



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación de la influencia de propiedades físicas y morfológicas de agregados livianos, en la microestructura de la Zona de Transición Interfacial (ITZ), en concretos

Paola Vargas Samboni

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y procesos
Medellín, Colombia
2015

Evaluación de la influencia de propiedades físicas y morfológicas de agregados livianos, en la microestructura de la Zona de Transición Interfacial (ITZ), en concretos

Paola Vargas Samboni

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería de Materiales y Procesos

Director:
Ph.D., Jorge Iván Tobón



Grupo del Cemento y Materiales de Construcción

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2015

Dedicatoria

Con todo mi amor infinito, a mi madre, y a mis hermanos.

Nuestras virtudes y nuestros defectos son inseparables, como la fuerza y la materia. Cuando se separan, el hombre deja de existir.

Nikola Tesla

Agradecimientos

A mi madre, mis hermanos Willson, Gilbert y Geraldine, a mi tías Mónica y Consuelo, a ellas por cuidar de mi madre cuando me distanciaba académicamente, a mis primos Ricardo y Edgar, a todos gracias por su apoyo económico y moral, por apoyar mis ideas y proyectos, por nunca criticarlos.

Al profesor Jorge Iván Tobón por creer en mis ideas y guiarme hasta su materialización, sencillo no fue el proceso, gracias por transmitirme un poco de su conocimiento y dedicación, con los cuales he logrado importantes objetivos entre ellos culminar el desarrollo de esta tesis.

Al profesor Oscar Jaime Restrepo por iniciarme al Grupo del Cemento y Materiales de Construcción, por emplearme y estar presto a colaborar en este camino, por enseñarme que un dato es un dato y se convierte en resultado tras un buen análisis.

A mis compañeros del Grupo del Cemento, Andrés Bedoya, Ary Hoyos, Daniel Jiménez, Erika Mejía, Isabel Bolaños, Juan David Cohen, Mónica Bedoya, Natalia Betancur, Natalia Marín, Oscar Mendoza, Ximena Gaviria, Yhan Paul Arias, a todos ellos gracias por su disposición, por ayudarme a formular y concluir certeramente este proyecto, por estar prestos a escuchar mis desahogos y celebrar mis aciertos.

A mi amigo, Alexander Zuleta, por su consejo, por recibirme y gestionar mi estadía en Brasil, siempre presto a escucharme y apoyarme, por dedicar su tiempo hasta en un hospital, gracias amigo, porque aún en la distancia me he sentido abrigada por tu amistad.

A Carlos, por su paciencia, compañía y con su amor cuidar de mí, se necesitan más que resultados para culminar un proyecto a plenitud.

A Sandra Díaz, por brindarme su amistad, su consejo, y no criticar, por validar en mí, valores de amistad, compañerismo y lealtad, en el camino de la investigación se hacen nuevos descubrimientos científicos, así como se encuentran nuevos amigos.

A Martha del laboratorio de Caracterización de Materiales por estar presta a colaborar en esas actividades que no son experimentales pero esenciales para el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros del Departamento de Materiales y Minerales, Juan Carlos Castrillón, Darío Zambrano, Augusto Barros, Luis Tobón, Mery Arrubla, Christian Ocampo, Sebastian Sierra, Luver Echeverry, Dairo Chaverra y Adriana Garcés, por su apoyo y colaboración en el manejo de los equipos de microscopía óptica, por sus ideas para el desarrollo experimental de éste proyecto, o simplemente por compartir un café en su compañía.

Al profesor Roberto Martins, Cristiano Lagatta y demás personal del Laboratório de Fenômenos de Superfície de la Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, gracias por la hospitalidad y colaboración en el desarrollo de la técnica de Nanoindentación.

A todos ustedes gracias, porque apostaron que no me rendiría a medio camino.

Producción asociada a este trabajo

Presentaciones en eventos:

P. Vargas, J. I. Tobón. Effects of the porosity and morphology of lightweight aggregates in the microstructure of the interfacial transition zone (ITZ) in lightweight concretes. Póster en el XIII Encontro da SBPMat, João Pessoa – Brasil, 2014.

P. Vargas, N. Marín , Jorge I. Tobón, Influence of lightweight aggregate on the durability and microstructure of concretes. Póster. XV International Materials Research Congress, Cancún – México 2016

P. Vargas, Jorge I. Tobón. Effect of morphology of Lightweight Aggregates (LWA), in the Interfacial Transition Zone (ITZ) and mechanical properties of concretes. Oral Regular. XV International Materials Research Congress, Cancún – México 2016.

Pasantías:

Escola politécnica da Universidade de São Pablo, Departamento de Engenharia Mecânica. Laboratorio de Fenômenos de Superfície. Agosto a octubre de 2015.

Becas:

Beca del programa nacional de apoyo a estudiantes de posgrado para el fortalecimiento de la investigación, creación e innovación de la Universidad Nacional de Colombia 2014-2015.

Beca excepción derechos académicos Facultad de Minas, 2013.

Proyectos de investigación:

Concretos y cementos versátiles para enfrentar el cambio climático.

Proyecto de la convocatoria del programa nacional de proyectos para el fortalecimiento de la investigación, la creación y la innovación en posgrados de la Universidad Nacional de Colombia 2014-2015.

Evaluación del comportamiento frente al ataque por sulfatos de concretos con agregados livianos de pumita y arcilla expandida.

Proyecto de la convocatoria del programa nacional de proyectos para el fortalecimiento de la investigación, la creación y la innovación en posgrados de la Universidad Nacional de Colombia 2015-2016.

Resumen

Esta investigación estudia las propiedades de densidad y espesor de la microestructura de la zona de transición interfacial (ITZ, por sus siglas en inglés) en concretos de cemento Pórtland y agregados livianos (LWA por su sigla en inglés). Se ha establecido que la microestructura en la ITZ en concretos, depende fuertemente de la naturaleza del agregado, específicamente de su porosidad y absorción de agua. El objetivo de este estudio es investigar la influencia de propiedades físicas como porosidad y morfología de algunos agregados livianos sobre la microestructura de la ITZ, y determinar el efecto que estos factores tienen a su vez sobre propiedades mecánicas como resistencia a compresión de los concretos livianos.

Técnicas de caracterización como DRX, SEM-EDS, FRX, en agregados livianos fueron empleadas para determinar la caracterización química, mineralógica y morfológica; estas técnicas se aplican para estudiar la influencia de la porosidad y morfología de los agregados en la microestructura de la ITZ de concretos livianos.

Sobre probetas de morteros fabricados con agregados livianos y con un agregado convencional se realizó, caracterización de la ITZ con técnicas como SEM-EDS, para evaluar y cuantificar el espesor y densidad de la microestructura de la ITZ, ensayos de módulo de elasticidad en la ITZ y resistencia a compresión, fueron ejecutados para comparar el desempeño de los agregados livianos con un concreto de agregado convencional, y determinar su potencial de uso en la fabricación de concretos livianos.

Palabras clave: agregado liviano, concreto liviano, absorción de agua, microestructura de ITZ, nanoindentación.

Abstract

Aggregates adhesion with cement paste in concrete result to the mechanical combination of the cement hydration products with the aggregate surface and chemical reactions between surface aggregate and cement paste. This bond is an important factor that contribute to achieve mechanical compressive strength in the concrete. Has been identified that the concrete have a region separated between aggregate and cement paste with its features and own structure, this region is called Interfacial Transition Zone (ITZ). The current research study the density and thickness properties of the microstructure (ITZ) in concrete with Portland cement and lightweight aggregates (LWA). The microstructure in the ITZ depends strongly of the aggregate nature, specifically its porosity and water absorption. The objective of this study is investigate the influence of physical properties such as porosity and morphology properties such as surface structure of LWA, changing water cement ratio (W/C) and determine the effect of the factors on the density and thickness formation in the microstructure ITZ and determine the influence on the compressive strength of lightweight concrete (LWC).

The LWA and LWC specimens were characterized by techniques XRD, SEM-EDS, to determine the chemical and mineralogical features to study the influence of porosity and morphology of the aggregates in the microstructure ITZ.

Keywords: Paste cement, lightweight concrete, lightweight aggregate, water absorption, microstructure ITZ, and morphology properties, nanoindentation.

Contenido

Resumen.....	VII
Contenido.....	IX
Lista de figuras.....	XI
Lista de tablas.....	XIV
Introducción.....	1
1. Fundamentación.....	3
1.1 Concretos livianos.....	3
1.1.1 Concretos sin finos (NFC).....	4
1.1.2 Concretos aireados.....	6
1.1.3 Concretos de agregados livianos.....	7
1.2 Agregados livianos naturales.....	14
1.2.1 Pumita o piedra pómez.....	14
1.1.2 Perlita.....	15
1.2.3 Diatomita.....	16
1.2.4 Escorias volcánicas (Lapilli).....	17
1.3 Agregados livianos artificiales.....	18
1.4 Requerimiento de los agregados livianos para producción de concreto.....	18
1.5 Propiedades mineralógicas y mecanismos de reacción de la matriz cementante.....	20
1.6 Mecanismos de interacción entre la matriz de concreto y agregados.....	21
1.6.1 Interacción física.....	21
1.6.2 Interacción físico química.....	21
1.6.3 Entrelazamiento mecánico.....	21
1.7 Estructura de la ITZ entre agregados y pasta de cemento.....	21
1.7.1 Efecto de la adherencia en la resistencia del concreto convencional.....	22
1.8 Antecedentes.....	23
2. Objetivos.....	28
2.1 Objetivo general.....	28

2.2	Objetivos específicos.....	28
2.3	Alcance esperado de la investigación.....	28
3.	Metodología y materiales	29
3.1.	Metodología de investigación	29
3.2	Materiales.....	30
3.3	Diseño de mezclas para concretos livianos y convencional.....	31
3.4	Ejecución de pruebas y ensayos	32
3.4.1	Preparación de concretos livianos.....	33
3.4.2	Preparación de muestras para micrografías y nanoindentación	35
3.5	Equipos	37
4.	Resultados y discusión	39
4.1	Caracterización de materiales	39
4.1.1	Composición mineralógica	39
4.1.2	Composición química.....	42
4.1.3	Caracterización morfológica de agregados	43
4.1.4	Propiedades físicas de los agregados.....	55
4.2	Morfología de la ITZ	59
4.3	Espesor de la ITZ	66
4.4	Resistencia mecánica de concretos.....	77
4.4.1	Resistencia a compresión	77
4.4.2	Módulo de elasticidad	85
5.	Conclusiones	98
	Recomendaciones para trabajos futuros.....	100
6.	Bibliografía.....	101

Lista de figuras

Figura 1. Clasificación de concretos livianos. (Tomado de Martínez, 2010).....	4
Figura 2. Relación resistencia a compresión y densidad de cubos de NFC con varias A/C por volumen. (Tomado de Newman & Owens, 2003)	5
Figura 3. Resistencia a compresión para distintos agregados livianos. (Tomado de Newman & Owens, 2003).....	10
Figura 4. Relación entre conductividad térmica y densidad, (Tomado de Newman & Owens, 2003).....	14
Figura 5. pumita, fuente propia	15
Figura 6. perlita, fuente propia.....	16
Figura 7. diatomita. (Tomado de Zaetang et al, 2003)	17
Figura 8. La pilli. (Tomado de Sánchez et al, 2014).....	17
Figura 10. Representación gráfica de la zona de transición interfacial. Tomado de (Chandra & Berntsson, 2002).	22
Figura 11. Mezcla en estado fresco de concretos livianos	33
Figura 12. Muestras de concreto liviano en estado endurecido	34
Figura 13. Cubo de concreto antes y después de corte.....	35
Figura 14. Embaquelamiento de muestras en cámara de vacío.	36
Figura 15. Muestra pulida tipo espejo para nanoindentación.....	36
Figura 16. Difractograma para agregado liviano pumita	40
Figura 17. Difractograma para agregado liviano perlita	40
Figura 18. Difractograma para agregado liviano aliven.....	41
Figura 19. Difractograma para agregado liviano convencional Conasfaltos.....	41
Figura 20. Curva de gradación de aliven	44
Figura 21. Curva de gradación de perlita.....	44
Figura 22. Curva de gradación de pumita.....	45
Figura 23. Curva de gradación de agregado convencional.....	45
Figura 24. Curva de gradación seleccionada para todos los agregados.....	46
Figura 25. Agregado liviano pumita, A) Escala real, B) Micrografía de Estereoscopio, C) SEM.	47
Figura 26. Agregado liviano perlita A) Escala real, B) Micrografía de Estereoscopio, C) SEM.	47
Figura 27. Agregado liviano aliven. A) Escala real, B) Micrografía Estereoscopio, C) SEM.	47
Figura 28. Agregado convencional, A) Escala real, B) Micrografía Estereoscopio, C) SEM	47
Figura 29. Formas de agregado pumita.....	50

Figura 30. Formas para el agregado perlita	50
Figura 31. Formas para agregado aliven.....	51
Figura 32. Formas para agregado conasfaltos	51
Figura 33. Perfil rugosidad agregado pumita.....	53
Figura 34. Perfil rugosidad agregado perlita.....	53
Figura 35. Perfil rugosidad agregado aliven	54
Figura 36. Perfil rugosidad agregado convencional.....	54
Figura 37. Absorción de agua de agregados después de 24 horas.....	56
Figura 38. Secciones delgadas para toma de micrografías análisis de porosimetría.....	57
Figura 39. Análisis digital de imágenes típicas para porosimetría de pumita.....	58
Figura 40. Análisis digital de imágenes típicas para porosimetría de perlita.....	58
Figura 41. Análisis digital de imágenes típicas para porosimetría de aliven	58
Figura 42. Formación de ITZ a 28 días de curado concreto de pumita.....	59
Figura 43. Formación de ITZ a 28 días de curado concreto de perlita.....	60
Figura 44. Formación de ITZ a 28 días de curado concreto de aliven	60
Figura 45. Formación de ITZ a 28 días de curado concreto de agregado convencional. 61	
Figura 46. Micrografía de ITZ COC5-0.45 a 28 días de curado.....	61
Figura 48. Micrografías de matriz cementante , PEC5-0.35 a 28 días de curado.....	63
Figura 49. Micrografías reactividad puzolánica muestra PEC5-0.35 a 28 días de curado	63
Figura 50. Micrografías reactividad puzolánica muestra POC6-0.45 a 28 días de curado	63
Figura 51. Micrografías de matriz cementante muestra COC5-0.45 a 28 días de curado	64
Figura 52. Morfología de ITZ para concretos C5-0.35.....	64
Figura 53. Morfología de ITZ para concretos C5-0.45.....	65
Figura 54. Morfología de ITZ para concretos C6-0.35.....	65
Figura 55. Morfología de ITZ para concretos C6-0.45.....	66
Figura 56. Micrografía espesores ITZ concreto pumita	67
Figura 57. Micrografía espesores ITZ concreto perlita	68
Figura 58. Micrografía espesores ITZ concreto aliven.....	68
Figura 59. Micrografía espesores ITZ concreto convencional	69
Figura 60. Presencia de bahías en ITZ, concreto pumita a 28 días de curado	69
Figura 61. Presencia de bahías en ITZ, concreto perlita a 28 días de curado	70
Figura 62. Presencia de bahías en ITZ, concreto aliven a 28 días de curado	70
Figura 63. Distribución espesor de la ITZ concreto de pumita a 28 días de curado.....	72
Figura 64. Distribución espesor de la ITZ concreto de perlita a 28 días de curado.....	73
Figura 65. Distribución espesor de la ITZ concreto de aliven a 28 días de curado	73
Figura 66. Distribución espesor de la ITZ concreto convencional a 28 días de curado... 74	
Figura 67. Distribución de espesor de la ITZ concreto a 28 días de curado	74
Figura 68. Distribución de espesor ITZ por tamaño de agregado.....	75
Figura 69. Verificación de supuestos estadísticos para espesor ITZ,	76
Figura 70. Espesor ITZ concretos a 28 días de curado por tipo de mezcla	77
Figura 71. Resistencia a compresión concreto de pumita a 3 y 28 días de curado	78
Figura 72. Resistencia a compresión concreto de perlita a 3 y 28 días de curado	79
Figura 73. Resistencia a compresión concreto de aliven a 3 y 28 días de curado.....	79

Figura 74. Resistencia a compresión concreto convencional a 3 y 28 días de curado versus matriz cementante	80
Figura 75. Resistencia a compresión de concretos livianos a 28 días de curado.....	81
Figura 76. Representación falla en concreto convencional, después de ensayo de resistencia a compresión a 28 días de curado.....	82
Figura 77. Representación falla en concreto liviano, después de ensayo de resistencia a compresión a 28 días de curado.	82
Figura 78. Verificación de supuestos estadísticos para resultados de resistencia a compresión. (Elaborado en Minitab)	84
Figura 79. Resistencia a compresión Vs Espesor de la ITZ.....	85
Figura 80. 3D y perfil de rugosidad zona de ITZ antes de nanoindentaciones.....	86
Figura 81. Selección de área de indentación en muestras de concreto	87
Figura 82. Huella de indentación en ITZ.....	87
Figura 83. Módulo de elasticidad para concretos a 28 días de curado	89
Figura 84. Módulo de elasticidad para concretos a 28 días de curado por tipo de agregado.	91
Figura 85. Mapa de contorno de matriz de indentaciones, concreto de pumita.....	92
Figura 86. Mapa de contorno de matriz de indentaciones, concreto de perlita	92
Figura 87. Mapa de contorno de matriz de indentaciones, concreto de aliven	93
Figura 88. Mapa de contorno de matriz de indentaciones, concreto convencional	93
Figura 89. Verificación de supuestos estadísticos para resultados de resistencia a compresión. (Elaborado en Minitab)	96
Figura 90. Módulo de elasticidad vs Resistencia a compresión	97
Figura 91. Módulo de elasticidad vs Espesor de la ITZ.....	97

Lista de tablas

Tabla 1: Propiedades típicas de NFC. (Tomado de Chandra & Berntsson 2002)	4
Tabla 2. Características de concretos espumoso. (Tomando de Newman & Owens, 2003)	6
Tabla 3. Propiedades de concretos aireados en autoclave. (Tomando de Newman & Owens, 2003)	7
Tabla 4. Propiedades de concretos espumosos. (Tomando de Newman & Owens, 2003)	7
Tabla 5. Clasificación de concretos livianos. (Tomando de Newman & Owens, 2003)	8
Tabla 6. Propiedades de agregados livianos. (Tomado de Newman & Owens, 2003).....	8
Tabla 7. Comportamiento mecánico concreto versus densidad. (Tomado de Sari & Pasamehmetoglu, 2002)	11
Tabla 8. Permeabilidad de concretos livianos. (Tomado de Newman & Owens, 2003) ...	12
Tabla 9. Clasificación poros. (Tomado de Molina et al, 2008)	13
Tabla 10. Requisitos de agregados livianos para producción de concreto. (Tomado de ASTM C 330)	19
Tabla 11. Requisitos de gradación para agregados livianos para concreto estructural. (Tomado de ASTM C 330)	20
Tabla 12. Resumen de etapas y actividades metodológicas.	30
Tabla 13. Materiales	30
Tabla 14: Factores y niveles diseño factorial.....	31
Tabla 15. Corrida diseño factorial.....	32
Tabla 16. Diseño de mezclas concretos livianos agregado Aliven	34
Tabla 17. Composición mineralógica	42
Tabla 18. Composición química mediante FRX.....	43
Tabla 19. Índice de forma y textura	49
Tabla 20. Área superficial agregados.....	52
Tabla 21. Densidad y absorción.....	55
Tabla 22. Porcentaje de porosimetría por área de agregados livianos	57
Tabla 23. Rangos de espesor ITZ.....	72
Tabla 24. Resumen resultados de ANOVA para espesor de ITZ	76
Tabla 25. Resistencia a compresión pasta de cemento	80
Tabla 26. Resumen resultados de ANOVA para Resistencia	83
Tabla 27. Promedios espesor ITZ, resistencia a compresión a 28 días y módulos de elasticidad de concretos.....	90
Tabla 28. Rangos de Módulo de Elasticidad para ITZ y Matriz.....	94
Tabla 29. Resumen resultados de ANOVA para Módulo de Elasticidad.....	95

Introducción

El concreto es un material compuesto principalmente por agregado grueso y fino incrustado en una matriz de pasta de cemento. Por lo tanto el comportamiento mecánico y la durabilidad del concreto se ven afectada por el agregado, la pasta de cemento y por la adherencia entre estos dos. La adherencia está controlada por la zona de transición interfacial (ITZ, por su sigla en inglés) entre ellos.

