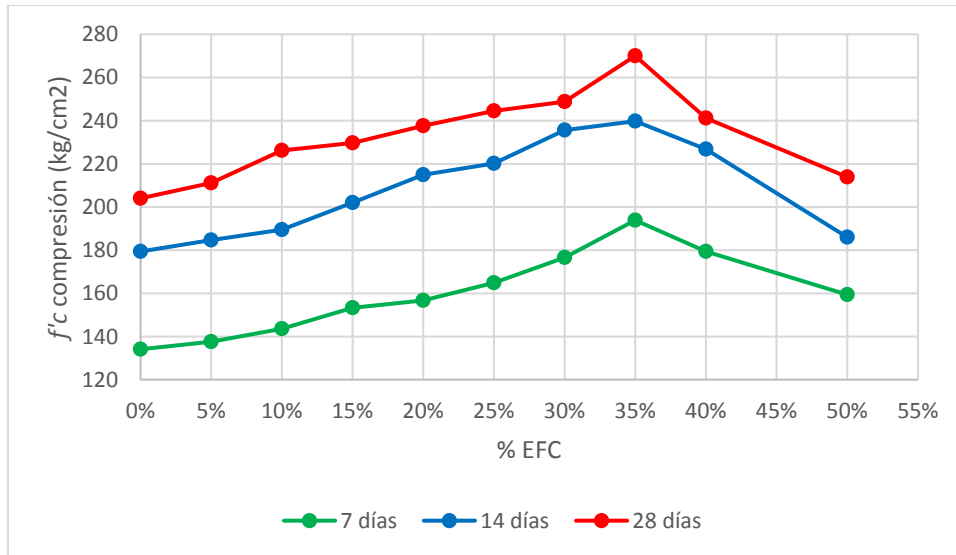
En la Figura 108 se observan tres curvas, cada una de ellas muestra cómo varía la resistencia a la compresión del concreto a medida que se incrementan las proporciones de escoria de cobre que sustituye al agregado fino en proporciones de peso. La curva verde (sumergido durante 7 días) y la curva roja (sumergido durante 28 días) logran su máximo valor cuando la proporción de EFC es 35% del peso de arena que fue sustituido como parte de la investigación. La curva azul (sumergido durante 14 días) alcanza su máximo valor en 30%; sin embargo, la diferencia con el valor que adquiere en 35% es muy reducida. Además, se debe tener en cuenta que el ensayo de índice de rebote es un método aproximado de medición de la resistencia a la compresión del concreto y por lo tanto está sujeto a ciertos márgenes de error.

Similar es el caso de la Figura 109, donde las curvas para 14 y 28 días de curado (curvas azul y roja, respectivamente) alcanzan su valor máximo en 35%. La curva del concreto curado durante 7 días alcanza su valor máximo en 30%, pero la diferencia con el valor encontrado en 35% es pequeña.

Al ser un ensayo de estimación aproximada, las curvas obtenidas en las pruebas de esclerometría tienen una forma irregular, lo cual se debe a diversos factores internos (propios de la estructura de las probetas) y externos (dependen de las condiciones de ensayo).

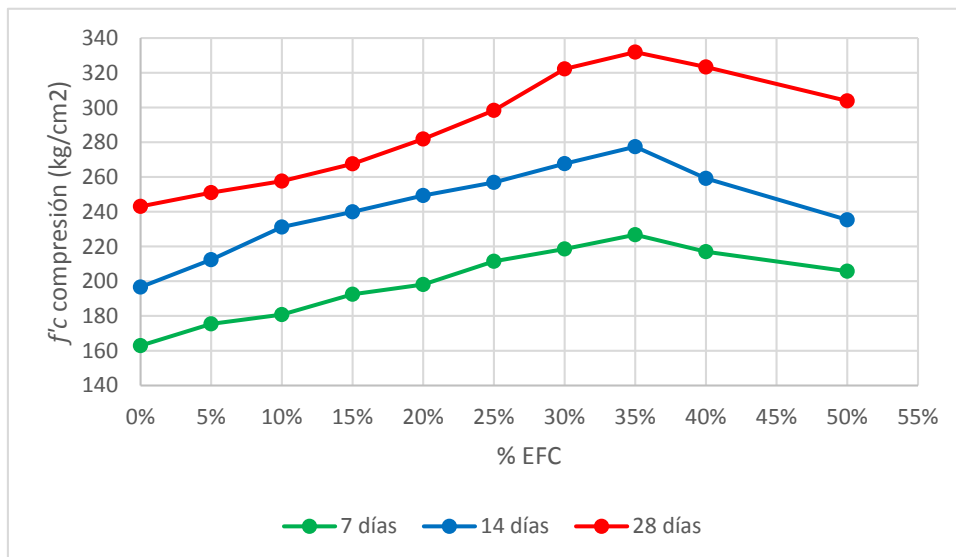
**4.2.2. Resistencia a la compresión del concreto determinada mediante compresión axial**

Los resultados del análisis realizado tras el ensayo de compresión axial en probetas de concreto se pueden apreciar en la Tabla 352. Aquí también es conveniente ver el resultado final de la evolución de la resistencia del concreto de forma gráfica, lo cual se muestra a continuación.



Fuente: Propia.

**Figura 110: Resistencia mediante compresión axial en concreto con cemento tipo IP a 7, 14 y 28 días de curado.**



Fuente: Propia.

**Figura 111: Resistencia mediante compresión axial en concreto con cemento tipo V a 7, 14 y 28 días de curado.**

La Figura 110 muestra, igual que en el caso de esclerometría, tres curvas: verde (sumergido 7 días), azul (sumergido 14 días) y rojo (sumergido 28 días). La resistencia crece entre las proporciones de escoria de cobre de 0% a 35%, donde alcanza su máximo valor; de ahí empieza a decrecer. Es lógico que se dé mayor validez a los resultados del ensayo de compresión axial porque es el único método que logra determinar de manera confiable la resistencia del concreto. Además, las curvas de la resistencia tienen un desarrollo más ordenado, a diferencia del caso anterior, debido a que este ensayo no introduce errores que sean de consideración.

Las curvas mostradas en la Figura 111 sugieren una explicación similar al caso del cemento tipo IP. La diferencia es que las probetas fueron fabricadas con cemento tipo V y se ha logrado un mayor incremento de resistencia a 35%, donde las curvas alcanzan su punto máximo.

Finalmente, en la Tabla 387 se muestran los resultados obtenidos al hallar el promedio de resistencia a la compresión de grupos de 6 probetas cada uno, por cada proporción de escoria de cobre mediante ensayos de índice de rebote (o esclerometría) y compresión axial.

**Tabla 387: Resultados finales de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas.**

Tipo de cemento	% EFC	7 días de curado		14 días de curado		28 días de curado	
		f'c escl (kg/cm2)	f'c comp (kg/cm2)	f'c escl (kg/cm2)	f'c comp (kg/cm2)	f'c escl (kg/cm2)	f'c comp (kg/cm2)
IP	0%	140,895	134,101	180,484	179,427	205,764	204,041
	5%	160,443	137,591	180,989	184,682	230,698	211,167
	10%	179,583	143,582	189,203	189,475	239,426	226,180
	15%	189,340	153,300	201,992	202,018	241,284	229,672
	20%	207,707	156,685	208,774	214,898	244,210	237,612
	25%	210,039	164,856	236,923	220,181	257,495	244,492
	30%	214,148	176,581	244,671	235,606	256,644	248,790
	35%	219,711	193,903	242,243	239,745	262,196	270,015
	40%	213,654	179,382	232,644	226,806	241,937	241,154
	50%	193,125	159,374	210,920	186,009	211,343	213,910
V	0%	158,256	162,869	209,881	196,614	245,616	243,104
	5%	191,435	175,432	226,892	212,390	259,778	251,041
	10%	196,853	180,779	232,499	231,167	272,819	257,590
	15%	215,974	192,507	238,531	239,952	276,770	267,609
	20%	220,344	198,065	240,156	249,343	285,222	281,844
	25%	220,960	211,434	250,280	256,858	282,306	298,381
	30%	232,597	218,587	264,864	267,665	303,190	322,192
	35%	230,551	226,803	269,838	277,442	322,191	331,893
	40%	223,396	217,036	246,430	259,177	317,423	323,381
	50%	213,030	205,788	234,942	235,373	279,691	303,820

Fuente: Propia.