El concreto es un material durable, resistente al fuego y a la intemperie; muy versátil, y puede adoptar cualquier forma, dependiendo de la formaleta usada. Posee resistencias a compresión con valores típicos en el país entre 21-35 Mpa. Sin embargo, se producen actualmente concretos de alta resistencia con valores de resistencia hasta de 120 Mpa. Martínez, 2010.

Los concretos livianos son aquellos que tienen una densidad en estado seco entre 1680 y 1920 kg/m³ y una resistencia a compresión mínima de 17,2 MPa (ACI 213R). Debido a las exigencias de los proyectos de infraestructura el concreto liviano es usado en elementos secundarios de las edificaciones que requieran reducir las cargas muertas, en divisiones, losas, muros, capas de nivelación que no soporten cargas estructurales. Así este tipo de concretos en las últimas décadas ha sido desarrollado para ser competente con los concretos convencionales de densidad normal.

El desarrollo de concretos livianos de alta resistencia ha llevado a investigadores, al estudio de su ITZ. (Y. Lo et al 1999, Dale P. Bentz, 2009; Mustafa Ayhan et al 2011; Lijuan Kong et al, 2014, entre otros).

En 1990 Zhang & Giorv, postulan que los mecanismos responsables de la formación de la ITZ están relacionados con la absorción y liberación de agua, característica propia de los agregados livianos (LWA, por su sigla en inglés) debido a la porosidad, estos poseen mayor absorción, aumentando el grado de hidratación de la pasta alrededor del agregado, logrando que la pasta adyacente desarrolle una estructura con mayor porosidad. A menudo se supone que los LWA utilizados en la fabricación de concretos tienen menos reactividad química y su interacción con la matriz de cemento es principalmente física, por tanto a la influencia química de los LWA en las propiedades de la ITZ se les ha prestado poca atención.

Autores como Wasserman y Bentur en 1996; denotan que tanto las interacciones físicas y químicas que se da entre los LWA y la pasta de cemento son responsables de la resistencia mecánica de la ITZ. Algunos estudios han demostrado que la absorción de agua y el grado de pre humectación de LWA pueden influir en el proceso de formación de la interfaz física,

(Ge Y, et al 2009; Lo, Y et al 1999); sin embargo, se requieren más investigaciones para entender completamente el proceso químico y físico entre los LWA y pasta de cemento, que depende de la composición mineralógica, cantidad de fases puzolánicas, y de la edad de curado.

De acuerdo con lo descrito en los párrafos anteriores, es necesario continuar y contribuir con el estudio de la incidencia de los agregados livianos en la formación de la microestructura de la ITZ en los concretos livianos, para mejorar el comportamiento mecánico, como la resistencia a compresión, para lo cual esta investigación tiene como objetivo “Estudiar el efecto de los agregados livianos sobre el espesor y densidad de la microestructura de la zona de transición interfacial (ITZ) en concretos livianos y compararla con la ITZ de concretos convencionales”.

En el desarrollo de este estudio se realizaron probetas de un concreto de agregado convencional de peso normal, y agregados livianos. Se evaluó el espesor de la ITZ mediante microscopía óptica, la resistencia a compresión y se valoró el módulo de elasticidad de la ITZ de los concretos livianos, todo con el fin de evaluar la incidencia de la absorción de agua, densidad y morfología de los agregados sobre la formación de la microestructura de la ITZ.

El desarrollo de este proyecto permite avanzar en el estudio de la microestructura de la ITZ de concretos livianos, donde se ha reconocido un efecto positivo de éstos sobre las propiedades químicas y de entrelazamiento mecánico entre los agregados livianos y las matrices de cemento pórtland. Contribuyendo al estudio global de concretos livianos de alta resistencia.

Países en Latinoamérica como Venezuela, Argentina y Brasil, desde hace algunos años desarrollan esta tecnología de concretos de LWA en su medio de producción de concreto local, en Colombia, no se ha producido de forma industrial concreto liviano a base de LWA, a pesar de la existencia de unidades de roca con potencialidad para suministrar materias primas tipo LWA, (Maya, 2006).

La producción convencional de cemento genera un alto consumo energético e importantes emisiones de CO₂ generadas en su proceso convencional de síntesis, dependiendo del tipo de planta, las cuales corresponden a cifras entre 0.62 y 0.97 toneladas de CO₂ por cada tonelada de cemento que se produce, (Restrepo et al 2012).

Enmarcado en un contexto global lograr un menor consumo de concreto a través del concreto liviano, permite reducir las emisiones de dióxido de carbono al ambiente. Esto se puede lograr a partir de reducir el consumo de cemento, al reducir el volumen de concreto mediante las dosificaciones por volumen de las mezclas de concreto liviano, se reduce el volumen de pasta cementante debido a las bajas densidades de los agregados livianos los cuales ocuparán mayor volumen por metro cúbico en las mezcla.

La contribución de este proyecto a las líneas de investigación del Grupo del Cemento y Materiales de Construcción, abre un espacio para el estudio del efecto de las propiedades de los agregados livianos sobre los productos de hidratación del cemento, donde se han realizado varias investigaciones asociadas al mejoramiento de la pasta cementante.

1. Fundamentación

El concreto es un material compuesto de agregados finos y gruesos, con una distribución de granulometría, y composición mineralógica variable, incrustado en una matriz de pasta de cemento hidratado (HCP). La matriz endurecida en sí se deriva de reacciones de hidratación entre el material cementante y el agua. Sin embargo, además del material cementante agua, y agregados, los concretos modernos contienen generalmente aditivos químicos, materiales puzolánicos, tales como cenizas volantes, humo de sílice, o escoria de alto horno; fibras de acero, vidrio, materiales sintéticos o fibras naturales.

Sánchez de Guzmán, (2002), define a los agregados o áridos como “aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento Portland en presencia de agua conforman un todo compacto (piedra artificial) conocido como concreto u hormigón”.

1.1 Concretos livianos

El uso de concreto con agregados livianos (LWAC) se remonta a épocas tan tempranas como 3000 AC, cuando se construyeron las famosas ciudades de Mohenjo-Daro y Harappa durante la civilización del valle del Indo. En Europa, el uso del LWAC ocurrió hace unos dos mil años, cuando los romanos construyeron el Panteón, los acueductos, y el Coliseo en Roma. Es interesante notar que la piedra pómez se sigue utilizando hoy en día como un agregado para el concreto liviano en algunos países como Alemania, Italia, España, Turquía, Grecia, Islandia y Japón. En algunos lugares, como Malasia, conchas de aceite de palma se utilizan para la fabricación de hormigón de áridos ligeros. (Chandra & Berntsson, 2002).

La ACI 213R-03 menciona que los concretos livianos estructurales son aquellos que tienen una densidad en estado seco entre 1680 y 1920 kg/m³ y una resistencia a compresión mínima de 17,2 MPa, y es variable debido a las especificaciones y resistencias deseadas por el proyecto. Por tanto esta clasificación se puede subdividir en varios grupos

Densidad de 300 a 800 kg/m³: Son concretos livianos con alto poder de aislamiento térmico pero con moderada resistencia mecánica.

Densidad de 800 a 1200 kg/m³: Son concretos livianos de mediano poder de aislamiento térmico pero con resistencia mecánica de tipo medio.

Densidad de 1200 a 1800 kg/m³: Son concretos livianos de mayor resistencia a la compresión con limitado poder aislante de calor.

Las principales técnicas utilizadas para la producción de concretos livianos se pueden subdividir en tres subgrupos, entre los cuales se encuentran los concretos livianos sin finos, los concretos de agregados de peso liviano y los concretos livianos aireados o celulares. (Figura 1).

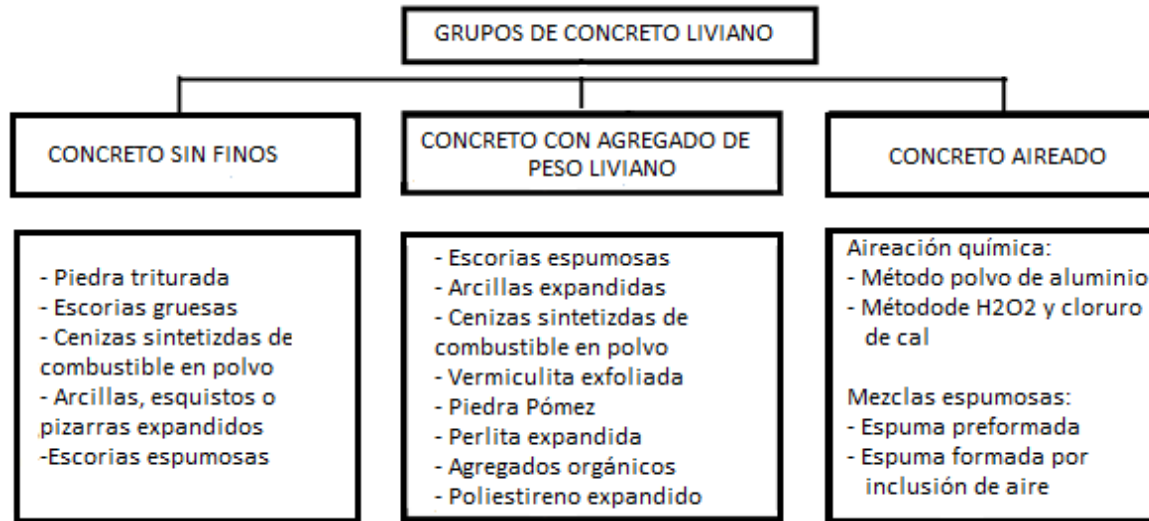


Figura 1. Clasificación de concretos livianos. (Tomado de Martínez, 2010)

1.1.1 Concretos sin finos (NFC)

Esta mezcla es constituida por agregado grueso, cemento y agua, prescindiendo parcial o totalmente del agregado fino. Los huecos están interconectados para producir concretos de textura abierta porosa con reducida densidad y resistencia a compresión. Por tratarse de concretos a partir de agregados livianos gruesos, carecen de agregados finos, una gradación de agregado carente de finos, tiene como resultado una mezcla de estructura porosa.

Estos tipos de concretos están compuestos por agregado grueso normal, con una densidad que fluctúa entre 1600 y 2000 kg/m³, donde el tamaño de las partículas está limitado entre 9.5 y 19 mm, evitándose material menor de 4.76 mm. La resistencia varía entre 14 y 141 kg/m² y la relación agua-cemento está comprendida en un rango de 0.38 a 0.52.

Propiedades NFC

Densidad: La Tabla 1 muestra las propiedades típicas de NFC hechos con agregados de peso normal y agregados livianos.

Tabla 1: Propiedades típicas de NFC. (Tomado de Chandra & Berntsson 2002)

Ítem	Agregado normal	Agregado liviano
Agregado/Cemento (por masa)	6 - 10	3 - 8
Relación Agua/Cemento (por masa)	0.38 - 0.45	0.38 - 0.45
Densidad seca (kg/m ³)	1200 - 1900	800 - 1400
Resistencia en cubos (MPa)	3 - 7	3 - 7

Resistencia a compresión: Para un determinado tipo de agregado, la resistencia a compresión depende principalmente de la densidad que, a su vez, se rige principalmente por el contenido de cemento y por la A/C. La Figura 2, muestra la relación entre la resistencia a compresión y la densidad de concretos elaborados con agregados de peso normal y livianos celulares. La resistencia aumenta con la densidad y esta con el contenido de cemento y a menor A/C.

Resistencia a la tracción: La resistencia a la flexión es de aproximadamente 30 por ciento de la resistencia a la compresión (Malhotra, 1976), que es una proporción más alta que para el concreto normal. Encontrando que en el concreto celular logra ser de 12 %, 23 % y 19 %, la resistencia del concreto a 28 días.

Módulo de elasticidad (E): En cuanto al concreto normal, se ha encontrado que E aumenta en cuanto la resistencia del concreto celular aumenta, se encontró un valor de E de 10 GPa para una resistencia de 8 MPa, para el caso de la de los datos de la Figura 2, (Malhotra, 1976).

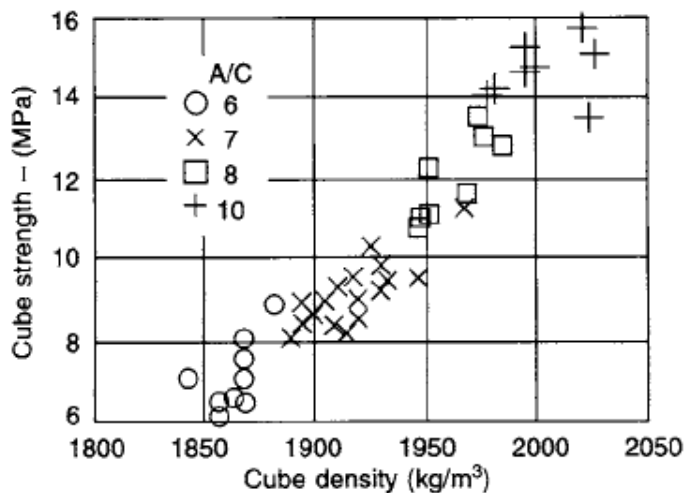


Figura 2. Relación resistencia a compresión y densidad de cubos de NFC con varias A/C por volumen. (Tomado de Newman & Owens, 2003)

Conductividad térmica: El coeficiente de conductividad térmica de NFC es de entre 0,69 y 0,94 J / m²s, para concretos de agregado de peso normal alrededor de 0,22 J / m²s para concretos de agregados livianos. En cuanto al concreto convencional (agregados gruesos y finos) el coeficiente aumenta con el contenido de humedad.

Penetrabilidad: NFC con agregado denso puede absorber hasta un 12 por ciento de agua en masa, pero en condiciones normales de absorción es de aproximadamente una quinta parte de este valor. NFC no está sujeto a la acción capilar importante, siendo dependiente el tamaño nominal del agregado. Los poros grandes del NFC permiten que drene el agua.

1.1.2 Concretos aireados

Se caracterizan porque dentro del concreto se introducen intencionalmente burbujas de un gas (oxígeno, aire, hidrógeno, espuma) para obtener elementos livianos, lo cual desemboca en un material de estructura celular. Se subdividen principalmente en dos tipos, llamados aireados o espumosos. (Newman & Owens, 2003)

Concreto con gas: Este tipo de concreto se produce por reacción química y se incorpora en el concreto fresco burbuja, a partir de la reacción del cemento portland, con polvo de aluminio, en una proporción del orden del 0.2 % del peso del cemento. La reacción del polvo activo con hidróxido de calcio o álcali libera hidrógeno, que forma las burbujas; también puede emplearse una aleación de zinc en polvo o aluminio y algunas veces se emplea peróxido de hidrógeno, que genera oxígeno.

Las burbujas de gas expanden la mezcla a la densidad requerida después de la cual el concreto se cura ya sea en vapor a presión atmosférica o en vapor de agua a 180 °C bajo alta presión en un autoclave. Refuerzo pre esforzado puede ser incluido en las unidades que se cortan al tamaño deseado después del curado. El concreto celular curado en autoclave tiene mejor resistencia, estabilidad de volumen y durabilidad.

Concreto espumoso: Se produce por la adición de un agente espumante a la mezcla, que introduce y estabiliza las burbujas de aire durante el mezclado a alta velocidad. El concreto aireado puede contener o no agregado. Las mezclas más comunes tienen densidades entre 500 y 1400 kg/m³. La resistencia a la compresión en este mismo intervalo corresponde a valores de 30 a 141 kg/cm². Normalmente el módulo de elasticidad de un concreto aireado es de 1.8x10⁴ a 3.5x10⁴ kg/cm². Mezclas de algunos concretos espumosos se dan en la Tabla 2, en el cual la formación de burbujas por volumen están desde el 39% hasta 72%, se usó arena y ceniza volante (PFA) como filler. La mejor resistencia de estos concretos espumosos se da al disminuir el volumen de poros de la mezcla y aumentar el contenido de cemento en la mezcla, el uso de filler de PFA mejora la mineralogía de la pasta cementante debido a la reactividad puzolánica de las PFA.

Tabla 2. Características de concretos espumoso. (Tomando de Newman & Owens, 2003)

Densidad húmeda (kg/m ³)	500	525	600	1200	1200
Contenido de cemento (kg/m ³)	160	340	340	340	340
Volumen de poros	72	73	69	44	39
Tipo de filler	PFA	-	Arena	Arena	PFA
Contenido de filler (kg/m ³)	160	0			
Resistencia a compresión 28 días (MPa)	1.0	2.0	2.0	6.0	7.5
Resistencia a compresión 91 días (MPa)	1.4	2.2	2.2	7.0	10.0

Propiedades de los concretos aireados curados en autoclave

Métodos para las pruebas en autoclave de concreto celular se dan en la publicación RILEM, 78-MCA (1993). La determinación de la densidad en seco, resistencia a la

compresión, resistencia a la flexión, la contracción y módulo de elasticidad (E), se describe en BS EN 678, 679, 680, 1351 y 1352, respectivamente. Las propiedades típicas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades de concretos aireados en autoclave. (Tomando de Newman & Owens, 2003)

Densidad seca (kg/m ³)	Resistencia compresión (MPa)	Resistencia a Flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Conductividad térmica (3% humedad) (W/mK)
450	3.2	0.65	1.6	0.12
525	4.0	0.75	2.0	0.14
600	4.5	0.85	2.4	0.16
675	6.3	1.0	2.5	0.18
750	7.5	1.25	2.7	0.20

Propiedades de los concretos espumosos

Algunas propiedades típicas de los concretos espumosos se dan en la Tabla 4, en la cual para distintas densidades que van desde 400 a 1600 kg/m³, el comportamiento de la conductividad térmica aumenta al aumentar la densidad del concreto, propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad están intrínsecamente ligados a la densidad del concreto, y aumentan al aumentar la densidad.

Tabla 4. Propiedades de concretos espumosos. (Tomando de Newman & Owens, 2003)

Densidad seca (kg/m ³)	Resistencia compresión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Conductividad térmica (3% humedad) (W/mK)
400	0.5 – 1.0	0.8 – 1.0	0.10
600	1.0 – 1.5	1.0 – 1.5	0.11
800	1.5 – 2.0	2.0 – 2.5	0.17 – 0.23
1000	2.5 – 3.0	2.5 – 3.0	0.23 – 0.30
1200	4.5 – 5.5	3.5 – 4.0	0.38 -0.42
1400	6.0 – 8.0	5.0 – 6.0	0.50 – 0.55
1600	7.5 – 10.0	10.0 – 12.0	0.62 – 0.66

1.1.3 Concretos de agregados livianos

Existen muchos tipos diferentes de agregados, con la particularidad de que son livianos pero porosos, las características más importantes de esta clase de concreto, corresponde

a que según al tipo de agregado que se use, la Tabla 5 muestra la clasificación dada por RILEM en 1978.

La mayoría de los agregados livianos tienen absorción rápida y elevada de agua, lo cual disminuye su propiedad de aislamiento térmico, por lo que se recomienda impermeabilizar el material con un recubrimiento bituminoso. Si se utilizan estos componentes en concreto reforzado, es importante proteger el acero de refuerzo contra la corrosión (cuyo riesgo es el doble en comparación con un agregado normal).

Tabla 5. Clasificación de concretos livianos. (Tomando de Newman & Owens, 2003)

Propiedad	Clase y tipo		
	I Estructural	II Estructural - Aislante	III Aislante
Resistencia compresión (MPa)	> 15.0	> 3.5	> 0.5
Conductividad térmica (3% humedad) (W/mK)	–	< 0.75	< 0.3
Densidad (kg/m ³)	1600 – 2000	< 1600	<< 1450

Propiedades de agregados livianos para concreto estructural

Algunas propiedades típicas de agregados livianos se muestran en la Tabla 6. Estas deben ser comparadas con las propiedades los agregados densos que tienen una densidad aparente suelta seca en el rango 1200 - 1.900 kg/m³ (extra denso hasta 2600 kg/m³) y una absorción de agua de aproximadamente 0,5 a 2%. Los agregados livianos son fabricados generalmente libres de productos químicos nocivos que generen reacciones perjudiciales. Sin embargo, deben ser revisados por el contenido de carbono (pérdida por ignición ~4%) y sulfatos (SO₃ ~1%).

Tabla 6. Propiedades de agregados livianos. (Tomado de Newman & Owens, 2003)

Tipo de agregado	Forma	Absorción de agua (%)	Densidad aparente suelta (kg/m ³)
Arcilla expandida	Redondeada	12 – 14	350 – 500
Pizarra expandida	Angular/irregular	10 – 15	560 – 720
Esquisto expandido	Redondeada	12 – 14	500 – 800
Pumita	Angular/irregular	30 – 40	500 – 800
Ceniza volante (PFA), calcinada	Redondeada	9 – 15	800 – 850

Estado fresco concreto de agregados livianos

La absorción de agua de los agregados, ya sea natural o fabricado, se produce a una velocidad que disminuye con el tiempo. Tal absorción es importante para el agregado insaturado o parcialmente saturado que influirá en las propiedades del concreto fresco como trabajabilidad (incluyendo la capacidad de bombeo) y la densidad, que afectan las propiedades del concreto endurecido como la densidad, aislamiento térmico, resistencia al fuego y resistencia a ciclos de congelación / descongelación.

Para una partícula de agregado la cantidad de agua absorbida y la tasa de absorción dependen principalmente del volumen de poros, la distribución de los poros dentro de la partícula y la estructura de los poros (si están interconectados).

La absorción de agua de los agregados se expresa generalmente como la proporción de la masa seca al horno y la masa del agregado luego de ser sumergido durante 24 h. Para agregados livianos el valor está dentro del intervalo 5 – 45 % de la masa seca en comparación con aproximadamente 0.5 – 2% de los agregados convencionales de mayor densidad.

Los procesos de compactación y el curado no son diferentes en el concreto liviano, este es más tolerante con los procesos de curado debido a la reserva de agua contenida dentro de las partículas de agregado, debe tenerse en cuenta que en algunos casos debido a la baja densidad de los agregados estos tienden a flotar en la mezcla de concreto.

Densidad: La densidad secada al horno de concretos livianos puede variar desde aproximadamente 1200 a 2.000 kg/m³ en comparación con 2300 hasta 2500 kg/m³ de los concretos de peso normal. El comportamiento del concreto liviano está estrechamente relacionada con su densidad, y esta con la resistencia y durabilidad, los factores que influyen la densidad del concreto son:

- Contenido de cemento: Un aumento de 100 kg/m³ en el cemento da aproximadamente 50 kg/m³ aumento de la densidad del concreto.
- Densidad relativa de los agregados: Una sustitución de peso de agregado liviano por agregado fino de peso normal aumenta la densidad aproximadamente de 150-200 kg/m³.
- Contenido de humedad de los agregados: Un concreto fabricado con agregados saturado o parcialmente saturado tendrá una densidad mayor en estado fresco

Se sugiere que la densidad del concreto en estado fresco se utilice como base para la comparación.

Resistencia a compresión: Entre los factores que afectan a la resistencia se incluyen:

- La rigidez de las partículas de agregado

Partículas más débiles requieren morteros más fuertes y por lo tanto mayores contenidos de cemento. La resistencia límite del concreto depende del tipo de agregado. Una excelente unión entre las partículas y la matriz y la similitud del módulo de elasticidad de las partículas de agregado con el módulo E de la matriz, aseguran un comportamiento eficiente de la matriz.

- Relación Agua/Cemento (a/c)

La a/c tiene el mismo efecto sobre la resistencia en los concretos livianos como en los concretos de peso normal. Sin embargo, la reducción de a/c libre debido a la absorción de agua de agregado liviano es difícil de predecir y por lo tanto la especificación de la relación efectiva de a/c para las mezclas no es posible, ya que es difícil de medir y verificar. Contenidos de agua libre son los mismos que para el concreto de peso normal (180-200 L/m³), pero absorción del agregado requiere altos contenidos totales de agua (por ejemplo 250 a 300 L/m³).

- Contenido de cemento

Para una trabajabilidad dada, la resistencia aumenta con el contenido de cemento, el incremento depende del tipo de agregado utilizado, generalmente, se requieren mayores contenidos de cemento que para el concreto de peso normal. En promedio un aumento de cemento del 10% dará aproximadamente un aumento del 5% de resistencia. En la Figura 3 se muestra el comportamiento de distintos agregados livianos para resistencia a compresión.

- Edad de curado

Relaciones con la edad y la resistencia son similares a las del concreto de peso normal. Si el concreto se seca la hidratación termina, El concreto de agregado liviano es más tolerable al mal curado, debido a la reserva de agua disponible en los poros de los agregados.

- Densidad

La densidad del concreto compactado se ve afectada principalmente por la densidad de partícula de agregado que está relacionada con la porosidad de las partículas y, por tanto, la resistencia de las partículas. Por lo tanto, los agregados de diferente densidad darán lugar a diferentes resistencias del concreto, así como diferentes densidades.

El comportamiento de la resistencia a compresión de los concretos livianos visto desde las distintas densidades para algunos agregados livianos se representa en la Tabla 7.

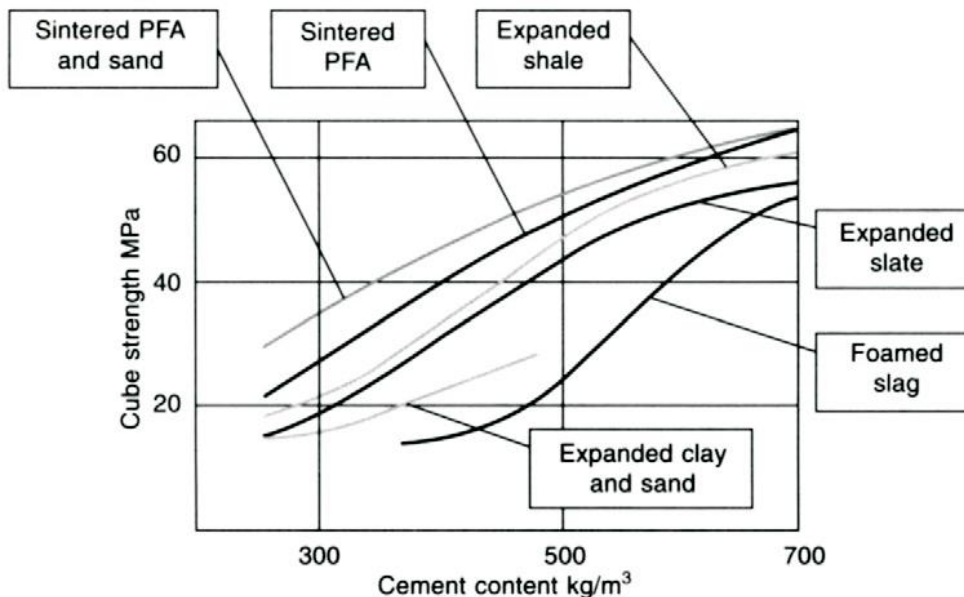


Figura 3. Resistencia a compresión para distintos agregados livianos. (Tomado de Newman & Owens, 2003)

Tabla 7. Comportamiento mecánico concreto versus densidad. (Tomado y modificado de Sari & Pasamehmetoglu, 2002)

Propiedad	Concreto liviano								
	Resistencia baja			Resistencia media			Estructural		
Densidad (kg/m ³)	250	500	750	1000	1250	1400	1500	1750	2000
Resistencia compresión (MPa)	0,7 – 2			2 – 14			17 – 41		
Agregado	Vermiculita		Pumita			Ceniza volante			
	Perlita		Escoria			Arcilla expandida			
	Concreto aireado								

Resistencia a la tracción: Los factores que influyen en la resistencia a la compresión también influyen en la resistencia a la tracción. Las principales diferencias entre el concreto de agregado liviano y concreto de peso normal se deben a:

- Ruta de fractura

Esto normalmente viaja a través de, en lugar de alrededor, de las partículas de agregado liviano.

- Contenido total de agua

Para el concreto de agregado liviano debido a que la absorción del agregado es más alta que en un concreto de peso normal, en situaciones de secado, mayores gradientes de humedad pueden causar reducción de la resistencia a la tracción, aunque este efecto es algo aliviado por los efectos de aumento de la hidratación.

Módulo de elasticidad (E): Para cualquier concreto su rigidez depende de la rigidez de los diferentes constituyentes y sus proporciones volumétricas relativas en la mezcla. Simplificando el concreto como un material de dos fases que consiste en partículas de agregado grueso embebidas en una matriz de mortero, el valor del módulo E del material compuesto disminuirá con:

- Una disminución de la rigidez del mortero que, a su vez, depende de las proporciones de volumen de cemento, agua y agregado fino y el tipo de agregado fino y
- Una disminución en la rigidez del agregado grueso, los módulos de las partículas de agregados livianos son generalmente más bajos que los de los agregados densos naturales. (Chandra y Berntsson, 2002).

Cabe señalar que aunque el valor de E del concreto no está directamente relacionado con la resistencia y densidad. Los valores bajos para E darán lugar a un aumento de las deformaciones para los elementos estructurales bajo una carga dada, aunque el efecto se reducirá por la disminución de las cargas muertas de los mismos elementos de concreto liviano. Sin embargo, bajo condiciones dinámicas como el impacto o la variación de la carga, una reducción en la rigidez del elemento estructural puede ser beneficioso.

Para una condición de carga en equilibrio de un concreto, las diferencias del esfuerzo entre el agregado y la pasta de cemento, y la ITZ pueden estar relacionados con la discrepancia del módulo de elasticidad y módulo de cizallamiento. Esto presenta el fenómeno de concentración de tensiones entre dos componentes con diferentes módulos (Agregado y matriz cementante). De hecho, la ITZ sirve como un puente entre la partícula de agregado y la pasta de cemento. Incluso cuando los componentes individuales son de alta rigidez, la

rigidez del hormigón puede ser baja debido al efecto del puente roto que no permite la transferencia de carga. Lee & Cohen, (1998).

Durabilidad

- **Resistencia ataque químico:** Algunos de los agregados livianos son estables ya que son productos sinterizados aproximadamente a 1200 °C y no reaccionan perjudicialmente con los álcalis u otros agentes químicos en la pasta de cemento. Sin embargo, la mayoría de los grados estructurales de concreto de agregados livianos se hacen con agregados finos densos y estos deben ser revisados para su posible reactividad. Además, la matriz tiene una baja A/C libre y mayor contenido de cemento logrando más densa la microestructura de la pasta que rodea el agregado liviano, lo que hace que sea difícil para el ion sulfato la entrada en el interior del mortero. (Elsharief et al 2005).

- **Resistencia a la abrasión:** Al igual que el concreto de peso normal, la resistencia a la abrasión aumenta con la resistencia a la compresión. (ACI 213 R). Sin embargo, si la matriz del concreto liviano se desgasta y se logran exponer partículas de agregado liviano, se deteriora con relativa rapidez. La resistencia puede ser mejorada mediante la combinación agregado grueso de baja densidad con un agregado fino natural y con el uso de tratamientos de superficie.

- **Permeabilidad:** Permeabilidad o, más correctamente, la penetrabilidad es el principal factor que influye en la durabilidad del concreto, sin embargo, la porosidad y la permeabilidad no son sinónimos ya que el tamaño de los poros y su continuidad se debe tomar en consideración.

El concreto de agregado liviano no es necesariamente más permeable que el concreto de peso normal, los agregados livianos porosos están rodeados por una matriz que es menos agrietada por efecto de (a) unión matriz agregada, debido a las características superficiales de las partículas de agregado y a la acción puzolánica entre el agregado y la matriz, (b) el aumento de hidratación del cemento debido a la mejora del curado y (c) menos calor de hidratación. (Newman & Owens, 2003)

En la Tabla 8, se muestran pruebas para concretos livianos y de peso normal, tanto la permeabilidad al agua como al oxígeno son menores para los concretos de agregados livianos de arcillas expandidas, y PFA sinterizadas.

Tabla 8. Permeabilidad de concretos livianos. (Tomado de Newman & Owens, 2003)

Tipo de agregado	Resistividad (Ohm-m)	Permeabilidad agua ($10^{-12}m^2$)	Permeabilidad oxígeno($10^{-16}m^2$)
Arcilla expandida (Reino Unido)	650	5	0.5
Ceniza volante (PFA), calcinada	350	5	0.4
Arcilla expandida (Alemania)	600	15	0.4
Granito	500	85	1.0

* La permeabilidad está en unidades a partir de la ecuación Katz-Thompson.

Dicha resistencia a la penetración de agua y de gas de oxígeno son debidas a la porosidad del agregado liviano usado tanto en la superficie como en la estructura y a la interconexión

de la porosidad de los agregados, a la porosidad de la ITZ y matriz, en el caso de la PFA, mejora la porosidad de la matriz y de la ITZ, reduciendo la permeabilidad al agua.

La permeabilidad en los concretos está ligada al tamaño de poros, la Tabla 9, muestra la clasificación del tamaño de poros en concretos, dada por distintos autores.

Tabla 9. Clasificación poros. (Tomado de Molina et al, 2008)

IUPAC		P.Metha, 1986		S.Mindess, 2002		Efecto
Nombre	Tamaño	Nombre	Tamaño	Nombre	Tamaño	
Microporos	< 2nm	Espacio interparticular entre láminas de CSH	1–3 nm	Microporo intercapa	> 0.5 nm	Retracción y fluencia
				Microporos	0.5–2.5 nm	Retracción y fluencia
				Capilares pequeños (gel)	2.5–10 nm	Retracción
Mesoporos	2–50 nm	Poros capilares (A/C baja)	10 – 50 nm	Capilares medianos	10–50 nm	Resistencia, permeabilidad y contracción
Macroporos	> 50 nm	Poros capilares	3–50 μm	Capilares grandes	50 nm – 10 μm	Resistencia, permeabilidad
		Aire atrapado	50 μm –1 mm	Aire atrapado	0.1–1 mm	Resistencia

• **Carbonatación:** La carbonatación es la reacción entre el dióxido de carbono en la atmósfera, la humedad y los minerales presentes en la pasta de cemento. Esta reacción reduce la alcalinidad del hormigón y puede conducir a la contracción; pero, más importante aún, si llega al acero de refuerzo, puede promover los procesos de corrosión. (Chandra y Berntsson, 2002).

La mayoría de las partículas de agregado liviano son más poroso y penetrable, permitirán más difusión de gases como el dióxido de carbono. Sin embargo, si las partículas de agregado liviano están bien distribuidos en una matriz de buena calidad la tasa de carbonatación debería ser similar a la del concreto de peso normal. Por lo tanto, es esencial para asegurarse que no existen caminos continuos a través de las partículas entre la superficie y el refuerzo. La profundidad de carbonatación disminuye con un aumento del contenido de cemento y con el uso de agregados finos de peso normal.

• **Corrosión de acero:** El mayor contenido de cemento en el concreto liviano proporciona un ambiente altamente alcalino para inhibir la corrosión. Esto, junto con el aumento de la probabilidad de lograr una buena compactación, reduce el riesgo de corrosión. Sin embargo, bajos contenidos de cemento (menos de 300 kg/m³) pueden conducir a la corrosión temprana (Zhang & Gjorv, 1991).

Conductividad térmica: Aire en la estructura celular de concretos livianos estructurales reduce la tasa de transferencia de calor en comparación con la de agregados de densidad normal. Así, la inclusión de agregado liviano dentro de una matriz cementante reduce la conductividad térmica. Por esta razón las buenas propiedades térmicas de los hormigones ligeros se han utilizado ampliamente para mejorar el aislamiento térmico en edificios y estructuras. Las conductividades varían debido principalmente a la densidad del concreto, tipo de agregado y contenido de humedad. (ACI 213 R).

Para hormigones, ya sea de peso ligero o normal, se dan valores de conductividad para densidades de 400 a 2400 kg/m³ y contenidos de humedad de 3% (ambientes protegidos) y 5% (entornos expuestos). En la Figura 4. Relación entre conductividad térmica y densidad, (Tomado de Newman & Owens, 2003), donde k es la conductividad térmica, c es una constante y ρ es la densidad aparente en seco.

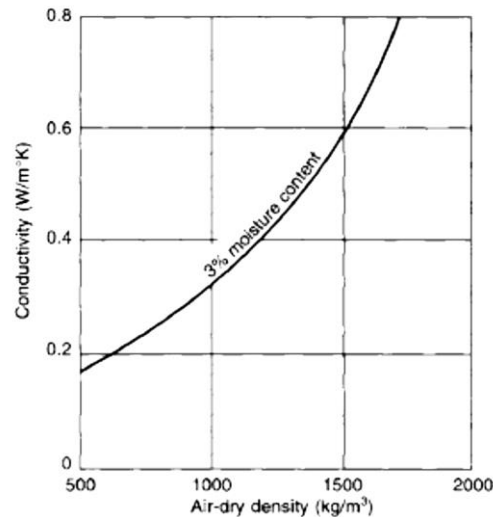


Figura 4. Relación entre conductividad térmica y densidad, (Tomado de Newman & Owens, 2003)

Aislamiento acústico: El aislamiento de la transmisión del ruido aéreo en unidades sólidas homogéneas como paredes y pisos se mejora a medida que aumenta su masa. Por lo tanto, para lograr el mismo aislamiento el espesor de las unidades de concreto liviano tendría que ser mayor que en el concreto de peso normal. Sin embargo, las pruebas han demostrado que unidades de concreto liviano con agregados con la superficie vitrificada, tal como la arcilla expandida tuvieron mejor aislamiento acústico en una pared de 200 mm de espesor con (52 dB) que la de un muro de concreto de peso normal del mismo espesor. También una pared de 175 mm de espesor hecha con concreto liviano (densidad 1600 kg/m³) que contiene PFA sinterizado dio el mismo aislamiento que un muro de concreto de peso normal (densidad de 2400 kg/m³) del mismo espesor que contiene grava como agregado. (Newman & Owens, 2003).

1.2 Agregados livianos naturales

Estos áridos corresponden a aquellos que provienen de la explotación de fuentes naturales, por lo que la gran mayoría de sus propiedades y características son originales, es decir sin alterar y por lo tanto se pueden emplear tal como se encuentran en la naturaleza.

1.2.1 Pumita o piedra pómez

Es una roca de origen volcánico piroclástica con gran cantidad de poros, producidos por el gas atrapado en su interior durante su rápido enfriamiento (Figura 5). Son lo suficientemente ligeras y resistentes para ser usadas como agregados livianos. La piedra pómez se presenta usualmente de color clara o blanca, su peso específico aparente en estado seco, varía entre 500 y 700 kg/m³.

A nivel mundial, 18.6 millones de toneladas de piedra pómez se extraen cada año. Turquía sigue siendo el productor dominante con una producción de 4.2 millones de toneladas por año. Otros países líderes son Italia, Chile, Ecuador, Etiopía, Francia, Alemania, Grecia, España y Estados Unidos. En Europa, el concreto liviano de pumita constituye aproximadamente el 3% del consumo total del 70% del consumo de concreto en Alemania. (Minerals Year book, 2010).



Figura 5. pumita, fuente propia

1.1.2 Perlita

Es una roca volcánica de naturaleza vítrea, comúnmente tiene un color grisáceo nacarado, brillo vítreo, se caracteriza por fracturas concéntricas tipo cebolla y alto contenido de agua. Se origina cuando una lava muy silíceo se enfría rápidamente (Figura 6). Este enfriamiento brusco de la mezcla silicatada fundida no permite la formación de minerales por lo cual la corteza de la colada de lava se transforma en un vidrio. La perlita es entonces el resultado de la lenta hidratación de esos vidrios. Tras el calentamiento rápido, la perlita se transforma en un material celular de baja densidad. A medida que el agua química dentro de la perlita se reduce, generalmente a temperaturas en el intervalo de 900-1100 °C, las formas resultantes de burbujas de vapor dentro de la roca, producen una estructura espumosa. La formación de estas burbujas permite que la perlita se expanda de 15 a 20 veces su volumen original. Este nuevo material se conoce como "perlita expandida". (Bektas et al 2005). Como resultado de la multiplicación de los bordes rotos producto de la expansión, aumenta el área específica de superficie de 1.2 a 2.3 m²/g. y no cambia su densidad (2.2 y 2.6 kg/m³). (Celik et al 2013).