#### 4.2.3. Incremento de la resistencia a la compresión del concreto con escoria de cobre

Para efectos de análisis —ya se comentó antes—, las normas indican que se considere que el concreto ha alcanzado el 100% de su resistencia a la compresión a los 28 días de su fabricación; el curado por inmersión mejora considerablemente dicha propiedad. La Tabla 387 permite ver el aumento de  $f'c$  producto de la incorporación de escoria de cobre en la mezcla.

En la Tabla 355 se observa el cálculo de los incrementos efectivos y sus correspondientes incrementos porcentuales respecto a concretos patrón con 0% de EFC. En el caso del concreto fabricado con cemento tipo IP, a los 28 días de curado logra una resistencia patrón (0% de escoria de cobre) de 204,041 kg/cm<sup>2</sup> y un valor máximo de 270,015 kg/cm<sup>2</sup>, según el ensayo de compresión axial de probetas; la diferencia es **65,974 kg/cm<sup>2</sup>**, que es el incremento efectivo de resistencia con 35% del peso del agregado fino sustituido por escoria de cobre en la mezcla. De la misma forma, el concreto fabricado con cemento tipo V tiene un valor patrón de 243,104 kg/cm<sup>2</sup> y un valor máximo de 331,893 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de inmersión; la diferencia es igual a **88,879 kg/cm<sup>2</sup>**, cantidad que es el incremento efectivo de resistencia a la compresión con 35% del peso del agregado fino sustituido por escoria de cobre en la mezcla.

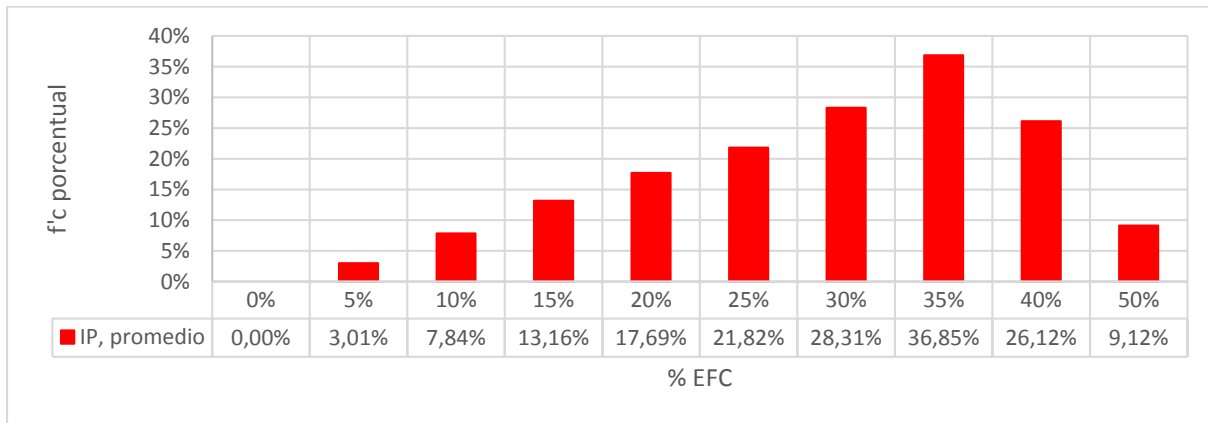
Una manera de apreciar mejor la contribución de la escoria de cobre como componente del concreto se muestra en la tabla siguiente, donde el **incremento porcentual promedio** se ha redondeado a su inmediato entero mayor, para simplificar el análisis.

**Tabla 388: Incremento de la resistencia a la compresión del concreto en la proporción óptima de escoria de cobre para ambos tipos de cemento.**

Tipo de cemento	Tiempo de curado	% EFC	$f'c$ comp (kg/cm <sup>2</sup> )	Diferencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Incremento sobre el patrón	Incremento promedio
IP	7 días	0% (patrón)	134,101	59,802	45%	37%
		35% (óptimo)	193,903			
	14 días	0% (patrón)	179,427	60,317	34%	
		35% (óptimo)	239,745			
	28 días	0% (patrón)	204,041	65,974	32%	
		35% (óptimo)	270,015			
V	7 días	0% (patrón)	162,869	63,934	39%	39%
		35% (óptimo)	226,803			
	14 días	0% (patrón)	196,614	80,828	41%	
		35% (óptimo)	277,442			
	28 días	0% (patrón)	243,104	88,789	37%	
		35% (óptimo)	331,893			

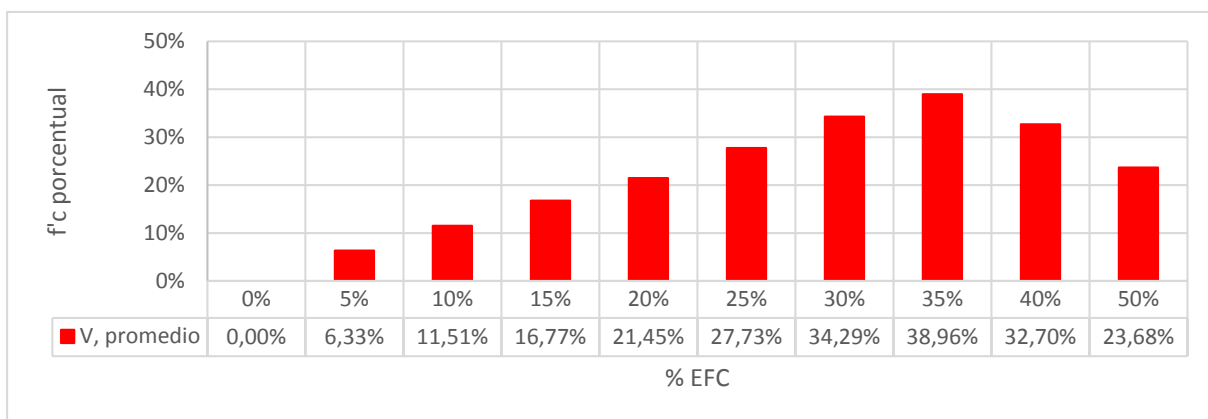
Fuente: Propia.

La Tabla 388 muestra el incremento de la resistencia del concreto, mediante compresión axial, al reemplazar el 35% del peso de agregado fino por escoria de cobre, el cual es el porcentaje de reemplazo óptimo, donde se consiguió el máximo incremento de la resistencia respecto al concreto patrón o de referencia (0% de EFC). Al ver los resultados expresados en términos porcentuales, se puede notar que el concreto fabricado con cemento tipo V obtiene ligeramente un mejor desempeño en compresión (39% sobre el patrón) que el fabricado con cemento tipo IP (37% sobre el patrón) en el porcentaje óptimo de reemplazo.



Fuente: Propia.

**Figura 112: Incremento porcentual promedio de  $f'c$  respecto al patrón con cemento tipo IP.**

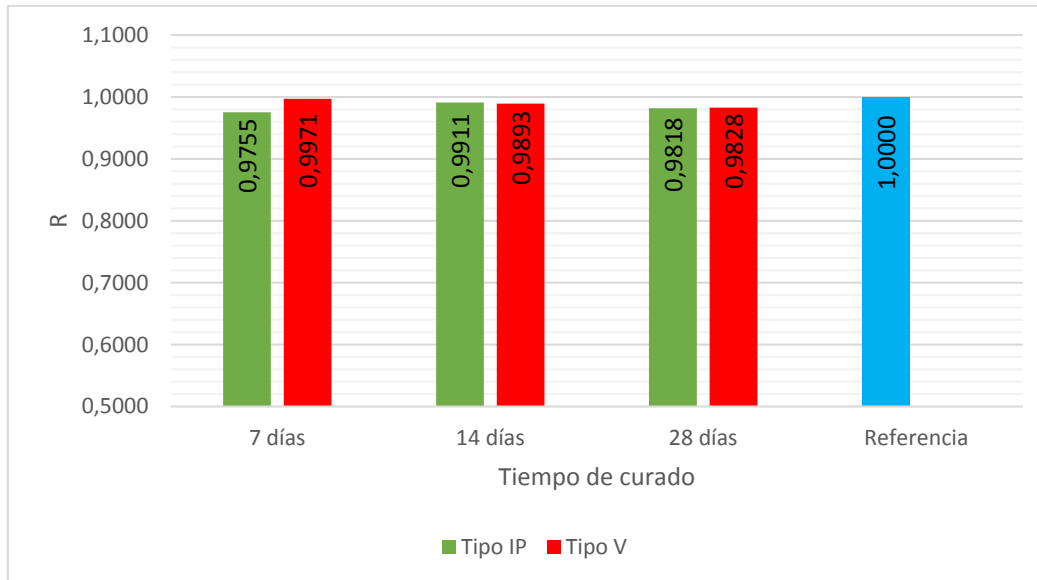


Fuente: Propia.