Esta particularidad de expandirse, le otorga cualidades especiales, únicas, en cuanto a su estabilidad química y resistencia física, que la hacen un material acústico, térmico e ignífugo. Esto último significa que actúan como un filtro a los ruidos y a las temperaturas pudiendo actuar como aislantes y además no son afectadas por el fuego. También puede ser usada como un medio de enraizamiento acondicionador del suelo en horticultura; como agente de blanqueo en la industria textil; como adsorbente en la industria química; y como ayuda de filtro y como relleno en procesos misceláneos.

Existen depósitos minerales de perlita en muchos países del mundo, pero el producto expandido sólo está disponible en los países que tienen plantas en expansión comercial. Las reservas mundiales de perlita se estiman 700 millones de toneladas. En 2011, 1,7 millones de toneladas se produjeron en Grecia (500000 t), Estados Unidos (375000 t) y Turquía (220000 t); Sin embargo, no hay información de China, principal productor. (Celik et al 2013).



Figura 6. perlita, fuente propia

1.2.3 Diatomita

Esta es una roca silícica amorfa derivada de los restos de las plantas acuáticas microscópicas, que se forman cerca de la plataforma oceánica, (Figura 7). La diatomita en forma pura tiene un peso promedio de 450 kg/m³, La diatomita se ha utilizado en diversas aplicaciones, principalmente como agente de filtración y rellenos funcionales para pinturas y plásticos. Diatomita también se ha utilizado como aditivos puzolánicos para cemento Portland, morteros y lechadas. La diatomita se caracteriza como puzolana natural ya que cumple los requisitos de las normas del contenido de sílice activa. La sílice amorfa de las diatomitas puede reaccionar con Ca(OH)₂ del cemento para generar silicato de calcio hidratado (C-S-H) (Zaetang et al, 2013). La diatomita o tierra diatomácea también puede ser sinterizada en hornos rotatorios para hacer agregados livianos artificiales.



Figura 7. diatomita. (Tomado de Zaetang et al, 2003)

1.2.4 Escorias volcánicas (Lapilli)

Se compone de pequeños fragmentos piroclásticos expulsadas durante la actividad volcánica, que varían en tamaño desde 2 hasta 64 mm y de composición basáltica o andesítica (Figura 8). Es una roca vesicular cuyo color es usualmente oscuro y contiene celdas de formas largas e irregulares no conectadas entre sí logrando tener baja densidad (densidad media menor de 1400 kg/m^3), alta porosidad (0.30 a 0.50 fracción de huecos), y altos valores de absorción de agua (aproximadamente 12%). Estas propiedades clasifican a las escorias Lapilli como agregado livianos naturales. Lapilli se utiliza principalmente como un agregado en la producción de concreto liviano (LWC), especialmente un tipo de bloque en Canarias, España, con el 65% de Lapilli como agregado en la mezcla, fabrican bloques de baja densidad, entre 1300 a 1900 kg/m^3 , y resistencias mecánicas bajas dependiendo del peso y las dimensiones del bloque, que van desde 14.7 hasta 24.5 MPa . (Sánchez Et al, 2014).

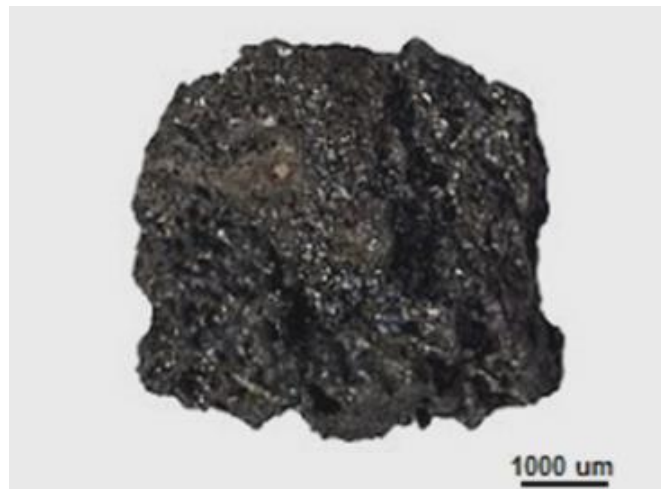


Figura 8. La pilli. (Tomado de Sánchez et al, 2014)

1.3 Agregados livianos artificiales

Algunos agregados livianos artificiales se obtienen a través de un tratamiento térmico a elevadas temperaturas, a determinados productos que poseen la propiedad de desprender gas al tiempo que se reblandecen, con lo cual expanden, Por efecto de la temperatura la capa superficial se vitrifica y el gas queda encerrado en el interior. Una vez enfriado se obtiene un material liviano y duro de superficie en ocasiones lisa y forma regular controlada en su fabricación. Los agregados livianos artificiales conocidos son las arcillas expandidas (Figura 9), las pizarras o esquistos expandidos y las cenizas volantes calcinadas.

La densidad aparente de estos áridos oscila entre los 300 y 1000 kg/m³. La absorción de agua de estos agregados, varían según la materia prima, el proceso de fabricación y el tamaño del grano; el intervalo de variación oscila entre un 8 y 25 por ciento sobre el peso deseado de los áridos mayores. Pueden dar lugar a una amplia gama de concretos, de densidades inferiores a los 1850 kg/m³ y resistencias máximas cercanas a los 60 Mpa. Algunos productos industriales, como el vidrio y otros subproductos industriales, como cenizas volantes, escoria expandida, pueden llegar a ser tratados también para ser usados como agregados livianos artificiales. Los tipos más comunes de agregados livianos producidos a partir de arcillas expansivas son conocidos como Leca y Liapor en Europa y Estados Unidos, en Latinoamérica Aliven. Los que se realicen a partir de cenizas volantes son conocidos como Lytag. Chandra & Berntsson, (2002).



Figura 9. Arcilla expandida aliven, fuente propia

1.4 Requerimiento de los agregados livianos para producción de concreto

Los diferentes tipos de áridos ligeros, naturales y artificiales, deben ser cuidadosamente examinados antes de su uso para la producción de hormigón. Las propiedades del agregado, tales como la densidad aparente, la densidad de las partículas, el contenido de humedad, y la distribución del tamaño, mediante análisis por tamizado, deben ser determinados antes de la producción. A veces, es necesario hacer un análisis químico para

el contenido de azufre y cloruro. Muchos agregados livianos se fabrican en lugar de usarlos en estado natural y, por lo tanto, y tienen una calidad uniforme, que es importante en las etapas de producción de las mezclas de concreto, colocación, compactación.

En la Tabla 10 se muestran algunos de los requisitos establecidos por la ASTM C 330 para agregados livianos, en cuanto a composición química y propiedades físicas, en la Tabla 11 se amplían los requisitos para gradación.

La arcilla expandida corresponde al árido más utilizado en el mundo para producir concretos livianos estructurales y es el que tiene más posibilidades de desarrollarse para integrar un concreto liviano estructural en Colombia, debido a:

- Abundancia de la arcilla como material de construcción en nuestro país.
- Existen estudios por parte de Ingeominas, (Maya 2002), que permiten identificar fuentes de extracción de la arcilla con propiedades químicas y mineralógicas adecuadas para la expansión de forma natural o con agentes que favorezcan la expansión.
- Posibilidad de desarrollo de plantas de producción de arcilla expandida térmicamente, con base a las tecnologías actuales de producción de la industria cementera.

Entonces, si se desea construir un concreto liviano estructural, que cumpla con los requerimientos de densidad estipulados, se necesita que los áridos livianos que lo componen, cumplan ciertas características que se mencionan a continuación:

- Forma redondeada, compacta y con superficie cerrada.
- Ser químicamente inerte respecto a las armaduras y el cemento.
- Volumen con poca variabilidad ante los cambios de humedad y temperatura.
- Resistente a los fenómenos climatológicos y efectos del transporte.
- Tener suficiente resistencia propia.

Tabla 10. Requisitos de agregados livianos para producción de concreto. (Tomado de ASTM C 330)

	Requisitos	Valor límite
Composición química	Impurezas orgánicas (ASTM C 40)	Color más oscuro que el estándar
	Manchas (ASTM C 641)	Mancha fuerte, contenido de hierro igual o superior a 1,5 mg/200 g de muestra, expresado como $Fe_2 O_3$
	Pérdida por Ignición (ASTM C 114)	< 5%
Propiedades físicas	Terrones de arcilla	< 2%
	Gradación	De acuerdo a Tabla 11.
	Masa unitaria suelta seca (kg/m^3)	Agregado fino 1120 Agregado grueso 880 Agregado combinado 10140

Tabla 11. Requisitos de gradación para agregados livianos para concreto estructural. (Tomado de ASTM C 330)

Designación tamaño (mm)	Porcentaje (por masa) de tamices con orificios cuadrados								
	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	300 um	150 um
Fino 4.75 - 0				100	85-100		40-80	10-35	5-25
	25 - 4.75	95-100	25-60		0-10				
Grueso	19 - 4.75	100	90-100	10-50	0-15				
	12.5 - 4.75		100	90-100	40-80	0-20	0-10		
	9.5 - 2.36			100	80-100	5-40	0-20	0-10	
Combinado	12.5 - 0	100	95-100		50-80			5-20	2-15
Fino-grueso	9.5 - 0		100	90-100	65-90	35-65		10-25	5-15

1.5 Propiedades mineralógicas y mecanismos de reacción de la matriz cementante

El proceso de hidratación del cemento inicia básicamente al entrar en contacto con el agua, en ese momento las fases mineralógicas que componen el cemento, en su mayoría alita, belita, celita y felita, reaccionan con el agua y generan silicatos cálcicos hidratados (tipo tobermorita o C-S-H), trisulfoaluminatos cálcicos (etringita) e hidróxido de cálcico (portlandita CH). El silicato cálcico hidratado comúnmente denominado gel de C-S-H, es el responsable de la cohesión interna de la pasta de cemento, de la adherencia de ésta con los agregados en los morteros y concretos y, en definitiva, de la resistencia mecánica de estos conglomerados (Taylor 1997). El C-S-H, es el principal componente de las pastas de cemento y corresponde en volumen entre el 50% y 70% de ellas, el gel de S-C-H es un producto nanoestructurado natural con diámetros promedio de partícula entre 5 nm y 10 nm, (Hewlett 1998).

De lo anterior se puede deducir que en los concretos livianos, la pasta de mortero debe ser de mayor calidad que en uno de peso normal, porque es la encargada de transmitir las cargas dentro de la masa del concreto, si la rigidez del agregado es menor que la de la matriz cementante, como es el caso del concreto liviano, al finalizar el periodo elástico, sobreviene la ruptura del agregado de forma brusca. Es por lo anterior, que el concreto liviano es un material frágil, ya que la forma de falla de éste podría suscitarse también por una rotura a través del agregado, generando en el concreto una falla explosiva y no una falla típica que se da por la matriz del concreto. Chandra & Berntsson, (2002).

1.6 Mecanismos de interacción entre la matriz de concreto y agregados

En general, la producción de un concreto liviano está encaminada a cumplir con el mismo objetivo que tiene la dosificación de un concreto de peso normal y que corresponde a desarrollar altas resistencias a la compresión, debido a que ésta es la característica más importante del concreto endurecido. La resistencia depende de las características químicas y físicas de los materiales constituyentes y de las interacciones entre ellos mismos. En el caso de los concretos de peso normal, (Sánchez 2001), indica que “la falla de un concreto está regida por las resistencias relativas del agregado, la pasta y de lo que se conoce como la interface de adherencia. Por lo general, en los agregados naturales de peso normal sucede que las partículas tienen una resistencia propia mecánica superior a la pasta de cemento endurecida, por lo cual la resistencia a compresión del concreto no se ve muy afectada por la resistencia del agregado a compresión”.

1.6.1 Interacción física

Se presenta para los agregados con superficies minerales bien definidas (por ejemplo cuarzo) donde la composición química no tiene interacción con la matriz, la resistencia de la unión de este tipo de agregados con la matriz es insignificante, incluso si la matriz es fuerte. Así, la interfaz agregado - matriz se convierte en el eslabón más débil del sistema. Zhang & Gjrvv, (1-1990).

1.6.2 Interacción físico química

Para agregados que tienen una interacción química con la matriz de pasta de cemento (por ejemplo, rocas de carbonato), existe evidencia que un fuerte enlace químico entre el agregado y la matriz de la pasta de cemento puede desarrollarse. Zhang & Gjrvv, (2-1990).

1.6.3 Entrelazamiento mecánico

Para los agregados porosos o agregados con una superficie rugosa, la pasta de cemento o productos de hidratación del cemento pueden penetrar en las cavidades o poros grandes en la superficie agregada, actúan como varios "ganchos" de unión de la matriz y agregado. Zhang & Gjrvv, (1-1990).

1.7 Estructura de la ITZ entre agregados y pasta de cemento

La ITZ tiene su propia estructura. Se han identificado dos componentes primarios en la micro estructura de la ITZ: una capa delgada de cristales orientados de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), con un espesor aproximado de 0.5 μm . hacia el lado del agregado, y una capa delgada de silicato de calcio hidratado, gel C-S-H, con espesor aproximado a 0.5 μm . hacia el lado de la pasta. Esta doble capa es conocida, también, como “película dúplex”, y tiene un espesor total aproximado de 1 μm . Más alejada de los agregados está la zona de

interface principal, de unas 40-50 μm . de espesor, conteniendo productos de hidratación de cemento con cristales más grandes de hidróxido de calcio, pero menores que los de cualquier cemento hidratado. (Neville, 1999). La micro estructura de la ITZ está altamente influenciada por la formación de la capa dúplex: en esta zona las partículas de cemento son incapaces de unirse estrechamente con las partículas relativamente grandes de agregado; en consecuencia, la pasta de cemento endurecida en la ITZ tiene una porosidad mucho mayor (de 2 a 3 veces) que la pasta de cemento endurecida más alejadas de las partículas del agregado. Chandra & Berntsson, (2002).

(Zhang & Gjrvv, 1990) Encuentran, que la extensión de la ITZ corresponde cercanamente al promedio del diámetro de las partículas de cemento: 11-15 μm para los cementos finos y 28-40 μm para los cementos normales. Se entiende por “extensión” o “espesor” de la ITZ la distancia sobre la cual la porosidad es significamente mayor, al menos en un 10%, que la de la pasta común. La Figura 10 muestra la representación gráfica de la ITZ propuesta por Zhang.

La ITZ no solo existe en la superficie de las partículas del agregado grueso sino también alrededor de las partículas de la arena, aunque con espesores menores. La suma de las zonas individuales genera un volumen muy considerable, al grado que el volumen total de la ITZ está entre un tercio y un medio del volumen total de la pasta de cemento endurecida. Chandra & Berntsson, (2002).

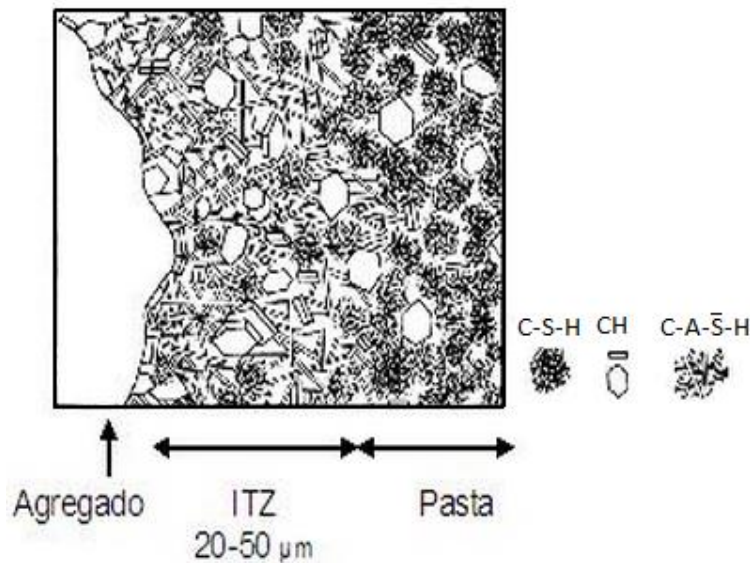


Figura 10. Representación gráfica de la zona de transición interfacial. Tomado de (Chandra & Berntsson, 2002).

1.7.1 Efecto de la adherencia en la resistencia del concreto convencional

La formación de la ITZ entre la superficie del agregado y la pasta agua-cemento juega un rol muy importante en la determinación de las propiedades del concreto.

La región de la ITZ adyacente a la superficie de los agregados tiene una alta porosidad, y, por lo tanto, una menor cantidad de cemento y una mayor relación agua/cemento que la

pasta normal. Se ha demostrado en diversas investigaciones que las mezclas de concreto con una baja (A/C) producen una mejor distribución de los granos de cemento cerca de los agregados y, por ende, una ITZ de menor espesor (menor porosidad). Por el contrario, mezclas con (A/C) alta generan una ITZ de mayor espesor (mayor porosidad), (Solano 2011). También, por su alta porosidad, la ITZ es más débil que la pasta de cemento normal. Se considera que la ITZ es "el eslabón más débil" de la cadena. (Nemati, 2005). Esto lleva, entonces, a decir que "la formación de la ITZ produce una zona débil en la vecindad de la superficie del agregado que puede tener un efecto negativo en la resistencia del concreto convencional"

Existe la evidencia del inicio de un microagrietamiento en la ITZ durante la aplicación de carga en el concreto, que luego se extiende hacia el resto de pasta y los agregados. Scholer, (1969) indica que el esfuerzo necesario para el inicio de las microgrietas, es principalmente función de la resistencia del mortero. Además, expone, basado en mediciones de microagrietamiento del concreto convencional durante las pruebas de compresión, la hipótesis que la adherencia pasta-agregado influye sobre la resistencia del concreto al controlar la cantidad de agrietamiento necesaria para llegar a la falla.

En general se acepta que la interfaz entre la pasta de cemento y el agregado es el "eslabón débil" en el concreto. Hay un número de observaciones que contribuyen a esta creencia: Chandra & Berntsson, (2002).

- La ITZ tiene una morfología abierta en comparación con el resto de la pasta.
- La ITZ contiene grandes cristales de portlandita, Ca(OH)_2 , que pueden inducir planos de debilidad.
- El agua de amasado a menudo se acumula alrededor de las partículas de agregados, creando planos adicionales de debilidad.

1.8 Antecedentes

Debido a que la ITZ es una capa formada entre un agregado y la matriz de pasta del cemento, sus propiedades son afectadas por ambos. Se encontró que la distribución del tamaño de grano del cemento, la relación agua cemento, la edad de hidratación, tamaño del agregado, y el tipo de agregado, también tienen efectos sobre las propiedades de la ITZ Chandra & Berntsson, (2002), Newman & Owens, (2003). También se halló que el espesor de la ITZ aumenta con el aumento de relación agua cemento (A/C) y con el aumento del tamaño de los agregados, Zhang & Gjercv, (1-1990). Por otra parte, la composición y la distribución de tamaño de partícula del cemento también pueden afectar a la porosidad de la ITZ, Menhta, (1986). Xiao J. et al, (2013), hallaron que el tamaño y la textura de la superficie de los agregados tienen grandes influencias en las propiedades de la ITZ.

Fagerlund, (1978) sugirió que la calidad de la matriz en las proximidades de un LWA puede ser mejorada por el efecto de "filtración", por el cual sólo el agua de la pasta de cemento entrará en el agregado. Esto podría proporcionar una capa impermeable alrededor del

LWA que minimiza aún más la entrada de agua y proporciona un efecto de fortalecimiento de la interfaz.

Este comportamiento de capa impermeable que bordea la matriz mejora el comportamiento al ataque de sulfatos de concretos de LWA versus un concreto de agregado convencional. (Elsharief, A. et al, 2005).

La diferencia entre la porosidad total y la porosidad permeable al agua del concreto indican que la estructura de la porosidad, en el caso de los poros cerrados de los agregados contribuye a una densidad más baja del concreto y un mejor aislamiento térmico, pero la porosidad permeable de la pasta facilita el transporte de agua de la matriz hacia el agregado, generando posibles reacciones químicas, álcali agregado o ión sulfato en la superficie del LWA. (Spiesz et al, 2013).

Zhang & Gjorv (1990) Encuentran que para LWA que tienen una capa exterior débil y más porosa, y para los agregados sin ninguna capa, la zona interfacial es más densa y homogénea. Además, la adherencia en estos agregados parece ser mejor debido a un entrelazamiento mecánico entre el agregado y la pasta de cemento, concluyendo que la naturaleza de la zona interfacial entre la pasta y el agregado, dependen de las características microestructurales del agregado.

Respecto a las propiedades físicas de los LWA como la absorción de agua, Lo, Y. et al (1999), realizaron un estudio de la microestructura de la ITZ y la tasa de absorción de agua de un LWA grueso (14 mm) de arcilla expandida, para estudiar el efecto de prehumedecer los agregados a distintos tiempos, 30 minutos y una hora. Los resultados evidenciaron una mejora en el asentamiento de los concretos, atribuido al alto contenido de agua localizado en la superficie del agregado. Se evaluó resistencia a la compresión y ésta mostró la tendencia de aumentar cuando el tiempo de prehumedecido de los agregados aumentaba, esto se debe a que en el momento de hidratación del concreto, hay migración del agua del interior del agregado al exterior aumentando la relación agua cemento y aumentando la hidratación del cemento en esa zona de interfaz; al tener menos tiempo de prehumedecido, hay menos agua al interior del agregado y por ende menos velocidad de hidratación y formación de fases mineralógicas del cemento.

Se ha establecido que para los concretos convencionales variaciones de la relación agua cemento, afectan la microestructura de la matriz cementante, bajas relaciones agua cemento usualmente conllevan a una resistencia a compresión mayor. (Chandra y Berntsson 2002). Para los LWC la reducción en la A/C, parece poseer el mismo efecto, sumados a las propiedades de los LWA, se han encontrado variaciones de la microestructura de la ITZ.

Elsharief, A. et al (2003), presentan los resultados de una investigación sobre el efecto de la relación agua-cemento (A/C), tamaño de agregados para morteros con agregados de peso normal de diferentes rangos de tamaño, gruesos (150-300 mm) y finos de (2.36 a 4.75 mm). Los resultados sugieren que la reducción de la relación A/C de 0.55 a 0.40 reduce la porosidad alrededor de los agregados de tamaño grande (150 a 300 mm) pero no es significativa en los agregados de menor tamaño (2.36 a 4.75 mm).

El tamaño mayor de los agregados tiende a reducir la porosidad de la ITZ y aumentar el contenido de partículas de cemento no hidratadas en la ITZ.

El efecto del tamaño de los agregados en el espesor ITZ no parece seguir una tendencia específica y parece depender de la función utilizada para definir el espesor de la ITZ. Si el espesor de la ITZ se basa en el gradiente de porosidad, la reducción del tamaño de los

agregados parece reducir el espesor ITZ, pero al medir el espesor en términos de partículas no hidratadas, la reducción del espesor de la ITZ no es significativa.

En otro estudio realizado por los mismos autores Elsharief, A. et al, (2005) se investigaron en concretos livianos (LWC) el efecto sobre la microestructura de la ITZ para LWA finos secos y LWA finos prehumedecidos. Se utilizó como agregado un esquisto expandido y molido hasta el tamaño de (330-150 μm). Se hallaron espesores de ITZ de 10 μm para LWA secos y de 15 μm para LWA prehumedecidos, en el mortero de agregado normal, la ITZ se extiende alrededor de 35 μm .

Los resultados consistían en medir la porosidad de la ITZ mediante gradiente de porosidad y cantidad de partículas no hidratadas de cemento.

Los resultados indican que el agregado prehumedecido no parece tener un efecto significativo en la microestructura de la ITZ en comparación con el agregado de peso ligero seco. Esto puede ser debido a la eliminación de agua de los poros grandes del LWA prehumedecido por las fuerzas ejercidas sobre el agregado durante el proceso de mezcla, por lo tanto el LWA parcialmente saturado parece absorber agua y modificar la microestructura de la ITZ.

El espesor de la ITZ se ha valorado utilizando distintos parámetros como la relación calcio/sílice, usando FRX. Mediante análisis digital de imágenes por gradiente de porosidad, a través del contenido de partículas de cemento sin hidratar en la ITZ, todas las anteriores desarrolladas por Elsharief, A. et al, (2005).

A pesar de investigar LWA de tamaño de partícula finas, y realizar la medición mediante la misma técnica por gradiente de porosidad y partículas no hidratadas de cemento en la ITZ, los dos estudios no permiten definir con certeza un espesor cuantitativo de la ITZ, solo se expone una medida por variación de concentración de porosidad, que va disminuyendo paulatinamente a medida que se aleja de la superficie del agregado pero que no muestra un cambio drástico, que permita limitar las propiedades de esa zona.

Punkki & Gjørsvik (1995) realizaron un estudio sobre el efecto del tratamiento de humedad de LWA en la microestructura y la absorción de agua de la ITZ de concretos. Muestras de concreto con A/C de 0.35 y el 7% de humo de sílice y A/C de 0.42 sin humo de sílice fueron fabricadas. Los resultados de pruebas de absorción por 24 horas indican que el concreto de LWA previamente humedecido tiene mayor succión capilar o absorción. El aumento de la absorción se atribuyó a la microestructura porosa de la ITZ alrededor del LWA prehumedecido en comparación con el ITZ alrededor del agregado seco.

Entonces, la absorción de agua de los LWA al ser usados prehumedecidos o secos en el concreto puede afectar positivamente o negativamente la permeabilidad del concreto, y estas afectaciones están relacionadas con el tipo de LWA usado, y con el tamaño de agregado, por lo cual en algunos de los estudios nombrados anteriormente este efecto de absorción de los LWA juega un papel positivo, logrando una menor permeabilidad del concreto y mejor resistencia inhibiendo la reacción al ataque de sulfatos de los concretos, mientras en otros dicha permeabilidad aumenta.

Otros autores como Kong L. et al, (2014), eligieron tres tipos de LWA, basados en pizarra expandida, arcilla expandida y cenizas volantes sinterizadas, la mezcla también contenía ceniza volante (FA), los agregados fueron molidos finamente hasta lograr áreas superficiales similares al área superficial del FA. Los resultados muestran que, todos los

tipos de LWA estudiados mostraron actividad química, absorbieron cantidades muy significativas de Ca^{2+} y OH^- , y se liberaron cantidades significativas de Si^{4+} en la solución de cemento. La reducción del contenido de CH de la pasta también indica que los LWA tienen reactividad puzolánica. Los resultados obtenidos confirman que la densa ITZ alrededor LWA no sólo se caracteriza por la absorción de agua y entrelazamiento mecánico, la reacción química o efecto puzolánico en la interfaz del agregado es menor comparada con la del FA.

Del estudio de Kong L et al, (2014), se resalta el hallazgo de reactividad puzolánica de los LWA en estado fino, dejando una brecha sobre el tamaño óptimo en el cual los LWA pueden ser usados como agregado y no como filler en la mezcla de concreto para lograr un efecto de reactividad puzolánica.

Hong Li, et al, 2014 encuentran que la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de un concreto convencional aumenta considerablemente (alrededor de 56,7%, 9,4% y 3,3%), en tres agregados gruesos, (caliza, basalto y cuarzo) al pulir sus superficies, debido a que la resistencia de la unión interfacial aumenta con la rugosidad de la superficie del agregado grueso.

También se ha encontrado que en la ITZ del concreto de LWA, existe un proceso químico, que se asocia con la actividad puzolánica del agregado y la deposición de CH en los poros de la superficie del agregado, y puede tener una influencia sobre la resistencia del concreto. (Kong et al 2014).

De las investigaciones anteriormente citadas, se puede observar que las interacciones físicas y químicas entre LWA y la pasta de cemento son responsables de las propiedades de la microestructura de la ITZ.

Un hecho bien conocido es que las propiedades mecánicas de los materiales a base de cemento dependen en gran medida de la estructura del material a escalas micro y nano. Para comprender y mejorar las prestaciones mecánicas macroscópicas de los materiales a base de cemento, es esencial investigar las propiedades mecánicas en las escalas micro y nano.

Mediante la aplicación de la técnica de nanoindentación, se ha reportado una gran cantidad de valiosa información mecánica microestructural de materiales cementantes durante la última década, permitiendo identificar los efectos mecánicos de los componentes químicos elementales del cemento tales como las propiedades de las cuatro fases del clínker, y de los componentes de la matriz cementante como portlandita, y el gel de C-S-H. (Hu & Li, 2015).

Algunos resultados recientes obtenidos por nanoindentación, revelan que existe el gel C-S-H "mecánicamente" en dos formas diferentes, una forma de baja densidad y una forma de alta densidad, que tienen diferentes valores de rigidez, dureza y diferentes fracciones de volumen, resaltando que la rigidez y dureza no cambian de un material a base de cemento a otro; sino que son propiedades intrínsecas del gel C-S-H. (Constantinides, 2003).

En el trabajo realizado por Sidorova et al, (2014), Al realizar análisis de módulo de elasticidad en la ITZ, de concretos de agregados reciclados y naturales (caliza), con variaciones de A/C de 0.3, 0.4 y 0.5; los resultados promedio de E, encontrados en una ITZ de espesor de 70 μm , para la A/C de 0.4, fue de 25 GPa, al igual que asocian valores mayores de E a granos de cemento sin hidratar; estos valores fueron atribuidos a los siguientes rangos de E, para los componentes de la matriz cementante; Porosidad de 0 –

8 Gpa, C-S-H y etringita 8 – 30 GPa, CH 30 – 50 GPa y fases de cemento sin hidratar mayor a 80 GPa.

Constantinides, (2003), encuentra valores del módulo de elasticidad para las dos formas de C-S-H de baja densidad entre 11 – 20 GP, para la C-S-H de alta densidad de 20 – 30 GPa; para la CH atribuye valores en el rango de 31 – 40 Gpa, módulos superiores a 80 GPa son atribuidos a granos de cemento sin hidratar, y módulos de elasticidad menores a 10 Gpa a poros de la matriz.

El uso de nanoindentación en el estudio de la microestructura de la ITZ puede conducir a la optimización exitosa del diseño de la mezcla para obtener un aumento de fracciones de volumen de la fase C-S-H, responsable de la resistencia a compresión del concreto.

2. Objetivos.

2.1 Objetivo general

Estudiar el efecto de los agregados livianos sobre el espesor y densidad de la microestructura en la zona de transición interfacial (ITZ) en concretos livianos y compararla con la ITZ de concretos convencionales.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar las características de morfología, propiedades físicas como absorción de agua y densidad de agregados livianos y la incidencia sobre el espesor y densidad de la microestructura de la ITZ.
- Determinar los rangos de variación de relación agua cemento, absorción de agua de los agregados mediante los cuales hay variación del espesor de la ITZ.
- Evaluar la influencia del espesor de la ITZ, en las propiedades mecánicas de los concretos livianos y convencionales.

2.3 Alcance esperado de la investigación

El desarrollo de este proyecto comparó la microestructura de la zona de transición interfacial de dos morteros fabricados a partir de agregados livianos y agregados naturales, además se identificó cuál es el mecanismo de interacción que tienen las características morfológicas, porosidad y de composición de los agregados livianos en la formación, espesor y densidad, de la microestructura de la ITZ, adicional se cuantificó los efectos de la densidad, y espesor de la ITZ en propiedades mecánicas en los concretos fabricados.

3. Metodología y materiales

La metodología desarrollada en esta investigación se divide en tres actividades principales; caracterización de materiales utilizados, diseño y preparación de los concretos y el estudio de las propiedades mecánicas de la ITZ del concreto, para la ejecución de los ensayos de nanoindentación y la toma de micrografías se describe la preparación de las muestras y las especificaciones de los distintos equipos usados.

3.1. Metodología de investigación

Para el desarrollo del proyecto una vez realizada la revisión bibliográfica se inicia con las tres etapas y sus actividades asociadas, el detalle de las etapas y sus actividades asociadas se observan en la Tabla 12.

La caracterización de los materiales para la fabricación de probetas de concretos a fin de establecer propiedades y calidad de los materiales usados, se realizó mediante:

- **Caracterización química:** se efectuó por ensayo de fluorescencia de rayos X, (FRX). Esta técnica permite cuantificar la composición química expresada en componentes presentes en las muestras. Para complementar la composición química se efectuó en la Microscopía Electrónica de Barrido la espectroscopia EDS, (SEM-EDS).
- **Caracterización mineralógica:** se realizó vía ensayo de difracción de rayos X, (DRX), para determinar la composición y grado de cristalinidad de los compuestos, que permitan estudiar una posible reacción química del agregado con los productos de hidratación del cemento.
- **Caracterización morfológica:** mediante Microscopía Óptica y Microscopía Electrónica de barrido, (SEM); Ensayo BET para determinar el área superficial de los agregados; distribución de tamaño de partícula DTP por tamizado de los distintos agregados de acuerdo a la norma ASTM C 136, e índice de forma para agregados de acuerdo con la norma ASTM D 3398.
- **Caracterización física:** se evaluó la densidad de los agregados mediante la metodología de ensayo de la norma ASTM C 29 y absorción de agua de los agregados, natural y livianos de acuerdo con la ASTM C127.

Tabla 12. Resumen de etapas y actividades metodológicas.

ETAPA	ACTIVIDAD	OBJETIVO
Etapa 1. caracterización de materiales	<ul style="list-style-type: none"> - Caracterización Química (FRX) - Mineralogía (DRX) - Morfología (SEM), Óptica, BET - Física, densidad y absorción de agua 	Analizar las características de morfología, propiedades físicas como absorción de agua y densidad de agregados livianos para determinar la incidencia sobre el espesor y densidad de la microestructura de la ITZ.
Etapa 2. Diseño y preparación de mezclas de concreto	<ul style="list-style-type: none"> - Selección de los parámetros de relación agua - Porcentajes de materiales en la mezcla - Mezclado y elaboración de probetas - Desmolde y curado de probetas 	Determinar los rangos de variación de relación agua cemento, absorción de agua de los agregados mediante los cuales hay variación del espesor y de la ITZ.
Etapa 3. Evaluación de las propiedades Mecánicas	- Medición espesor ITZ mediante microscopía óptica	Evaluar la influencia del espesor y porosidad de la ITZ, en las propiedades mecánicas de los concretos livianos y convencionales.
	- Medición de módulo de elasticidad de la ITZ y matriz cementante mediante Nanoindentación	
	Resistencia a compresión	

3.2 Materiales

Para la preparación de probetas de concreto, se utilizaron cemento Portland Tipo 1, agregado normal de consumo local para fabricación de concretos, agregados livianos, que corresponden a una arcilla expandida térmicamente y a dos agregados livianos naturales, pumita y perlita. La Tabla 13 relaciona los distintos materiales usados para fabricar las probetas de concretos.

Tabla 13. Materiales

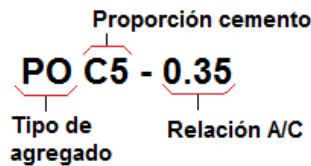
Material	Nombre	Proveedor	Abreviatura
Agregado liviano	Aliven	Aliven C.A, Venezuela	AL
Agregado liviano	Perlita	Pómez Tech, Colombia	PE
Agregado liviano	Pumita	Pómez Tech, Colombia	PO
Agregado convencional	Conasfaltos	Conasfaltos, Colombia	CO
Cemento portland tipo I	Cemento tipo I	Cemex, Colombia	-

3.3 Diseño de mezclas para concretos livianos y convencional

En el diseño de mezclas los factores a analizar fueron: tres agregados livianos, Pumita, Perlita y Aliven, un agregado convencional como patrón, la relación agua cemento (A/C) de 0.35 y 0.45, y proporción de cemento, correspondiente a 500 y 600 kg/m³. Para el criterio de selección de la relación agua cemento, de la revisión bibliográfica se seleccionaron dos relaciones una baja de 0.35, que permitiera una trabajabilidad de los agregados usados en estado grueso y una alta de 0.45, cercana a las usadas en obra. Ambas relaciones agua cemento fueron seleccionadas de tal forma de no requerir el uso de aditivo en la mezcla, que podría generar modificaciones en la microestructura de la ITZ de interés en este estudio.

Las proporciones de cemento de 500 y 600 kg/m³ son producto de una revisión bibliográfica para las cuales en algunos estudios, se lograron resistencias a compresión en concretos livianos, superiores a 17.5 MPa. Ke, et al, Ortola (2009-2010), Ayhan et al, (2011), Lo et al, (2008), Newman & Owens, (2003).

La Tabla 14 describe los factores y niveles del diseño, y la Tabla 15 relaciona el orden de corrida de las mezclas para una réplica. Cada réplica consta de 6 probetas cúbicas de concreto de lado 50 mm. La codificación de las 16 mezclas del diseño corresponden a las dos primeras letras de la abreviatura del agregado usado (Tabla 3), seguido de una letra C que simboliza el cemento con el número 5 o 6 de acuerdo a la proporción del mismo, finalizando por un guión y la relación agua cemento de la dosificación, ejemplo:



Equivalente a decir mezcla concreto de pumita con proporción de cemento de 500 kg/m³ y relación agua cemento de 0,35 respectivamente.

Tabla 14: Factores y niveles diseño factorial.

Factor	Nivel
Tipo de agregado	Pumita
	Perlita
	Aliven
	Convencional
Relación agua cemento	0.35
	0.45
Proporción cemento	500
	600

Tabla 15. Corrida diseño factorial

Corrida	Relación agua cemento (a/c)	Cemento (kg/m ³)	Agregado (kg/m ³)	Mezcla
1	0.45	600	Convencional	COC6-45
2	0.35	500	Pumita	POC5-35
3	0.45	600	Pumita	POC6-45
4	0.35	500	Aliven	ALC5-35
5	0.45	500	Aliven	ALC5-35
6	0.35	600	Aliven	ALC6-35
7	0.45	600	Aliven	ALC6-35
8	0.35	500	Perlita	PEC5-35
9	0.35	600	Convencional	COC6-35
10	0.35	600	Pumita	POC6-35
11	0.45	500	Convencional	COC5-45
12	0.45	500	Perlita	PEC5-45
13	0.35	500	Convencional	COC5-35
14	0.45	600	Perlita	PEC6-45
15	0.45	500	Pumita	POC5-45
16	0.35	600	Perlita	PEC6-35

3.4 Ejecución de pruebas y ensayos

De acuerdo con el diseño de experimentos, se fabricaron probetas de forma cúbica de 50 mm de lado, de agregados livianos y convencional, una vez realizadas las probetas se sometieron a un proceso de curado húmedo en agua saturada con cal a temperatura ambiente de 23 °C ± 2, a las edades de 3, y 28 días de curado hasta el fallado a resistencia a compresión.

- Mediante micrografías de microscopía óptica y SEM, se realizaron mediciones del espesor de la ITZ en las distintas probetas de mezclas de concretos fabricados. Para determinar los módulos de elasticidad de la ITZ se ejecutaron ensayos de nanoindentación, para lo cual se realizó un pulido tipo espejo y aplicó una carga sobre las muestras, se realizaron una red de indentaciones, que permitieron

obtener un valor promedio para el módulo de elasticidad y dureza de la ITZ y pasta de cemento.

- En las muestras de concretos, para identificar la composición de la matriz cementante se realizaron ensayos EDS en la pasta y específicamente en la ITZ de las distintas muestras de concretos.
- Mediante resistencia a compresión, se evaluó la resistencia de los concretos a 3 y 28 días de curado.

3.4.1 Preparación de concretos livianos

El diseño de mezclas se realizó siguiendo los parámetros de la ACI 213-3, se hizo una dosificación por peso, para lograr como variable respuesta la densidad del concreto y posteriormente la resistencia a compresión a 28 días.

El diseño de mezclas efectuado correspondió a utilizar agregados livianos gruesos, con tamaño de partícula del intervalo 9.5 mm a 4.76 mm (pasante tamiz 3/8" y retenido en el N°4). La Tabla 16 muestra las distintas mezclas con las variaciones en los parámetros de relación agua cemento (A/C), cantidad de cemento, y cantidad de agregados.

Para la elaboración de las mezclas se trabajó con los agregados en la condición de saturados superficialmente secos. Los agregados fueron previamente saturados en inmersión de agua por 24 horas, se determinó la absorción de cada muestra y se procedió a realizar el ajuste por peso del agregado de acuerdo a su absorción y se mantuvo la relación agua cemento del diseño de mezcla.