**Figura 113: Incremento porcentual promedio de  $f'c$  respecto al patrón con cemento tipo V.**

De manera más simple, la *Figura 112* y la *Figura 113* permiten apreciar de forma gráfica el incremento porcentual de la resistencia a la compresión del concreto.

Uno de los objetivos de la investigación es estudiar la relación que existe entre la sustitución progresiva de la arena por escoria de cobre en proporciones porcentuales de peso. Para ello se hizo el análisis desarrollado en 3.6.10.5. y que de forma gráfica se ve a continuación.



Fuente: Propia.

**Figura 114: Coeficientes de correlación de Pearson del % EFC- $f'_c$ , en concretos fabricados con cementos tipo IP y tipo V [0%–35% de EFC].**

La Figura 114 demuestra que hay una correlación positiva muy fuerte entre el porcentaje de escoria de cobre y la resistencia a la compresión del concreto, pero solamente hasta 35% de EFC, que es el porcentaje de reemplazo de agregado fino óptimo. De esa manera queda demostrada una de las hipótesis de la investigación, que será comentada con más detalle en el apartado de Conclusiones.

### 4.3. Dispersión real del esclerómetro

La determinación del modelo de aproximación y el análisis de la subvaloración y sobrevaloración de los porcentajes residuales, a partir del estudio de la correlación entre los resultados encontrados mediante el ensayo de compresión axial de probetas como variable dependiente y del ensayo de índice de rebote como variable independiente, permitieron calcular el valor real de la dispersión del esclerómetro empleado en los ensayos sobre las probetas que fueron elaboradas para este estudio. De esa manera, ya no tendrá que considerarse las dispersiones de  $\pm 60\%$  y  $\pm 65\%$  que recomienda el fabricante.

**Tabla 389: Dispersión real del esclerómetro en función de las ecuaciones de tendencia exponencial y cúbica por cada tipo de cemento.**

Tipo de cemento	Porcentaje residual máximo con ecuación de tendencia	
	Exponencial	Cúbica
IP	±10%	±9%
V	±8%	±7%

Fuente: Propia.

Finalmente, el análisis de la Tabla 389 permite establecer el valor final de la dispersión del esclerómetro en  $\pm 10\%$  cuando se ponen a prueba las probetas fabricadas con cemento tipo IP. En el caso de las probetas elaboradas con cemento tipo V la dispersión es  $\pm 8\%$ .

La selección la dispersión se hizo bajo el criterio de que cuando se trata de los materiales de construcción, siempre se asuman los valores desfavorables máximos.

#### **4.4. Ecuaciones para la estimación de la resistencia a la compresión del concreto**

##### **4.4.1. Ecuaciones de tendencia para estimar la resistencia del concreto mediante el índice de rebote**

La ecuación que permite estimar la resistencia a la compresión del concreto, compensada con su respectiva dispersión, para cualquier porcentaje de escoria de cobre dentro del rango experimental (0% a 50%) en probetas fabricadas con cemento IP, por medio del índice de rebote, es:

$$f'c_{esc} = [255,900 + 45,387(\%EFC - 23\%) - 727,264(\%EFC - 23\%)^2] \pm 8\%$$

Donde:

$f'c_{esc}$ : resistencia a la compresión del concreto estimada mediante esclerometría ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), en función de las proporciones de agregado fino sustituido por escoria de cobre (%).

$\%EFC$ : proporción de agregado fino sustituido por escoria de cobre (%).

23%: promedio de las proporciones de agregado fino sustituido por escoria de cobre definidas durante los ensayos experimentales.



Del mismo modo, cuando para estimar la resistencia del concreto cuando se trata de probetas elaboradas con cemento tipo V la ecuación y dispersión correspondiente es:

$$f'c_{esc} = [296,024 + 123,626(\%EFC - 23\%) - 498,854(\%EFC - 23\%)^2] \pm 6\%$$

#### 4.4.2. Ecuaciones de tendencia para estimar la resistencia del concreto mediante compresión axial

En probetas fabricadas con cemento tipo IP, dentro de los límites experimentales, la ecuación de estimación y dispersión es la siguiente:

$$f'c_{comp} = [247,263 + 75,142(\%EFC - 23\%) - 630,297(\%EFC - 23\%)^2] \pm 10\%$$

Donde:

$f'c_{comp}$ : resistencia del concreto estimada mediante compresión axial ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), en función de las proporciones de agregado fino sustituido por escoria de cobre (%).

De igual forma, cuando las probetas son fabricadas con cemento tipo V la ecuación de cálculo y su correspondiente dispersión se aprecia a continuación:

$$f'c_{comp} = [298,635 + 188,810(\%EFC - 23\%) - 456,682(\%EFC - 23\%)^2] \pm 5\%$$

## Capítulo V: Discusión

### 5.1. Contraste de resultados con referentes del marco teórico

#### 5.1.1. ¿Influye la granulometría de los agregados en la resistencia a la compresión del concreto?

La Figura 74 mostró que con un porcentaje de sustitución de 35% del peso de arena por escoria de cobre, la curva granulométrica resultante de dicha combinación se insertó dentro de los límites granulométricos establecidos para el agregado fino. Además, con 35% de escoria de cobre en el concreto, los especímenes alcanzaron sus valores máximos de resistencia a la compresión —resultados que fueron obtenidos mediante el ensayo de compresión axial de probetas cilíndricas—, lo cual confirma que la granulometría influye sobre dicho parámetro.

#### 5.1.2. ¿Los valores de dispersión proporcionados por los fabricantes del esclerómetro empleado en los ensayos son apropiados para ajustar los resultados obtenidos en la investigación? ¿Fue posible determinar valores más aproximados de la resistencia a la compresión del concreto mediante índice de rebote?

La dispersión  $\pm 60\%$  cuando los resultados están entre 201 y 300  $\text{kg/cm}^2$ , y  $\pm 65\%$  cuando están entre 301  $\text{kg/cm}^2$  y 400  $\text{kg/cm}^2$  (véase 1. de Anexos)— que otorga el fabricante sobre el esclerómetro que fue empleado en la investigación es un parámetro de ajuste relativo, que depende en gran medida de las condiciones locales del elemento y del tiempo de antigüedad. En el caso de los especímenes que fueron puestos a prueba, la edad de las probetas no superó los 28 días, durante los cuales estuvieron sumergidas. Así, no se tuvo que contemplar problemas por deterioro, antigüedad o carbonatación, por lo cual se puede afirmar que la dispersión real del esclerómetro utilizado es de  $\pm 10\%$  respecto al resultado experimental por compresión cuando las probetas se fabrican con cemento tipo IP; y  $\pm 9\%$  cuando se emplea cemento tipo V.

#### 5.1.3. ¿Quiere decir que el ensayo de compresión axial es más confiable que el ensayo de índice de rebote?

Como se mencionó en el apartado 2.2.9., el ensayo de compresión axial de probetas es la manera más confiable de medir la resistencia a la compresión del concreto porque otorga resultados directos y más precisos; a diferencia del ensayo de índice de rebote con esclerómetro que obliga recurrir a la curva de calibración del instrumento y, además, contemplar márgenes de



dispersión, proporcionados por el fabricante, que son muy considerables e inducen a aceptar errores también considerables. Sin embargo, ya se dijo que la ventaja principal del ensayo de esclerometría es ser no destructivo y se puede aplicar in situ, a diferencia del ensayo de compresión axial que requiere ser realizado en laboratorio y termina con la destrucción de la muestra.

#### **5.1.4. Y, ¿qué tan confiable es el ensayo de índice de rebote o esclerometría?**

Si se aseguran condiciones adecuadas y favorables, el ensayo de esclerometría en el concreto puede ofrecer resultados bastante cercanos a los que se podría obtener mediante un ensayo de compresión en laboratorio. No obstante, siempre se debe tener en cuenta las recomendaciones y especificaciones propuestas en las normas técnicas y reglamentos.

#### **5.1.5. ¿El pH del concreto se vio alterado con la incorporación de escoria de cobre en el concreto?**

En teoría, el pH del concreto debe estar entre 12 y 13, y puede considerarse que 12,5 es un nivel de pH altamente alcalino que garantiza un medio o fase que protegerá de forma efectiva al acero de refuerzo si se trata de un concreto estructural. Los resultados mostrados en la Tabla 382 corresponden a muestras de concreto con escoria de cobre, donde en la proporción de sustitución óptima los valores del pH están muy próximos a 12,5, y en muchos casos superan dicho valor.

### **5.2. Interpretación de los resultados encontrados en la investigación**

#### **5.2.1. ¿Son satisfactorios los resultados obtenidos tras el incremento de escoria de cobre en la mezcla como sustituta del agregado fino?**

Los resultados evidencian que un porcentaje de 35% del peso de agregado fino sustituido por escoria de cobre en concreto fabricado con cementos tipo IP y tipo V incrementa la resistencia a la compresión en más del 30% respecto a un concreto patrón con  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ , con lo cual se demuestran las hipótesis planteadas al inicio de la investigación.



### **5.2.2. ¿La consistencia del concreto mejora con la incorporación de escoria de cobre en la mezcla fresca?**

El análisis del asentamiento de la mezcla fresca permitió determinar que la consistencia del concreto se hace más fluida en la medida que se incrementan las proporciones de escoria de cobre que sustituye al agregado fino. Sin embargo el aumento de fluidez no implica una mejoría en la resistencia del concreto, ya que a partir de un porcentaje de 35%, al cual se llamó porcentaje óptimo, la resistencia empezó a decrecer. Visto lo anterior, es posible asegurar que una consistencia demasiado fluida no significa mejoría y tampoco asegura una mejor trabajabilidad.

### **5.2.3. ¿Cuál es la relación que existe entre el asentamiento de la mezcla fresca y la resistencia a la compresión del concreto endurecido?**

Aunque el asentamiento se incrementa a medida que la cantidad de escoria de cobre aumenta en la mezcla, la resistencia a la compresión del concreto también aumenta, lo cual contradice el postulado teórico que indica que la resistencia del concreto disminuye a medida que la mezcla se hace más fluida debido a que la relación agua cemento aumenta. Sin embargo, esto es relativo porque el efecto de incremento de resistencia se produce solamente hasta alcanzar el 35% de escoria como sustituta del agregado fino en proporción de peso; a partir de ese punto la resistencia empieza a decrecer.

### **5.2.4. Entonces, ¿qué tipo de relación existe entre el asentamiento, la consistencia y la resistencia a la compresión del concreto?**

Existe correlación lineal entre el asentamiento de la mezcla y la resistencia a la compresión del concreto endurecido, curado a 7, 14 y 28 días. Pero a partir de la proporción óptima de escoria de cobre, que es 35%, la resistencia empieza a disminuir; mientras que a mayores proporciones de EFC el asentamiento sigue incrementándose y la consistencia se hace más fluida, lo cual describe una relación totalmente lineal; entonces se puede afirmar que a partir del punto óptimo no existe relación lineal entre ambos.



**5.2.5. ¿Es posible relacionar los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión —más específicamente, resultados del ensayo de esclerometría y de compresión axial— con las proporciones experimentales propuestas en la investigación para determinar el valor de  $f'c$  en una proporción de escoria de cobre que no fue objeto de estudio?**

Fue posible utilizar los datos del ensayo de índice de rebote con esclerómetro y se establecieron ecuaciones que permiten conocer el valor de la resistencia a la compresión del concreto en valores porcentuales que no fueron probados experimentalmente durante la investigación, dentro del rango experimental (0% a 50% de escoria de cobre) y ajustadas por su respectiva dispersión, a los 28 días de curado donde, en teoría, el concreto alcanza el 100% de su resistencia.

- Cemento tipo IP:

$$f'c_{esc} = [255,900 + 45,387(\%EFC - 23\%) - 727,264(\%EFC - 23\%)^2] \pm 8\%$$

- Cemento tipo V:

$$f'c_{esc} = [296,024 + 123,626(\%EFC - 23\%) - 498,854(\%EFC - 23\%)^2] \pm 6\%$$

También fue posible encontrar ecuaciones de estimación de la resistencia del concreto a partir de los datos del ensayo de compresión axial de probetas, dentro del rango experimental de la tesis.

- Cemento tipo IP:

$$f'c_{comp} = [247,263 + 75,142(\%EFC - 23\%) - 630,297(\%EFC - 23\%)^2] \pm 10\%$$

- Cemento tipo V:

$$f'c_{comp} = [298,635 + 188,810(\%EFC - 23\%) - 456,682(\%EFC - 23\%)^2] \pm 5\%$$

**5.2.6. Si la escoria de cobre tiene un peso específico y mayor densidad que la arena, ¿de qué manera influyó en la preparación de la mezcla?**

Debido a que la escoria de cobre tiene un peso específico mayor que el de la arena, a medida que las proporciones de sustitución se incrementaban la cantidad de mezcla se fue reduciendo debido a que su estructura molecular es más densa. Por eso, cuando se elaboraron los concretos



con porcentajes superiores a 40% de sustitución de agregado fino por escoria de cobre el volumen de la mezcla empezó a disminuir de manera notoria.

Sin embargo, el diseño de mezclas contempló un margen de 5% por desperdicios, lo cual compensó el déficit de concreto en los porcentajes de sustitución de 40% y 50%. Es una situación que debe tenerse muy en cuenta si se quiere reproducir parte o toda la tesis.

### **5.3. Comentario de la demostración de la hipótesis**

#### **5.3.1. Y, ¿qué origina el incremento de fluidez en la mezcla?**

La baja capacidad de absorción y la textura vítrea y escasamente porosa de la escoria de cobre hacen que al incorporarla en sustitución del agregado fino haya más agua de mezcla libre en la mezcla fresca, por lo cual el concreto se hace más fluido cuando aumentan las proporciones de arena sustituida al no existir un medio que absorba el agua.

#### **5.3.2. ¿Cuál es la principal característica física de la escoria de cobre que influye sobre la consistencia del concreto?**

La escoria de fundición de cobre es un material cuya capacidad de absorción es demasiado baja. Por eso, una proporción de escoria demasiado elevada hará que la mezcla sea muy fluida, lo cual afectará de manera desfavorable a la consistencia y la trabajabilidad del concreto fresco.

### **5.4. Aporte de la investigación**

#### **5.4.1. ¿Cuál es el aporte fundamental del trabajo de investigación realizado sobre los efectos de sustitución de agregado fino por escoria de cobre en proporciones porcentuales de peso en el concreto?**

Este estudio cree que ha contribuido de manera importante en la corroboración de dos aspectos técnicos y un tema analítico.

Primero, se ha demostrado que la incorporación de escoria de cobre en sustitución del agregado fino produce una elevación del valor de resistencia a la compresión del concreto, fabricado con cemento tipo IP y tipo V, en el punto óptimo de sustitución (35% de EFC). Y, segundo, se ha visto el efecto de la escoria de cobre sobre la consistencia del concreto, donde se ha demostrado



que la consistencia se hace más fluida en directa proporción con el incremento de escoria en estrecha relación con la baja capacidad de absorción del material sustituto.

Además, esta tesis empleó modelos de aproximación y patrones de tendencia en función de los resultados obtenidos, para analizar con ellos el comportamiento real del concreto y estimar la verdadera dispersión del esclerómetro empleado en los ensayos.

#### **5.4.2. ¿Qué aspectos científicos y técnicos importantes produjo este trabajo de investigación como aporte al desarrollo de la tecnología del concreto?**

Este estudio introdujo temas nuevos al desarrollo de la tecnología del concreto respecto a trabajos de investigación anteriores realizados en esta universidad.