La mezcla se realizó siguiendo los procedimientos establecidos en la ASTM C 109, para el uso de moldes y equipos, en cuanto al tiempo de mezclado se estableció el parámetro sugerido en la ACI 211.2-98. En la Figura 11, observa una mezcla típica de concreto liviano en estado fresco, y en la Figura 12, las probetas cúbicas en estado endurecido.



A) Mezcla de aliven

B) Mezcla de pumita

Figura 11. Mezcla en estado fresco de concretos livianos

Tabla 16. Diseño de mezclas concretos livianos agregado Aliven

Nombre mezcla	Relación agua cemento (A/C)	Cemento (kg/m ³)	Agregado (kg/m ³)	Agua (kg)
ALC5-0.35	0.35	500	400	175
ALC5-0.45	0.45	500	400	225
ALC6-0.35	0.35	600	400	175
ALC6-0.45	0.45	600	400	225
POC5-0.35	0.35	500	400	175
POC5-0.45	0.45	500	400	225
POC6-0.35	0.35	600	400	175
POC6-0.45	0.45	600	400	225
PEC5-0.35	0.35	500	400	175
PEC5-0.45	0.45	500	400	225
PEC6-0.35	0.35	600	400	175
PEC6-0.45	0.45	600	400	225
COC5-0.35	0.35	500	400	175
COC5-0.45	0.45	500	400	225
COC6-0.35	0.35	600	400	175
COC6-0.45	0.45	600	400	225



Figura 12. Muestras de concreto liviano en estado endurecido

3.4.2 Preparación de muestras para micrografías y nanoindentación

Micrografías ópticas y SEM

Una vez el proceso de curado de 3 y 28 días, de las distintas muestras de concretos, fue alcanzado se realizaron cortes con disco de diamante en una ISOMET a 1000 revoluciones por minuto como medio refrigerante alcohol, para obtener muestras cúbicas de aproximadamente 2 cm de lado, con el fin de contener el mayor número de agregados dentro de la sub muestra, los agregados estaban entre valores de 4,75 a 9.5 mm, algunos en el proceso de mezclado fueron triturados y reducidos en su tamaño, caso de la pumita y perlita, y en menor proporción para el aliven y convencional (Figura 13).

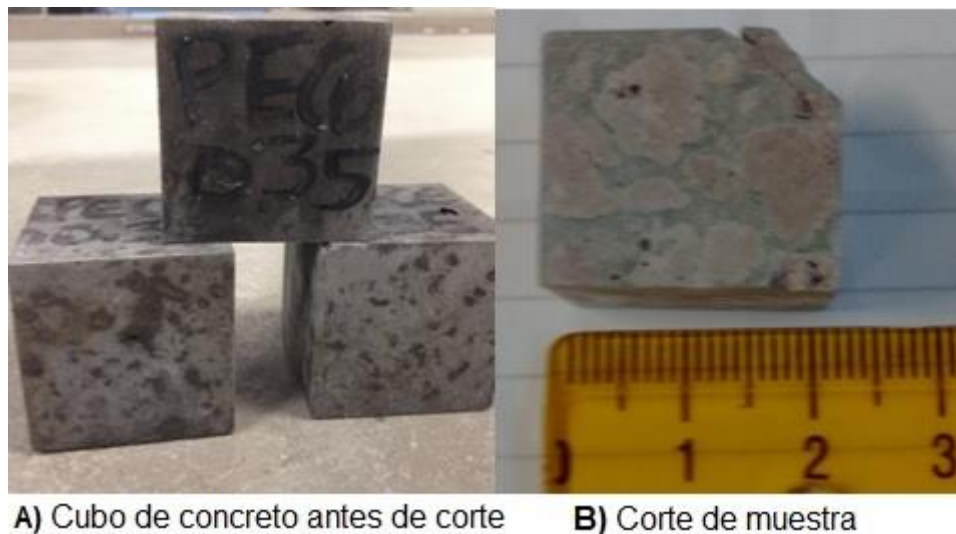


Figura 13. Cubo de concreto antes y después de corte

Se efectuaron cortes para cada una de las 16 muestras obteniéndose más de tres sub muestras, los cortes se ejecutaron para permitir que las secciones mostraran tanto el agregado como la matriz cementante en la cual se lograra identificar la ITZ.

Una vez ejecutados los cortes, las muestras fueron secadas en horno a una temperatura constante de 55 °C durante una semana, para detener el proceso de hidratación y posteriormente almacenadas en un desecador. Las muestras fueron utilizadas para medir el espesor de la ITZ por microscopía óptica, y microscopía SEM para la caracterización morfológica y la identificación de fases.

Nanoindentación

La preparación inicia con las sub muestras cúbicas de 2 cm de lado, el procedimiento consistió en embaquelar las muestras en resina epóxica, en una cámara de vacío, a una presión de 11 PSI, con el objetivo de llenar los micro poros tanto de los agregados como de la matriz cementante, y tener una mejor manipulación de la muestra en el proceso de pulido. El proceso de Embaquelamiento se puede observar en la Figura 14 A. Una vez las muestras estaban embaqueladas se procedió a realizar pulido tipo espejo, para iniciar el desbaste se utilizó papel lija N° 320 y 400 durante 5 minutos, se inicia el pulido con lijas N° 600 y 2000 por un tiempo de 5 minutos, posteriormente se llevan a alúmina de 12,5 μm en suspensión de alcohol en paño tipo billar durante 5 minutos. Se continúa con baño en ultrasonido como medio en acetona, para finalizar el pulido en diamante de 0,1 μm en suspensión de alcohol durante 5 minutos en paño tipo Microcloth. Para finalizar el proceso, se llevaron las muestras en baño de ultrasonido con medio en acetona por 5 minutos. El acabado típico de la muestra puede observarse en la Figura 15.

Para determinar el perfil de rugosidad óptimo, se realizaron ensayos de, Microscopia de Fuerza Atómica (AFM), logrando obtener perfiles de rugosidad entre 50 y 230 nm.



A) Embaquelado al vacío

B) Muestra preparada

Figura 14. Embaquelamiento de muestras en cámara de vacío.



Figura 15. Muestra pulida tipo espejo para nanoindentación

3.5 Equipos

Difracción de Rayos X (DRX)

Los ensayos de DRX se realizaron en un equipo de referencia PANalytical X'Pert PRO MPD, en un intervalo 2θ entre 4° y 70° , con un paso de 0.02° y un tiempo de acumulación de 56 segundos. Se usó un ánodo de cobre con $K\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$. Las mediciones se llevaron a cabo en el laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Fluorescencia de rayos X (FRX)

Las muestras fueron analizadas en un Equipo de Fluorescencia de Rayos X marca PANalytical, modelo AXIOS. El método usado es un análisis cuantitativo sobre perla por fluorescencia de rayos X por longitud de onda dispersiva. Los ensayos se realizaron en los laboratorio petrográfico y geoquímico de la empresa Geoensayos.

Microscopía electrónica de Barrido (SEM)

El equipo utilizado fue un SEM JEOL JSM 5910LV con detectores de electrones retroproyectados, y aplicación de 15 kV para la generación de imágenes y a una distancia de trabajo de 10 mm. Las muestras se sometieron a alto vacío y se recubrieron con una capa de 8 nm de oro paladio para mejorar su conductividad eléctrica. El equipo pertenece al laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Microscopía por Estereoscopio

Se tomaron micrografías en un estereoscopio Nikon referencia Eclipse LV100, objetivos 2x, hasta 11.5x. El equipo pertenece al laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Área superficial BET

El ensayo se realizó en un equipo AutoChem 2950 HP de analizador de quimisorción de Micromeritics, mediante Isotermas de Adsorción de Nitrógeno (20 A a 3000 A). El análisis de área BET proporciona el valor del área superficial calculado por el método Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett, and Edward Teller. La información obtenida a partir del volumen adsorbido permite determinar el área superficial y volumen de poros en las muestras.

Resistencia mecánica

Las pruebas de resistencia a compresión se efectuaron en una prensa marca Controls, Modelo CT-0151/E, con un intervalo de medición: 0-150 KN. Tasa de carga 1300 N/s. Para cada muestra se fallaron tres cubos de acuerdo a las normas ASTM C 348 y C 349. Este

equipo pertenece al laboratorio de Química del Cemento de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Nanoindentación

Un Triboindentador Hysitron referencia TI 950, dotado con una punta Berkovich de ángulo total 142.3° y ángulo medio de 65.35° con una relación de aspecto de 1:8, fueron usados para realizar los ensayos de nanoindentación con una carga constante de $2 \mu\text{N}$. Equipo perteneciente al Laboratorio de Fenómenos de Superficie de la Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Pablo, Brasil.

AFM

Microscopio de Fuerza Atómica Shimadzu SPM 9500, perteneciente al Laboratorio de microscopía electrónica de fuerza atómica, del departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la Universidad de Sao Pablo, Brasil.

4. Resultados y discusión

En el siguiente capítulo se presenta y discuten los resultados obtenidos a partir de las actividades planteadas en la metodología. El capítulo se encuentra dividido en 3 secciones correspondientes con las actividades de la metodología, caracterización, ejecución de pruebas y ensayos sobre las distintas probetas de concretos.

4.1 Caracterización de materiales

4.1.1 Composición mineralógica

La posición de los picos y las intensidades relativas se compararon con la base de datos del software X'Pert High Score Plus con licencia de la Universidad Nacional de Colombia.

Para los agregados de pumita y perlita, Figuras 16 y 17 se puede observar que en el difractograma se forma un pico ancho justo entre las posiciones 2θ en 20° y 30° , donde se halla el pico característico de la sílice alrededor de 26.5° , correspondientes a cuarzo de bajo grado de cristalinidad o sílice amorfa, característica atribuida a que éste pico no está muy definido y carece de la esbeltez que indica la alta cristalinidad de la sílice.

Otros componentes son aluminosilicatos en forma de albita, con pequeñas trazas de anortita en estado de bajo grado de cristalinidad. Dichas composiciones corresponden a los procesos de formación de los agregados, la pumita y perlita son rocas de procedencia volcánica, producto de solidificación del magma para la pumita y de sílice vítrea para la perlita.

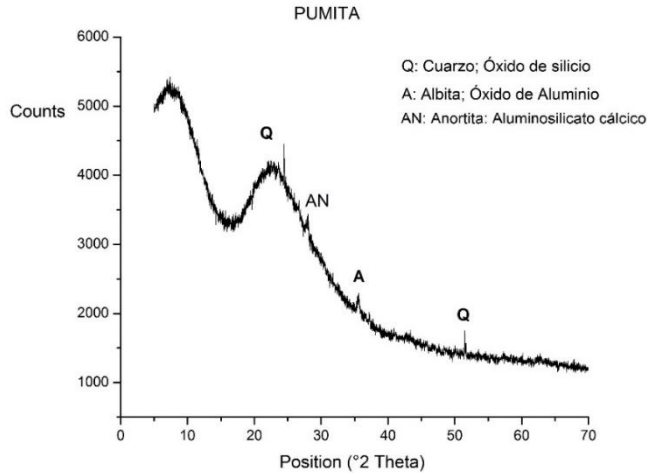


Figura 16. Diffractograma para agregado liviano pumita

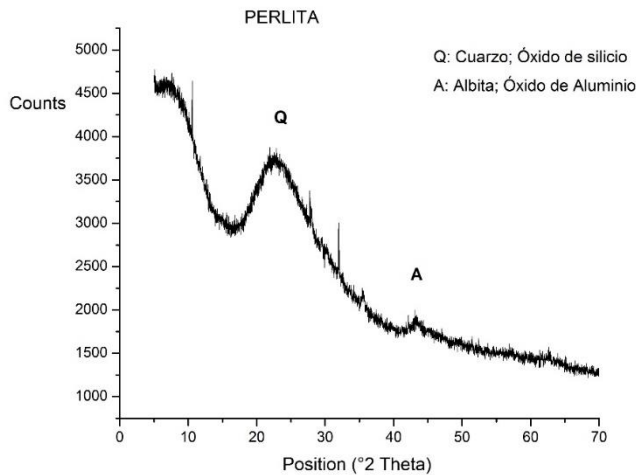


Figura 17. Diffractograma para agregado liviano perlita

El diffractograma de la Figura 18 permite establecer que las principales especies mineralógicas en el Aliven, corresponden a sílice de alto grado de cristalinidad, en la posición 2θ en 26.5° el pico principal de la sílice presenta una gran esbeltez llegando en el eje Y a 20000 cuentas, mayor a las 6000 de la pumita y perlita. Otras fases presentes corresponden a aluminosilicatos en forma de plagioclasas, y pequeñas trazas de óxido de hierro en forma de hematita.

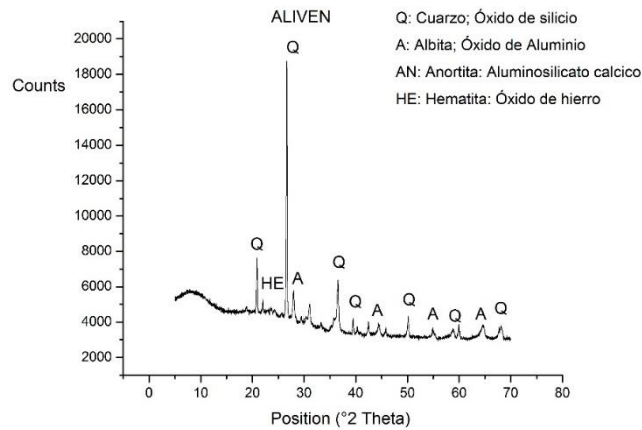


Figura 18. Difractograma para agregado liviano aliven

En el difractograma de la Figura 19 se observa que las principales especies mineralógicas del agregado convencional de Conasfaltos, corresponden a, sílice en estado cristalino, hornblenda, y pequeñas trazas de anortita y chamosita. En la Tabla 17 se identifican las principales fases y su grado de cristalinidad.

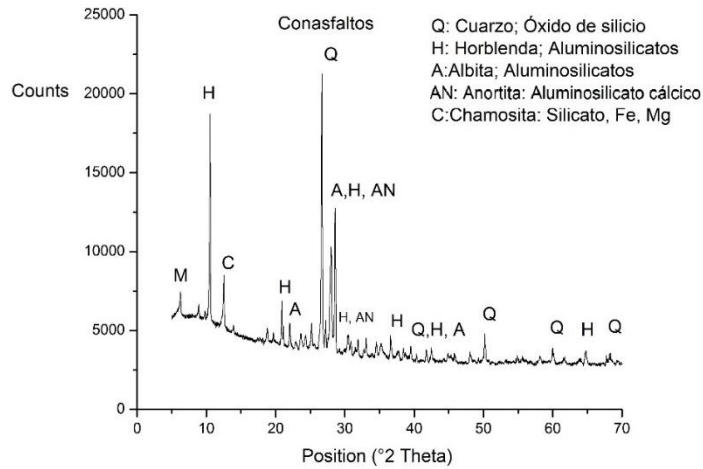


Figura 19. Difractograma para agregado liviano convencional Conasfaltos

Tabla 17. Composición mineralógica

Composición mineralógica	Grado de cristalinidad			
	Pumita	Perlita	Aliven	Convencional
Cuarzo (Óxido de silicio)	Amorfo	Amorfo	Cristalino	Cristalino
Albita (Aluminosilicato)	Amorfo	Amorfo	Cristalino	Cristalino
Anortita (Aluminosilicato cálsico)	Amorfo	-	Cristalino	Cristalino
Hematita (Óxido de hierro)	-	-	Cristalino	Cristalino
Horblenda (Aluminosilicato)	-	-	Cristalino	Cristalino
Chamosita (Silicato de Fe, Mg)	-	-	Cristalino	Cristalino

Hossain en el 2004, comenta que el estado amorfo de los agregados de pumita puede tener un efecto favorable en la microestructura de la ITZ, debido a la reacción de los aluminosilicatos de los agregados con el hidróxido de calcio CH (Portlandita), sub producto de la reacción de hidratación del C_3S del cemento, para formar nuevo silicato de calcio hidratado C-S-H conocido como gel de Tobermorita.

Para lograr un efecto de reacción puzolánico la ASTM C 618 describe los requerimientos físicos y de composición química de los materiales a ser usados como puzolanas en mezclas cementantes, tales como cenizas volantes de carbón, puzolanas naturales o calcinados, como humo de sílice y escoria, uno de los requisitos principales de ésta norma corresponde al módulo de finura, porcentaje retenido en el tamíz N° 325 y éste independiente de la fuente de la puzolana, es del 34%.

En esta investigación, los agregados usados se incorporaron al concreto como agregado grueso, con un tamaño de partícula entre 9.5 y 4.76 mm y por ello el posible fenómeno de efecto puzolánico del agregado deberá ser observado con atención en las microscopías de SEM de la hidratación del cemento.

4.1.2 Composición química

Los resultados de los ensayos de composición química mediante fluorescencia de rayos X, se muestran en las Tablas 18.

Los resultados de la caracterización química están acorde con la caracterización mineralógica, para los agregados livianos y convencional corresponden principalmente a, cuarzo, y aluminosilicatos, con pequeñas trazas de óxidos de sodio, magnesio y potasio, por tratarse de materiales de origen volcánico se evidencian trazas de azúfre en los agregados y en el cemento puede corresponder a los gases liberados en el proceso de fabricación del clínker

La composición principal para los agregados corresponde a óxidos de silicio, alrededor del 70% para la pumita y perlita, seguido del óxidos de aluminio, y en menor proporción óxidos de sodio y potasio. El aliven junto con el agregado convencional son materiales compuestos de óxido de silico en mayor proporción, con un contenido considerable de óxido de aluminio y hierro más elevado que el de la pumita y perlita, y una baja proporción de óxidos de sodio, calcio y potasio.

Para el cemento, la composición química indica que los porcentajes corresponden a un cemento Pórtlan tipo I de acuerdo con la ASTM C 150. La caracterización química y mineralógica determina que los cuatro agregados están compuestos principalmente por aluminosilicatos.

Tabla 18. Composición química mediante FRX

Composición química	Peso %				
	Pumita	Perlita	Aliven	Convencional	Cemento
Silicio expresado como (SiO ₂)	72.1	72.45	59.67	58.43	20.9
Titanio expresado como (TiO ₂)	0.21	0.22	1.19	0.86	0,21
Aluminio expresado como (Al ₂ O ₃)	13.35	13.38	16.95	13.46	4.72
Hierro expresado como (Fe ₂ O ₃)	1.30	1.35	9.79	8.33	3.2
Magnesio expresado como (MgO)	0.05	0.08	4.13	6.0	1.8
Calcio expresado como (CaO)	1.22	1.2	3.57	7.17	60.69
Sodio expresado como (Na ₂ O)	3.35	3.4	2.07	1.89	0.37
Potasio expresado como (K ₂ O)	4.63	4.57	1.28	1.02	0.61
Fósforo expresado como (P ₂ O ₅)	-	0.02	0.13	0.08	3.02
Azufre expresado como (SO ₃)	0.08	0.09	0.04	0.09	0.13
Pérdidas por Ignición a 1000°C	2.93	2.92	0.75	2.4	3.68

4.1.3 Caracterización morfológica de agregados

La caracterización morfológica para los agregados se llevó a cabo mediante toma de microfotografías ópticas y de SEM, ensayo de BET para determinar el área superficial, distribución de tamaño de partícula, e índice de textura y forma.

Para la fabricación de concreto existen combinaciones única de agregados finos y gruesos que maximizan la trabajabilidad del concreto. Esto implica que el volumen de agregado fino dentro de la mezcla depende de la clasificación, forma y textura superficial del agregado grueso. La densidad de empaquetamiento puede ser también dependiente de la esfericidad y textura de la superficie del agregado. Kwan & Mora, (2001).

Distribución de tamaño de partícula

Por tamizado de acuerdo con la ASTM C 33, se realizó una gradación de los agregados a utilizar, utilizando las especificaciones para agregados livianos establecidos en la ASTM C 330, agregados para concretos livianos.

En las Figuras 20 a 23 se presentan las diferentes curvas granulométricas de los agregados livianos y convencionales. De las curvas granulométricas se puede observar que sólo el aliven Figura 20, cumple con los requisitos de porcentajes retenidos establecidos por la ASTM C 330, la perlita en la Figura 21, posee una granulometría cercana a los finos y carece de material retenido en los tamaños ½" y 3/8" (12.7 – 9.5 mm),

la pumita en cambio, Figura 22, es más grueso y posee menor porcentaje retenido en la zona de finos, (4.76 – 2.36 mm).