El análisis de la subvaloración y sobrevaloración de la resistencia del concreto permite llegar, por medio del cálculo de los porcentajes residuales máximos, a un patrón de estimación que permite asegurar una dispersión más ajustada a las condiciones en que se encontraban los especímenes fabricados, siempre y cuando el concreto no exceda los límites de su tolerancia a esfuerzos y cargas externas. Además de lo anterior, respecto a la metodología de trabajo se ha propuesto un sistema de codificación de especímenes que permitió agrupar los abundantes datos y resultados de manera más ordenada y explícita, fácil de ubicar dentro del volumen desarrollado.

En vista de ello, se resaltan los siguientes aportes:

- Análisis de la **subvaloración y sobrevaloración** de  $f'c$  en el concreto.
- Determinación de **porcentajes residuales**.
- Empleo de **patrones y modelos de aproximación** en dispersiones de datos.
- Determinación probabilística de rangos de **dispersión** en ensayos no destructivos.
- Establecimiento de **ecuaciones de predicción** del comportamiento de la resistencia a la compresión, mediante índice de rebote y compresión axial, dentro del rango experimental de la tesis (0% a 50% de EFC en el concreto).
- Desarrollo de un **sistema de codificación de muestras**, para organizar y analizar de forma más dinámica la información adquirida durante la investigación.



### **5.4.3. Aparte de su aprovechamiento como material de construcción, ¿qué otro aporte importante propone este trabajo de investigación?**

El empleo de la escoria de fundición de cobre como material de construcción permite dar un uso sostenible a un residuo que es potencialmente peligroso si se dispone como desecho en lugares cercanos a grupos de personas, y puede alterar de forma adversa el ciclo de los ecosistemas. La EFC también es peligrosa por el impacto sobre el medio ambiente debido a su alta resistencia a la degradación y lentísima asimilación natural.

### **5.4.4. ¿Sería rentable el empleo de concreto con escoria de cobre en lugar del concreto convencional en la construcción de estructuras civiles?**

La fabricación de concreto con escoria de cobre tiene un costo similar al del concreto convencional, por lo tanto se puede concluir que su uso no implicaría incrementos significativos sobre los presupuestos. Además, los costos se verían reducidos significativamente si la industria minera y metalúrgica proporcionara la escoria de cobre en grandes cantidades exclusivamente para su empleo en la construcción.

## **5.5. Incorporación de temas nuevos que se han presentado durante el proceso de la investigación que no estaba considerado dentro de los objetivos de la investigación**

### **5.5.1. ¿Se introdujeron temas nuevos que inicialmente no fueron contemplados en los objetivos de la investigación?**

Para consolidar los resultados de la investigación, tuvo que recurrirse a conceptos que anteriormente no fueron empleados en tesis que estudiaron el comportamiento del concreto en esta universidad. Así, se emplearon **modelos de aproximación** estadística y **patrones de tendencia**, para calcular una dispersión más ajustada a las condiciones en las cuales se realizó la investigación. Con ello también se pudo determinar ecuaciones que permiten calcular la resistencia del concreto en proporciones que no fueron contempladas dentro del rango experimental.

Asimismo, se emplearon los conceptos de **porcentajes residuales** y de **subvaloración y sobrevaloración** en el proceso de análisis de resultados, lo cual consolida lo demostrado en este estudio.



Con todo lo anterior, las expectativas propuestas en los objetivos de la investigación fueron superadas, y por mucho.

### **5.5.2. ¿Fue posible analizar la composición química de la escoria de cobre para analizar su comportamiento como componente del concreto?**

Las herramientas disponibles en el Laboratorio de Química de la Facultad permitieron realizar un estudio cualitativo de la composición química de la escoria de cobre, mediante la aplicación de reactivos al material.

La escoria de cobre tiene una textura vítrea, que la hace resistente al ataque de sustancias reactivas, por la presencia de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) en su composición. Asimismo, se demostró que existen pequeñas cantidades de cobre remanente. También se comprobó la existencia de hierro como componente de la escoria. Además, se verificó que no contribuye a la formación de carbonatos o elementos que podrían afectar el acero de refuerzo si se empleara en concreto estructural.

Finalmente, se comprobó de manera cuantitativa que la EFC no altera el pH del concreto, lo cual crea un medio que asegura la protección de los refuerzos de acero en concreto estructural.



## Glosario

**Agua:** Como componente del concreto, hidrata las partículas de cemento en la mezcla para que desarrolle sus propiedades aglutinantes. El agua también es importante como elemento de curado, donde se procura que el cemento esté hidratado hasta que los espacios intermoleculares de la mezcla sean ocupados por el producto de la hidratación del concreto. Se recomienda que el agua de mezcla y el agua de curado sea potable, o por lo menos esté libre de sustancias que puedan afectar el proceso de hidratación del cemento (aceites, azúcares, colorantes, etc.)

**Agregado:** Es el material que aporta su propia resistencia a la compresión y actúa como relleno en el concreto, que no perturba el proceso de fraguado ni endurecimiento. De acuerdo a su forma se define su adherencia con el mortero. Una forma de clasificarlo es por su tamaño: agregado fino y agregado grueso.

**Cemento:** El cemento hidráulico es el material que «tiene la propiedad de fraguar y endurecer ante la presencia de agua» (ASOCRETO, 2010, pág. 2). También puede definirse el cemento como un adhesivo y cohesivo que aglutina a los componentes del concreto. El cemento Portland es el tipo más utilizado. Existen cinco tipos de cemento: tipo I y IP, tipo II, tipo III, tipo IV y tipo V.

**Concreto:** Es un material de características similares a la piedra. Es conocido también como hormigón. Hace referencia a partículas, conocidas como agregados, fino y grueso, aglutinadas por un ligante compuesto por la mezcla de agua y cemento.

**Consistencia:** Es la capacidad de la mezcla fresca para fluir. Es la dificultad que ofrece la pasta para experimentar deformación. La consistencia está en proporción directa con el contenido de agua. Su parámetro de medida es el asentamiento o revenimiento, que se determina por medio del ensayo conocido como *slump test* que emplea el cono de Abrams.

**Curado:** Es el proceso que tiene la finalidad de lograr la saturación del concreto hasta que los productos de la hidratación del cemento se formen y llenen los espacios que inicialmente estuvieron ocupados por agua al inicio del proceso de fraguado.

**Esclerómetro:** Es conocido también como martillo de Schmidt. Se emplea para evaluar la dureza superficial del concreto por medio de la medición del rebote de un émbolo cargado con



un resorte, después de haber golpeado una superficie plana de la estructura (ASOCRETO, 2010, pág. 144).

**Escoria de fundición de cobre:** Es el material residual que resulta del proceso de fundición y refinación del cobre. Tiene una textura irregular y vitrificada. Principalmente está compuesta por óxido de hierro y óxido de sílice.

**Esfuerzo:** Es toda fuerza o carga, interna o externa, que actúa sobre un elemento. En términos técnicos, es la resistencia ante una carga aplicada sobre un área unitaria.

**Fraguar:** Es el proceso inicial de endurecimiento del concreto y empieza con el fraguado inicial, donde la pasta empieza a perder su plasticidad, y concluye con el fraguado final, donde la pasta es resistente a la deformación ante cargas pequeñas.

**Gel:** Es la sustancia que resulta de la mezcla del cemento con el agua; es el producto de la hidratación del cemento en la mezcla.

**Resistencia:** Es la capacidad del concreto de resistir ante la aplicación de esfuerzos o cargas externas. Los más importantes son: resistencia a compresión, resistencia a tracción, resistencia a flexión y resistencia a corte. La resistencia a compresión es la propiedad más importante del concreto cuando tiene desempeño estructural.

**Resistencia a la compresión:** Es la capacidad de un elemento de concreto de soportar esfuerzos externos de compresión. La práctica la define como el criterio de evaluación de calidad más importante del concreto.

**Probeta:** Conocida comúnmente también como briqueta en el uso local. Se trata de un elemento cilíndrico sólido sobre el cual se aplican pruebas para verificar la calidad del concreto. Sus dimensiones más comunes son 20 cm x 10 cm y 30 cm x 15 cm, altura y diámetro respectivamente.