El agregado convencional, Figura 23, carece de material en los tamaños finos, y retiene un mayor porcentaje en los tamaños de 3/8" y 1/2".

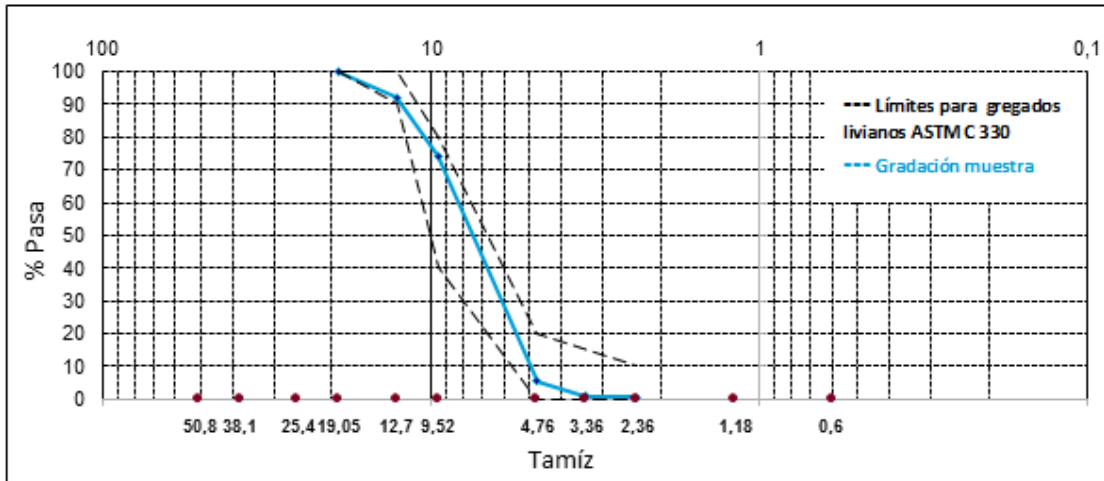


Figura 20. Curva de gradación de aliven

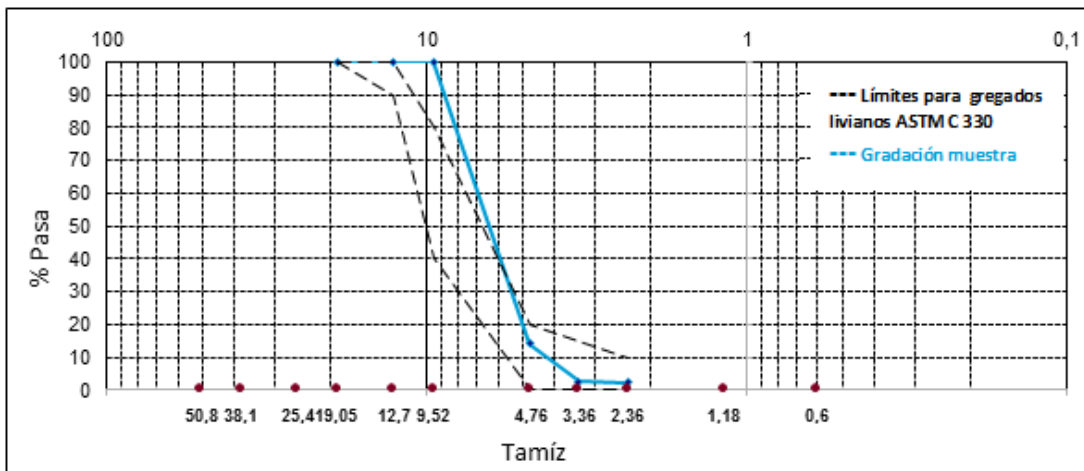


Figura 21. Curva de gradación de perlita

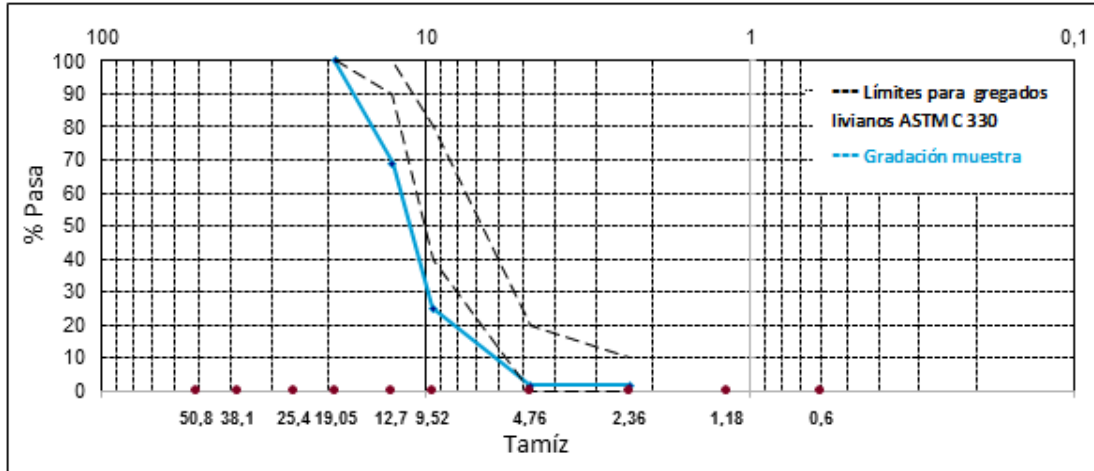


Figura 22. Curva de gradación de pumita

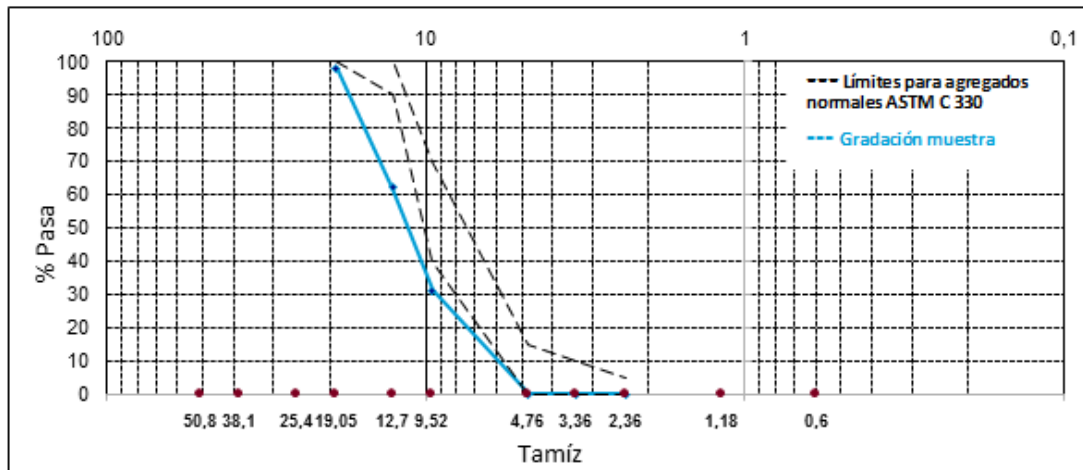


Figura 23. Curva de gradación de agregado convencional

Se ha estudiado que el tamaño de partícula de los agregados livianos afecta el espesor de la ITZ. En el trabajo de Elsharief et al, (2003), se estudia el espesor de la ITZ de concretos de pumita de tamaño entre 4.75 – 2.36 mm, usado como agregado grueso y 150 – 300 µm usado como agregado fino. Encuentra que el tamaño de los agregados tiene una influencia en el espesor de la ITZ si se estudia el espesor en función del gradiente de porosidad. Sin embargo el espesor está ligado también a la A/C, la reducción del tamaño de los agregados parece reducir el espesor ITZ cuando se tienen A/C de 0.4, mientras para A/C de 0.55 el tamaño del agregado de pumita no parece ser significativo en el espesor de la ITZ.

Cuando se estudia el espesor de la ITZ basado en el contenido de partículas de cemento sin hidratarse, el efecto de reducir el tamaño del agregado tiende a reducir el espesor ITZ a edades tempranas de curado, a edades tardías el efecto del tamaño de los agregados parece ser insignificante.

Para los agregados utilizados en este proyecto, de las Figuras 20, 21, 22 y 23, debido a la dispersión de los agregados dentro del intervalo para ser usados en la producción de concretos livianos y para minimizar el efecto del tamaño del agregado sobre el espesor de

la ITZ, se decidió utilizar sólo los tamaños pasante del tamiz 3/8" (9.5 mm) y retenido en el tamiz N° 4 (4.76 mm), excluyendo los retenidos en los tamiz superiores e inferiores, la gradación se representa en la Figura 24, dónde el comportamiento de la gradación se ajusta a los límites de tamaño fino, y es careciente del tamaño grueso, propuestos por la ASTM C 330 para la producción de concretos livianos.

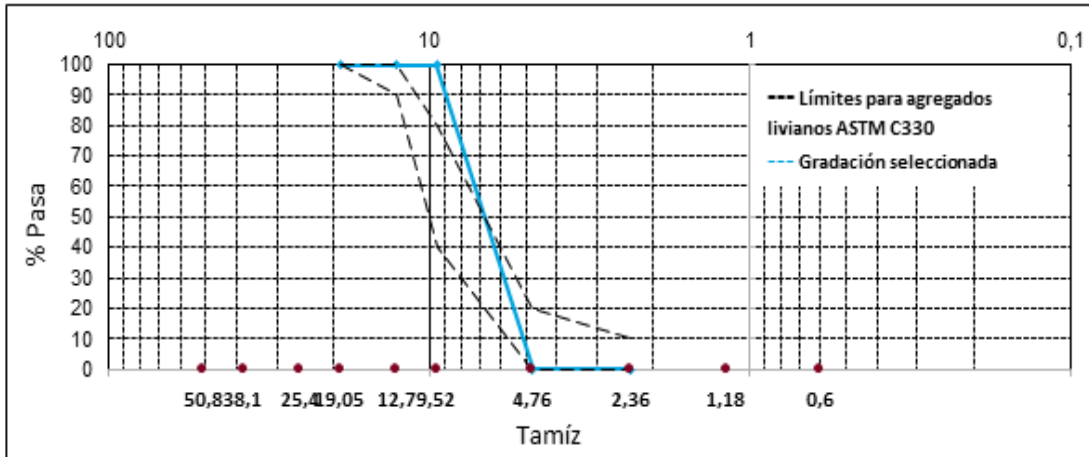


Figura 24. Curva de gradación seleccionada para todos los agregados

Micrografías ópticas y SEM

La pumita y perlita, corresponden a agregados de origen volcánico, Figura 25 y Figura 26 de forma angular irregular, son agregados producto de rocas ácidas por su color claro y composición de $\text{SiO}_2 > 65\%$, (Melgarejo 2003); valor que se valida en la Tabla 12, de superficie rugosa, de textura vacuolar o escoriácea, en su estructura la pumita presenta vesículas de morfología variada Figura 25 B, a causa de la desgasificación de los flujos de lava en el proceso de solidificación del magma. La estructura de la perlita está constituida por estratos, entre los que se encuentra el agua intersticial y en el proceso de deshidratación formaron poros ovalados interconectados de tamaño distinto, Figura 26 B.

La Figura 27, agregado aliven, corresponde a una arcilla expandida térmicamente, de forma esférica, superficie áspera, en su mayoría se trata de esferas en su interior porosas rodeados por una capa vitrificada color marrón de espesor variable de menor porosidad (Figura 27 B).

El agregado convencional de conasfaltos Figura 28, corresponde a una grava triturada con cantos de roca ovalados, de formas angular y redondeado, de superficie en su mayoría lisa, textura afanítica observada en la Figura 28 B, su estructura exhibe menor porosidad en la superficie al compararla con la pumita y perlita, por esto posee menor absorción de agua, solo del 1.5% (Tabla 21).

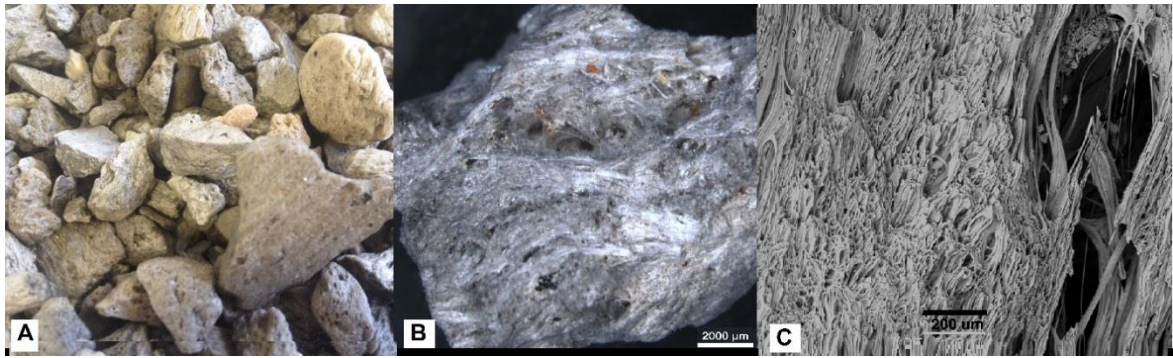


Figura 25. Agregado liviano pumita, A) Escala real, B) Micrografía de Estereoscopio, C) SEM.

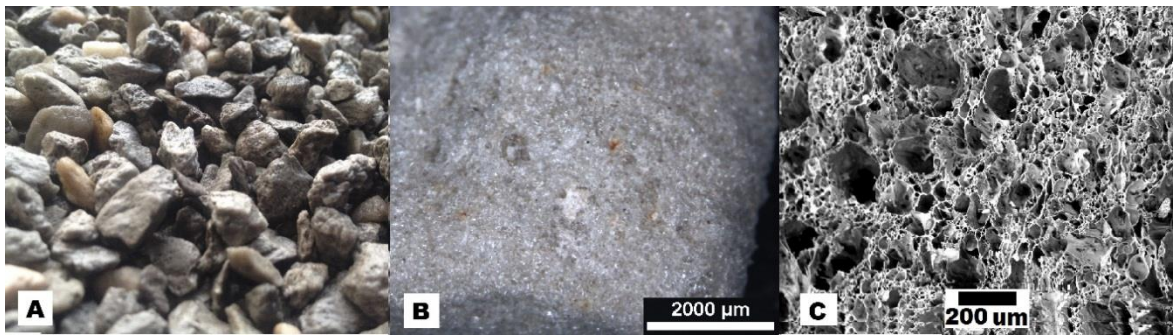


Figura 26. Agregado liviano perlita A) Escala real, B) Micrografía de Estereoscopio, C) SEM.

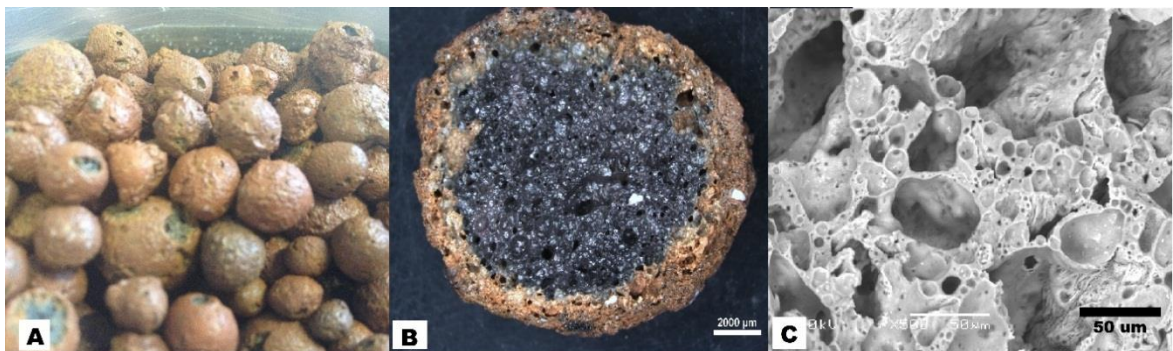


Figura 27. Agregado liviano aliven. A) Escala real, B) Micrografía Estereoscopio, C) SEM.

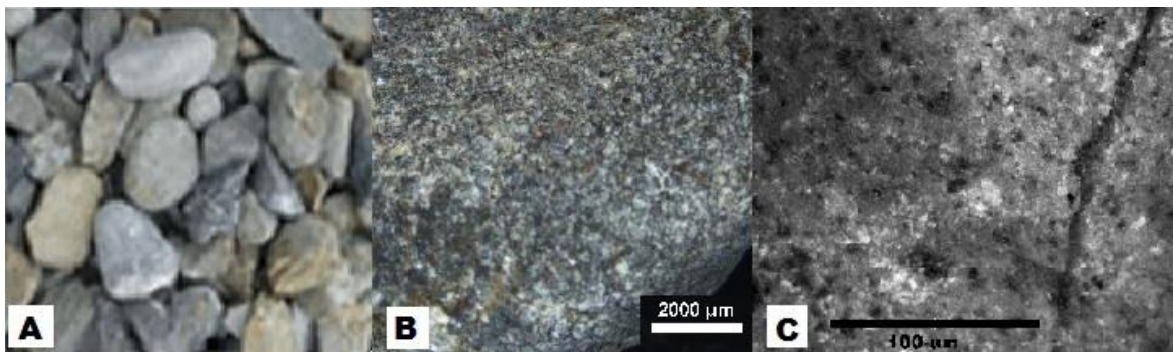


Figura 28. Agregado convencional, A) Escala real, B) Micrografía Estereoscopio, C) SEM

La textura superficial de los agregados depende de la naturaleza de la roca de origen, de su dureza, tamaño de los granos, porosidad, así como de las acciones a que hayan estado sometidos los agregados (procesos de meteorización).

Autores como Hong et al, 2014, señalan que la microestructura de la ITZ depende de las características de los agregados, tamaño, forma y textura de la superficie de los agregados, encontrando que al aumentar la rugosidad de los agregados aumenta la cohesión interfacial de los agregados con la matriz.

Las micrografías de las Figuras 25, 26, 27 y 28 exhiben cuatro agregados de forma, superficie y microestructura distintas, con potencial de absorción de agua mayor para la pumita y perlita que poseen estructura porosa en su superficie, que al observarla al interior se trata también de poros interconectados que pueden lograr una migración de agua tanto al interior de la misma. Para el alivén, la capa semi vitrificada de menor porosidad puede impedir la migración de agua al interior, así en su estructura interna posea poros de mayor tamaño para almacenamiento de agua.

Rao & Prasad, 2002, encuentran que la rugosidad de la superficie del agregado tiene una influencia significativa en la tenacidad a la fractura de la interfaz. En otro trabajo de los mismos autores, reportan que la resistencia al cizallamiento en la interfaz aumenta a medida que la rugosidad de la superficie del agregado aumenta.

Índice forma y textura

El número de angularidad sugerido por Shergold, (1953) es una obra pionera en la evaluación de la forma de los agregados, utilizando el concepto de densidad de empaquetamiento (es decir, la fracción de volumen), del cual se han adaptado las normas ASTM D 3398 y British Standards (BS 812, 1975). Sin embargo, el método tiene varias limitaciones, da resultados contradictorios cuando se miden agregados de formas irregulares, además, la compactación (por peso) aplicada puede causar trituración así como cambios artificiales en la textura de la superficie del agregado y con ello afectar valor del índice de angularidad. Hu, J., & Stroeven, 2006.

Se realizó el ensayo mediante la norma ASTM D 3398. Este método de ensayo proporciona un valor de índice de la relación de forma de las partículas de agregados y las características de textura de los agregados. La fórmula 1 representa el índice de forma y textura, las fórmulas, 2 y 3 corresponden al volumen de vacíos de los agregados para 10 y 50 caídas por capa de compactación requeridos en el cálculo del índice de forma.

$$I_a = 1.25 V_{10} - 0.25V_{50} - 32 \quad \text{Fórmula 1}$$

Donde;

I_a = Índice de forma y textura (%)

V_{10} : Volúmen de vacíos de los agregados compactados 10 caídas por capa nidad (%)

V_{50} : Volúmen de vacíos de los agregados compactados 50 caídas por capa, unidad (%)

$$V_{10} = [1 - (M_{10}/sv)] \times 100 \quad \text{Fórmula 2}$$

$$V_{50} = [1 - (M_{50}/sv)] \times 100 \quad \text{Fórmula 3}$$

Donde;

M_{10} : Promedio de masa de los agregados en el molde, compactados 10 caídas por capa. (g)

M_{50} : Promedio de masa de los agregados en el molde, compactados 50 caídas por capa. (g)

s : Gravedad específica del agregados

v : Volumen del molde cilíndrico (ml)

Las diferencias en la forma de las partículas de los agregados y la textura de la superficie, afectarán las propiedades del concreto fresco y endurecido. En el concreto fresco, el contenido de vacíos en la matriz y las propiedades de fricción de los agregados en la mezcla, a su vez, las proporciones de materiales en la dosificación de los concretos. Kwan & Mora, (2001).