## Abreviaturas

<b>AASHTO:</b>	American Association of State Highway Transportation Officials.
<b>ACI:</b>	American Concrete Institute.
<b>AF:</b>	Agregado fino.
<b>AG:</b>	Agregado grueso.
<b>ASTM:</b>	American Society of Testing Materials.
<b>EFC:</b>	Escoria de fundición de cobre.
<b>FIA:</b>	Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
<b>NTP:</b>	Norma Técnica Peruana.
<b>RNE:</b>	Reglamento Nacional de Edificaciones.
<b>SI:</b>	Sistema Internacional de Unidades.
<b>TMN:</b>	Tamaño máximo nominal.
<b>UAC:</b>	Universidad Andina del Cusco.





## Conclusiones

### Conclusión N° 1

Un concreto diseñado para alcanzar una resistencia a la compresión de  $210 \text{ kg/cm}^2$ , fabricado con cementos tipo IP o tipo V, incrementa su capacidad de resistencia a la compresión al sustituir 35% del peso total de agregado fino por escoria de cobre, lo cual se hace mucho más evidente a los 28 días de curado de las probetas (véase Tabla 387). Además, la consistencia del concreto mejora en la medida que se incrementan los porcentajes de escoria de cobre hasta alcanzar la proporción óptima de reemplazo del agregado fino, que es 35% (véase Tabla 385). De esa forma, se verifica la hipótesis general de la investigación que indicaba que *«La resistencia a la compresión y la consistencia de un concreto  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  elaborado con cementos tipo IP y tipo V, mediante pruebas de índice de rebote y compresión axial de testigos sometidos a curado por inmersión, mejorará con la sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporción de peso, comparado con un concreto patrón.»*

### Conclusión N° 2

La Tabla 388 demuestra que al reemplazar el agregado fino en una proporción de 35% de su propio peso por escoria de cobre, la resistencia a la compresión del concreto, fabricado con cemento tipo IP o tipo V, se optimiza pues eleva su resistencia en una proporción real de 37% cuando se emplea cemento tipo IP, y 39% cuando se utiliza cemento tipo V, respecto a un concreto patrón (0% de escoria de cobre). Así, se corrobora la validez de la hipótesis que decía que *«Se optimizará la resistencia a compresión del concreto con la sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones porcentuales de peso.»*

### Conclusión N° 3

Si se analiza de manera más detallada los resultados del ensayo de compresión axial obtenidos durante la investigación, mostrados en la Tabla 388, se llega a la conclusión de que hay incremento de resistencia en el concreto a los 7, 14 y 28 días de curado por inmersión de las probetas; lógicamente, el incremento de resistencia es mayor en los primeros días de edad del concreto. Entonces se comprueba la validez de la hipótesis: *«La resistencia del concreto con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso se incrementará a los 7, 14 y 28 días del curado por inmersión.»*



#### Conclusión N° 4

Se observó que los porcentajes de escoria de cobre que sustituyeron proporcionalmente al agregado fino y el asentamiento o *slump* de la mezcla fresca tuvieron una relación de variación directamente proporcional, lo cual fue verificado calculando los coeficientes de correlación de Pearson y sus respectivos coeficientes de determinación ( $R^2$ ), como se puede apreciar en forma gráfica en la Figura 106. Es decir que, a medida que se incrementaron las proporciones de escoria de cobre en el concreto como sustituta de la arena, el asentamiento de la mezcla también aumentó respecto al concreto patrón (0% de EFC). Entonces queda verificada la hipótesis que indicaba que *«La consistencia del concreto, en términos del asentamiento, con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporción de peso será superior a la del concreto patrón con  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup>.»*

#### Conclusión N° 5

La Tabla 387 muestra los resultados de resistencia a la compresión del concreto que fueron obtenidos mediante compresión axial e índice de rebote con el esclerómetro empleado en la tesis; en ella, se puede apreciar que la resistencia del concreto se incrementa a medida que aumentan las proporciones de agregado fino sustituido por escoria de cobre; dicho aumento es efectivo hasta llegar al 35% de sustitución, a partir de ese punto la resistencia empieza a decrecer. Para corroborar la relación entre el incremento de escoria de cobre y la resistencia a la compresión del concreto, se determinaron y analizaron los coeficientes de correlación de Pearson desde 0% hasta 35% de EFC, cuyos valores se detallan en la Figura 114. De esa forma, la hipótesis que asevera que *«A mayor porcentaje en peso de la escoria de cobre respecto al peso del agregado fino que se sustituirá en el concreto, se logrará una mayor resistencia a la compresión»* se verifica solamente hasta el porcentaje óptimo de sustitución de agregado fino por escoria de cobre, que es 35%, porque en adelante empezará a decrecer.

#### Conclusión N° 6

Inicialmente se empezó con la hipótesis de que *«Un concreto con resistencia a la compresión óptima, superior a un concreto patrón  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup>, se obtendrá con un porcentaje de sustitución de agregado fino por escoria de cobre de menos del 30%.»*. Sin embargo, los resultados registrados en la Tabla 387 demuestran que el punto óptimo de sustitución de agregado fino por escoria de cobre, donde la resistencia a la compresión alcanza su valor



máximo, es 35% tanto con cemento tipo IP y con cemento tipo V. Así, queda rechazada la suposición esgrimida preliminarmente en dicha hipótesis.



## Recomendaciones

### Recomendación N° 1

Se recomienda investigar los efectos de la escoria de cobre sobre la resistencia del concreto en proporciones superiores al 50% de sustitución del agregado fino. De hecho, sería muy valioso conocer qué sucede si se reemplazara por completo la arena (100% de escoria).

### Recomendación N° 2

Es recomendable estudiar los efectos de la escoria de cobre sobre la resistencia a flexión y tracción de especímenes fabricados y curados de acuerdo a lo definido en esta investigación.

### Recomendación N° 3

Es muy recomendable que todo ensayo experimental sobre el concreto tenga un sustento o apoyo estadístico o probabilístico, ya que el simple hecho de obtener resultados directamente de los ensayos o pruebas experimentales puede aparentar la comprobación de una hipótesis, pero en el fondo puede no cumplir las condiciones mínimas que un material debe satisfacer de acuerdo a las normas y reglamentos técnicos.

### Recomendación N° 4

Se recomienda investigar el efecto de la EFC sobre concretos fabricados con otros tipos de cemento como el tipo II, el tipo III o el tipo IV. También podría investigarse el efecto de otros tiempos de inmersión o de diferentes métodos de curado.

### Recomendación N° 5

Se recomienda estudiar el efecto de la oxidación que produce la reacción química entre la escoria de cobre y el gel (cemento con agua). También sería un gran aporte profundizar en la investigación del efecto de carbonatación que producen los materiales en la mezcla endurecida.

### Recomendación N° 6

Sería un aporte muy valioso estudiar las características físicas de la escoria de fundición de cobre como material de construcción. Su resistencia a la compresión, deformabilidad, punto de fluencia, etc. permitirían realizar investigaciones mucho más precisas y satisfactorias.

**Recomendación N° 7**

Experimentar el efecto de la temperatura sobre la resistencia a la compresión en probetas fabricadas con escoria de cobre permitiría conocer cómo se comporta el material cuando es expuesto a bajas y altas temperaturas por efecto de dilatación del material.

**Recomendación N° 8**

Es recomendable estudiar concretos con edades mayores a un año desde su fabricación, aplicando la metodología de los modelos de aproximación empleada en la elaboración de esta tesis, mediante el ensayo de índice de rebote con esclerómetro y verificar los efectos que producen las condiciones del entorno del elemento que se estudie.

**Recomendación N° 9**

Se recomienda realizar el estudio de los materiales (peso específico, peso unitario, abrasión, contenido de humedad, etc.) empleados en la investigación y realizar un diseño de mezclas que determine la cantidad necesaria de escoria de cobre para elaborar un concreto que logre una resistencia a la compresión de 210 kg/cm<sup>2</sup>.

**Recomendación N° 10**

El porcentaje óptimo de sustitución de agregado fino por escoria de cobre hallado en este estudio es 35%. Sin embargo, dicho porcentaje depende de la distribución granulométrica de la arena empleada en esta tesis. Por ello, es recomendable que futuras investigaciones empleen agregados finos de canteras diferentes, para determinar el porcentaje de sustitución en función de las granulometrías de arena respectivas (véase como referencia la Figura 74).



## Referencias

- Abanto, F. (1996). *Tecnología del concreto*. Lima: Editorial San Marcos.
- ACI Committee 211. (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*. Estados Unidos: American Concrete Institute [ACI]. Recuperado el 10 de Agosto de 2016, de [http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Concreto%20de%20alta%20densidad/Standard%20Practice%20for%20Selecting%20Proportions%20for%20Normal,%20Heavyweight,%20and%20Mass%20Concrete%20\(ACI%20211.1-91\).pdf](http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Concreto%20de%20alta%20densidad/Standard%20Practice%20for%20Selecting%20Proportions%20for%20Normal,%20Heavyweight,%20and%20Mass%20Concrete%20(ACI%20211.1-91).pdf)
- Asociación Colombiana de Productores de Concreto [ASOCRETO]. (2010). *Tecnología del concreto - Tomo 1. Materiales, propiedades y diseño de mezclas* (Tercera ed.). Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto - ASOCRETO.
- Biswas, A., & Davenport, W. (1993). *El cobre: metalurgia extractiva*. México: Editorial Limusa.
- Castro, F. (2003). *El proyecto de investigación y su esquema de elaboración* (Segunda ed.). Venezuela: Uyapar.
- Comisión Chilena del Cobre. (2004). Anexo C. Resumen descriptivo de las tecnologías y operación de las fundiciones primarias de concentrados de cobre de Chile. En C. C. Cobre, *Inventario nacional de fuentes de emisión de dioxinas y furanos*. Chile: Comisión Chilena del Cobre.
- Davenport, W., King, M., Schlesinger, M., & Biswas, A. (2002). *Extractive metallurgy of copper* (Cuarta ed.). Inglaterra: Elsevier Science Ltd.
- Elías, X. (2009). *Reciclaje de residuos industriales. Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora* (Segunda ed.). España: Ediciones Díaz de Santos.
- Giancoli, D. C. (2006). *Física. Principios con aplicaciones* (Sexta ed.). México: Pearson Educación.
- González, Ó. M., & Robles, F. (2005). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado* (Cuarta ed.). México: Limusa.
- Harmsen, T. E. (2005). *Diseño de estructuras de concreto armado* (Cuarta ed.). Lima: Fondo editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2006). *Metodología de la investigación* (Cuarta ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.
- Hildebrandt, M. (2003). *El habla culta (o lo que debiera serlo)* (Segunda ed.). Lima: Martha Hildebrandt.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (Quinta ed.). México: Pearson Educación.
- López, J. (2008). *Determinación de la actividad del cobre en el sistema (SiO<sub>2</sub>-Cu<sub>2</sub>-FeO) (tesis de pregrado)*. Instituto Politécnico Nacional, México.



- Lovera, D. F., Arias, V., & Coronado, R. (2004). La valoración de las escorias metalúrgicas como recursos industriales. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 7(13).
- Marques, M. J. (2001). *Estadística básica. Un enfoque no paramétrico*. México: Universidad Autónoma de México.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology* (Segunda ed.). Inglaterra: Pearson Education.
- Nilson, A. H. (1999). *Diseño de estructuras de concreto* (Duodécima ed.). Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Onuaguluchi, O. (2012). *Properties of cement based materials containing copper tailings* (tesis doctoral). Chipre: Eastern Mediterranean University.
- Oyarzun, I. A. (2013). *Influencias de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón (tesis de pregrado)*. Universidad Austral de Chile, Chile.
- Páez, A. (1986). *Hormigón armado*. España: Editorial Reverté S.A.
- Pasquel, E. (1998). *Tópicos de tecnología del concreto en el Perú* (Segunda ed.). Lima: Colegio de Ingenieros del Perú.
- Pedroza, H., & Dicovskyi, L. (2007). *Sistema de análisis estadístico con SPSS*. Nicaragua: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Porrero, J., Ramos, C., Grases, J., & Velazco, G. (2009). *Manual del concreto estructural* (Tercera ed.). Venezuela: SIDETUR.
- Proceq S.A. (2013). *Concrete Test Hammer operating instructions*. Suiza: Proceq S.A.
- Rivva, E. (2000). *Naturaleza y materiales del concreto*. Lima: Capítulo peruano ACI.
- Sánchez, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (Quinta ed.). Colombia: Bhandar Editores LTDA.
- Triola, M. F. (2009). *Estadística* (Décima ed.). México: Pearson Educación.
- Valdez, B., & Schorr, M. (2013). *Corrosión y preservación de la infraestructura industrial*. España: Omnia Science.
- Valencia, G., & Ibarra, M. Á. (2013). *Estudio experimental para determinar patrones de correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en concreto simple* (tesis de grado). Pontificia Universidad Católica del Perú.



**Anexos**







**1. Matriz de consistencia**

“Análisis comparativo de la influencia de la escoria de cobre como sustituto del agregado fino en porcentaje de peso, en la resistencia y consistencia de un concreto  $f'c=210 \text{ Kg/cm}^2$  elaborado con cementos tipo IP y tipo V, mediante pruebas de esclerometría y compresión axial de testigos sometidos a curado por inmersión”.

**Tabla 390: Matriz de consistencia del proyecto de investigación.**

<b>Problema</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Variables</b>	<b>Indicador</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Fuente</b>
<p><u>Problema general:</u></p> <p>¿Cómo variará comparativamente la resistencia de un concreto con <math>f'c=210 \text{ kg/cm}^2</math>, con sustitución de agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso, en función de su resistencia a la compresión y consistencia, elaborado con cementos tipo IP y tipo V, mediante pruebas de índice de rebote y compresión axial de probetas sometidas a curado por</p>	<p><u>Hipótesis general:</u></p> <p>La resistencia a la compresión y la consistencia de un concreto <math>f'c=210 \text{ kg/cm}^2</math> elaborado con cementos tipo IP y tipo V, mediante pruebas de índice de rebote y compresión axial de testigos sometidos a curado por inmersión, mejorará con la sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporción de peso, comparado</p>	<p><u>Objetivo general:</u></p> <p>Analizar comparativamente el comportamiento de la resistencia de un concreto <math>f'c=210 \text{ kg/cm}^2</math> con sustitución de agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso en función de su resistencia a la compresión y consistencia, elaborado con cementos tipo IP y tipo V, mediante pruebas de índice de rebote y compresión axial de probetas sometidas</p>	<p>X1: Concreto con sustitución de agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso.</p>	<p>(Para X1:)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantidad de cemento Portland tipo IP (kg).</li> <li>• Cantidad de cemento Portland tipo V (kg).</li> <li>• Cantidad de agregado fino (kg).</li> <li>• Cantidad de agregado grueso (kg).</li> <li>• Cantidad de agua (l o kg).</li> <li>• Cantidad de escoria de cobre (kg).</li> </ul>	<p><u>Instrumentos metodológicos:</u></p> <p>Guías de observación de campo.</p> <p><u>Instrumentos de Ingeniería:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza.</li> <li>• Tamices.</li> <li>• Horno.</li> <li>• Máquina de Los Ángeles.</li> <li>• Esclerómetro.</li> <li>• Máquina de compresión axial.</li> <li>• Cono de Abrams.</li> </ul>	<p>Registros de laboratorio.</p> <p>Libros sobre metodología de la investigación.</p> <p>Libros especializados en tecnología del concreto.</p> <p>Internet.</p>



<p>inmersión, comparado con un concreto patrón?</p> <p><u>Problemas específicos:</u></p> <p>1.- ¿Cómo se comportará la resistencia a la compresión de un concreto que se podría obtener con la sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporción de peso?</p> <p>2.- ¿Cómo variará la resistencia del concreto con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso a los 7, 14 y 28 días de curado por inmersión, comparado con un concreto patrón?</p>	<p>con un concreto patrón.</p> <p><u>Sub hipótesis:</u></p> <p>1.- Se optimizará la resistencia a compresión del concreto con la sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones porcentuales de peso.</p> <p>2.- La resistencia del concreto con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso se incrementará a los 7, 14 y 28 días del curado por inmersión.</p>	<p>a curado por inmersión, respecto a un concreto patrón.</p> <p><u>Objetivos específicos:</u></p> <p>1.- Determinar la resistencia a la compresión en el concreto con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso.</p> <p>2.- Determinar la resistencia a la compresión del concreto con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso a los 7, 14 y 28 días de curado por inmersión.</p>	<p>Y1: Resistencia del concreto.</p> <p>Y2: Consistencia del concreto fresco.</p>	<p>(Para Y1:) Resistencia a la compresión del concreto.</p> <p>(Para Y2:) Asentamiento de la mezcla.</p>		
---	---	--	---	--	--	--



<p>3.- ¿Se obtendrá mejor consistencia en el concreto con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones porcentuales de peso, comparado con un concreto estándar?</p>	<p>3.- La consistencia del concreto, en términos del asentamiento, con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporción de peso será superior a la del concreto patrón con <math>f'c=210</math> kg/cm<sup>2</sup>.</p>	<p>3.- Analizar la consistencia del concreto con sustitución del agregado fino por escoria de cobre en proporciones de peso, respecto a un concreto estándar.</p>				
<p>4.- ¿Cuál será la relación óptima entre el porcentaje en peso del agregado fino que será sustituido por escoria de cobre en el concreto y la resistencia a la compresión?</p>	<p>4.- A mayor porcentaje en peso de la escoria de cobre respecto al peso del agregado fino que se sustituirá en el concreto, se logrará una mayor resistencia a la compresión.</p>	<p>4.- Determinar el porcentaje de peso óptimo de agregado fino que será sustituido por escoria de cobre para obtener un concreto de mejor resistencia a la compresión comparado con un concreto <math>f'c=210</math> kg/cm<sup>2</sup> estándar.</p>				
<p>5.- ¿Cuál será el incremento de</p>	<p>5.- Un concreto con resistencia a la</p>	<p>5.- Determinar el incremento de</p>				



resistencia máximo que aportará la sustitución de agregado fino por escoria de cobre respecto a un concreto patrón con $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ ?	compresión óptima, superior a un concreto patrón $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ , se obtendrá con un porcentaje de sustitución de agregado fino por escoria de cobre de menos del 30%.	resistencia a la compresión del concreto con escoria de cobre en sustitución del agregado fino respecto a un concreto patrón con $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ .				
--	---	--	--	--	--	--

Fuente: Propia.

2. Análisis de costos de producción de concreto estándar con  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$

**Tabla 391: Costo de 1 m<sup>3</sup> de concreto con cemento tipo IP y 100% de AF.**

Rendimiento: 10 m<sup>3</sup>/día  
Unidad: m<sup>3</sup>

	Unidad	Cantidad	Unitario	Parcial	Subtotal
<b>Materiales</b>					
Cemento Portland tipo IP	bls	8,76	23,00	201,48	
Piedra chancada 3/4"	m <sup>3</sup>	0,65	55,00	35,70	
Arena	m <sup>3</sup>	0,26	110,00	28,29	
Agua	m <sup>3</sup>	0,22	10,00	2,23	
Escoria de cobre	kg	231,25	0,20	46,25	
					267,70
<b>Mano de obra</b>					
Peón	hh	6,00	9,50	57,00	
					57,00
<b>Herramientas y equipo</b>					
Mezcladora tipo trompo de media bolsa	hm	1,00	6,25	6,25	
Herramientas manuales	% mo	5,00	19,00	0,95	
					7,20
				<b>Total=</b>	<b>331,90</b>

Fuente: Propia.

**Tabla 392: Costo de 1 m<sup>3</sup> de concreto con cemento tipo V y 100% de AF.**

Rendimiento: 10 m<sup>3</sup>/día  
Unidad: m<sup>3</sup>

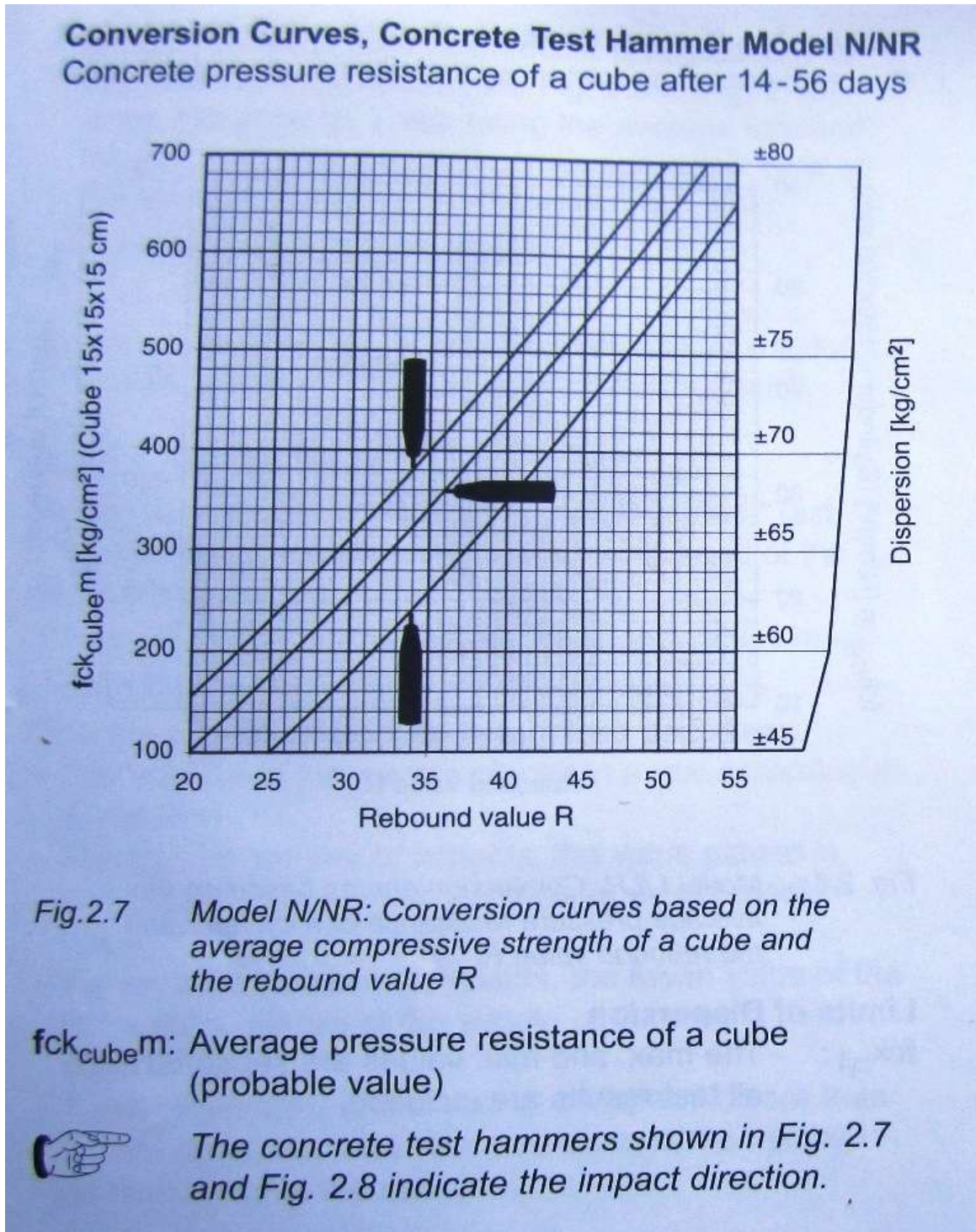
	Unidad	Cantidad	Unitario	Parcial	Subtotal
<b>Materiales</b>					
Cemento Portland tipo V	bls	8,76	23,00	201,48	
Piedra chancada 3/4"	m <sup>3</sup>	0,65	55,00	35,70	
Arena	m <sup>3</sup>	0,27	110,00	29,66	
Agua	m <sup>3</sup>	0,22	10,00	2,24	
Escoria de cobre	kg	242,44	0,20	48,49	
					269,07
<b>Mano de obra</b>					
Peón	hh	6,00	9,50	57,00	
					57,00
<b>Herramientas y equipo</b>					
Mezcladora tipo trompo de media bolsa	hm	1,00	6,25	6,25	
Herramientas manuales	% mo	5,00	19,00	0,95	
					7,20
				<b>Total=</b>	<b>333,27</b>

Fuente: Propia.



## Apéndices

1. Curvas de conversión del esclerómetro Proceq modelo N/NR



Fuente: (Proceq S.A., 2013, pág. 8).