Sabemos que las partículas de los agregados son cuerpos de tres dimensiones y es difícil describir la forma de las mismas, aunque se las puede clasificar en redondeadas o cantos rodados, que son generalmente procedentes de ríos en las que por rozamiento se eliminan las partes salientes de las mismas; y las angulosas que son las que presentan ángulos, aristas vivas y superficies más o menos planas, procedentes generalmente de trituraciones; planas o laminares en las que predominan dos dimensiones sobre la tercera y aciculares que son las que predomina una dimensión sobre las otras dos dando lugar a agregados en forma de agujas (Acosta et al, 2014).

En la Tabla 19, se describen los valores de índice de forma y textura de los agregados para la fracción de trabajo seleccionada, 9.5 – 4.76 mm.

Tabla 19. Índice de forma y textura

Agregado	I_a (%)
Aliven	23.9
Perlita	19.6
Pumita	21.2
Conasfaltos	24.8

Los valores para los índices de relación de forma y textura de los agregados indican que el mayor es para los agregados de conasfaltos, 24.8 %, seguido del aliven 23.9 %, pumita 21.2 % y finalmente perlita 19.6 %. Para la perlita y pumita el índice es similar y menor al del aliven y convencional, su forma de bloques angulares menos definidos, con caras poco planas y de aristas romas difícilmente distinguibles que se pueden apreciar en la Figura 29 para la pumita y en la Figura 30 para la perlita. Adicional por poseer mayor rugosidad en su superficie que se puede verificar por el área superficial de la Tabla 20.



Figura 29. Formas de agregado pumita

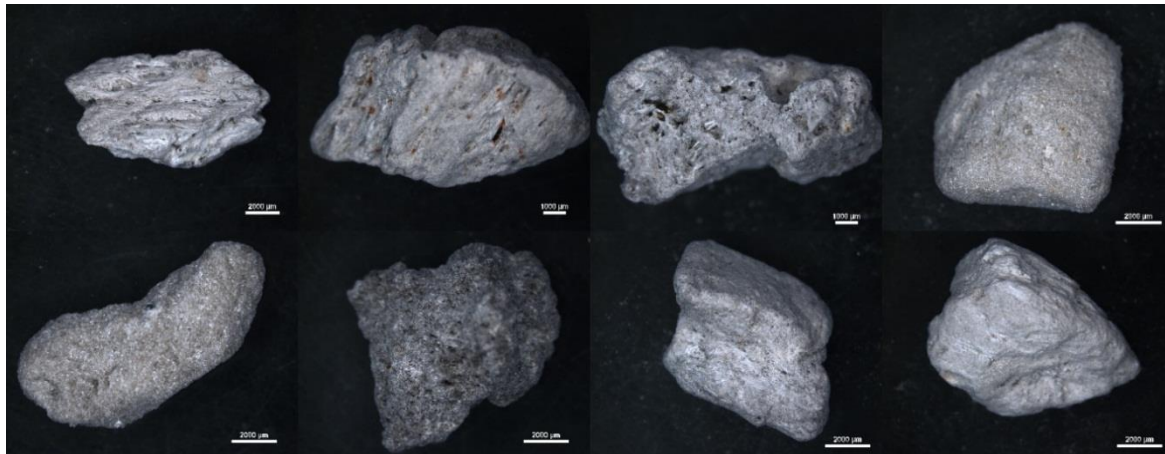


Figura 30. Formas para el agregado perlita

En la Figura 31 se expone la morfología del agregado aliven, de forma esférica principalmente, y algunas partículas ovaladas, en la superficie una capa vitrificada, la variación de la morfología de las esferas es debida al proceso de expansión en el horno rotatorio.

El agregado convencional en Figura 32, se trata de una mezcla de partículas de formas ovaladas, angulares, producto del estado natural de explotación y partículas angulares producto de trituración, logrando un valor similar del índice de forma del aliven para los cuales, valores cercanos al 27,3%, Jamkar & Rao, (2004) indican partículas de forma esférica.

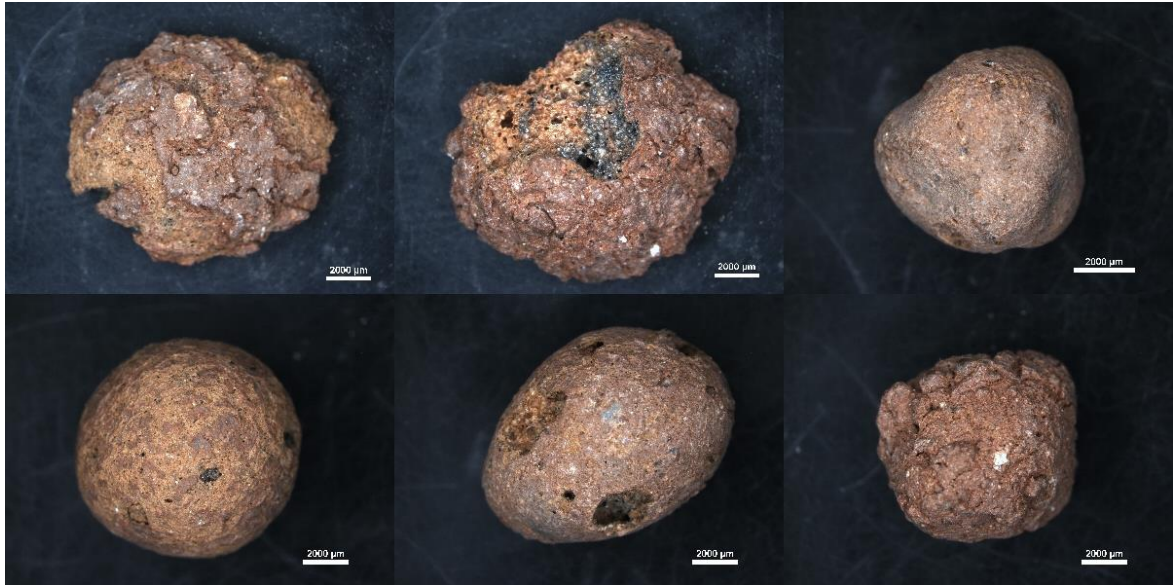


Figura 31. Formas para agregado aliven



Figura 32. Formas para agregado conasfaltos

En ausencia de información cuantitativa con respecto a la forma y textura de la superficie debido a que hay escasa normatividad, la dosificación de la mezcla se ha vuelto más o menos un proceso de ensayo y error. Por lo tanto, hay una necesidad de introducir los parámetros de forma y textura de la superficie del agregado como un parámetro a fin de reducir el procedimiento de ensayo y error involucrados en la dosificación la mezcla del concreto como se prevé en diversos códigos de dosificación de concretos. Jamkar & Rao, (2004). Sin embargo, se han logrado algunos avances en la medición de la forma de las partículas en los últimos años mediante el empleo el procesamiento de imagen digital (DIP) técnica para capturar y analizar la geometría de los límites de partículas. Pan & Tutumluer, (2007). Hu & Stroeven, 2006. Kwan & Mora, (2001).

Se puede esperar que, para la misma relación de factor de forma, el contenido de agua se incrementará en el caso de un agregado con una mayor rugosidad que estaría asociada a la forma inclusive del mismo y así de acuerdo a Rao & Prasad, 2002, su influencia sobre la microestructura de la ITZ.

Área superficial de agregados

Mediante el análisis de área superficial, se obtuvieron valores del área superficial calculada por el método Stephen Brunauer-Paul Hugh Emmett y Edward Teller (BET). La información obtenida a partir del volumen adsorbido de las isotermas de nitrógeno, permite determinar el área superficial y volumen de poros en las muestras.

El área superficial de la Tabla 20, indica que los agregados livianos poseen un área superficial mayor debido a su forma, rugosidad de la superficie y la porosidad; siendo mayor la de perlita y pumita seguidos del aliven, validando su angularidad y alta porosidad en su superficie.

El agregado convencional corresponde a material de mezcla de partículas ovaladas, planas y angular por ser un material con mayor gravedad específica el tamaño de poros en la superficie es bajo comparado con los agregados livianos y por tanto poseen menor rugosidad que se observa en la medida de menor área superficial.

Tabla 20. Área superficial agregados

Agregado	Área superficial (m² /g)	Volumen de poro (cm³ /g)
Pumita	2.10	0.0036
Perlita	1.81	0.0018
Aliven	1.13	0.0012
Conasfaltos	0.78	0.0002

* Tamaño de partícula 8 mm

Los perfiles de las Figuras 35 y 36, exhiben las rugosidad de un corte para los distintos agregados, los perímetros del corte corresponden para la pumita y perlita 11580 μm , 10030 μm , 8760 μm para el aliven y 6330 μm para el convencional, validando los resultados para el área superficial de la Tabla 20. Los resultados del perímetro de los perfiles están relacionados con el área de la imagen, los agregados seleccionados poseían un tamaño de grano cercano a los 6 mm, el agregado convencional era de tamaño de 8 mm, por lo cuál el valor para el perímetro del agregado convencional es cercano si se compara con el aliven, entonces el aliven posee un perímetro mayor respecto al convencional pero menor a la pumita y perlita, al relacionar estos con la porosidad observada de los agregados de las imágenes de SEM de las Figuras 25 C, 26 C y 27 C, se pueden validar que a mayor porosidad superficial de los agregados, mayor rugosidad de los agregados (Imágenes de los perfiles de agregados), por tanto mayor área superficial, Tabla 20. El área superficial como el volumen de poro es un indicador de mayor adherencia de los agregados livianos en la matriz cementante, propiedad importante en el comportamiento mecánico de los concretos.

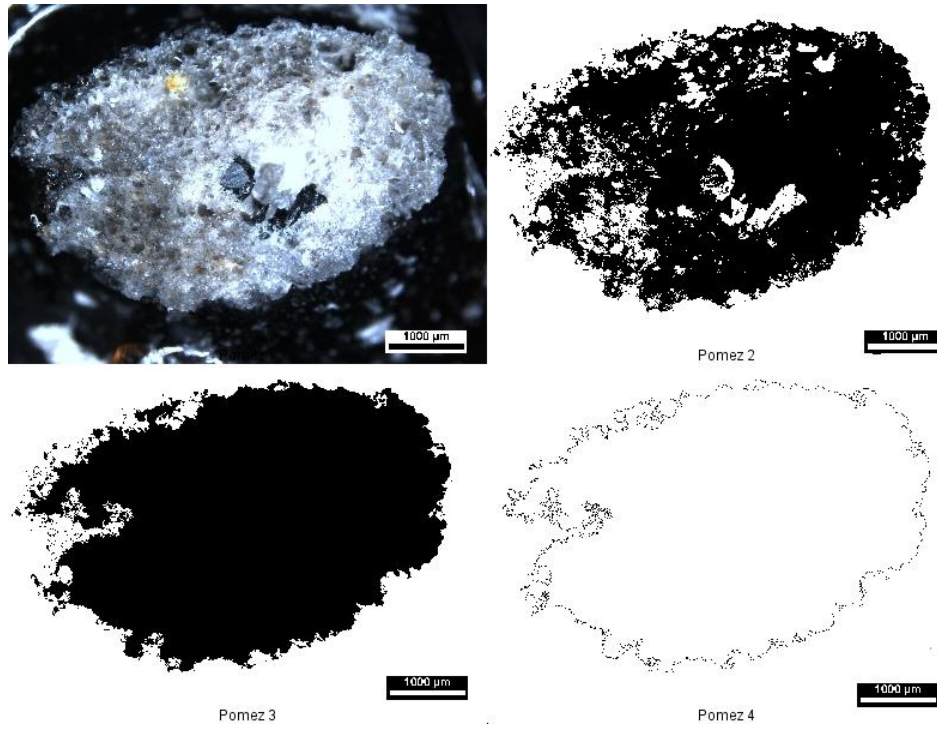


Figura 33. Perfil rugosidad agregado pumita

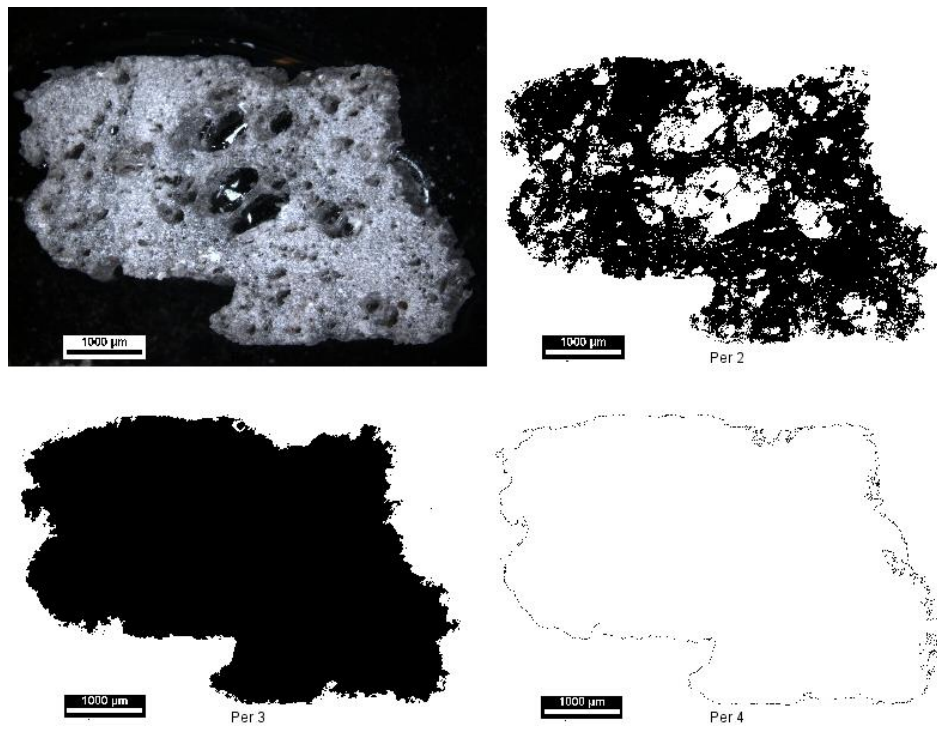


Figura 34. Perfil rugosidad agregado perlita

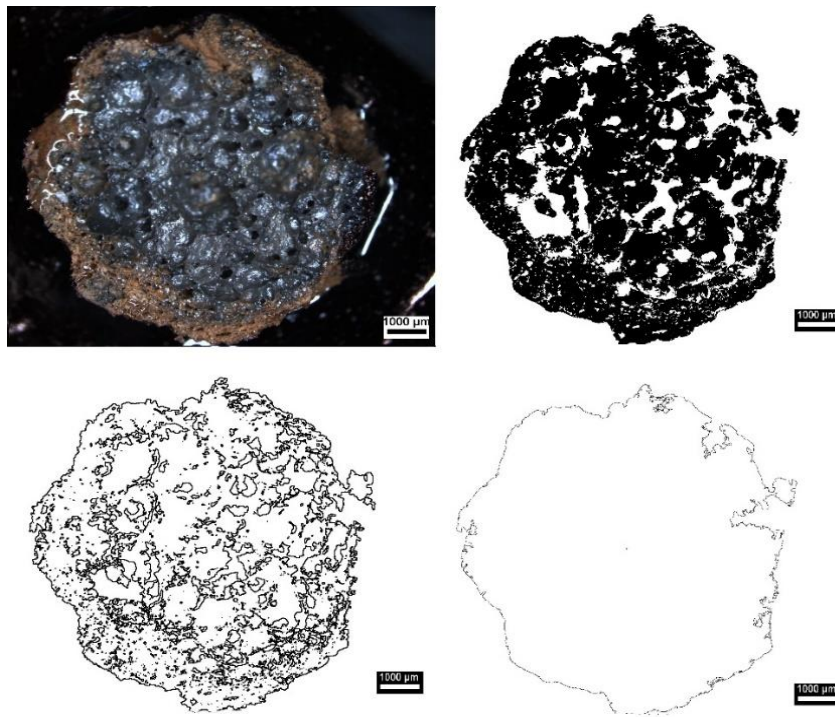


Figura 35. Perfil rugosidad agregado aliven

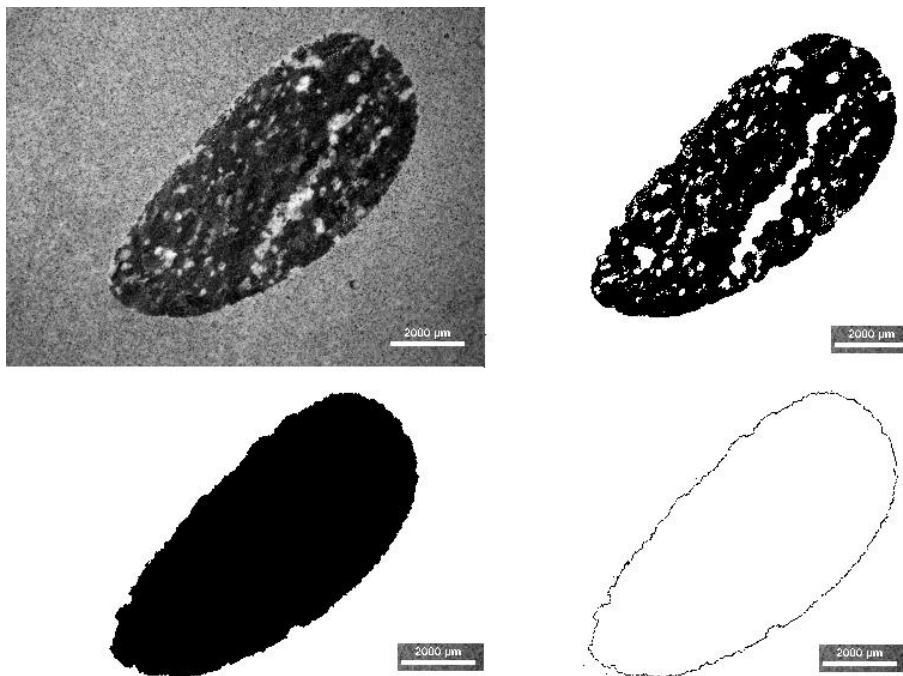


Figura 36. Perfil rugosidad agregado convencional

4.1.4 Propiedades físicas de los agregados

Densidad y absorción

Se realizó ensayo de absorción de agua de acuerdo a las especificaciones de la ACI 211.2, y densidad según la ASTM C 127.

La Figura 37 muestra la absorción antes y después de 24 horas de inmersión en agua. Los agregados livianos de origen volcánico, perlita y pumita poseen una absorción mayor que el aliven, debido a la porosidad y tamaño de poros capilares que poseen en su estructura, seguida del convencional que fue el menor valor para absorción de agua.

La absorción de los agregados livianos de acuerdo a la Tabla 21 correspondiente a la saturación de agua de los poros de tamaño capilar durante un período de tiempo de 24 h, muestran un mayor valor de absorción para los agregados de origen volcánico, perlita y pumita debido a la mayor porosidad de la superficie, además son agregados vesiculares de poros interconectados en su estructura, descrita mediante el análisis digital de imágenes.

Para el agregado aliven por tratarse de un material poroso en su interior con tamaños de poros capilares, la absorción es menor, debido a que, en la capa exterior de su estructura el tamaño y volumen de poros es menor, inhibiendo la migración de agua al interior del agregado. El agregado convencional, posee absorción mucho más baja respecto a todos los agregados livianos, debido a su estructura cristalina definida, es un material muy denso de muy baja porosidad, como se observó en el DRX y en las micrografías de la Figura 28.

Tabla 21. Densidad y absorción

Agregado Liviano	Absorción (%)	Densidad (kg/m³)
Pumita	44.0	304.8
Perlita	42.0	305.5
Aliven	10.3	519.9
Convencional	1.5	1636.0

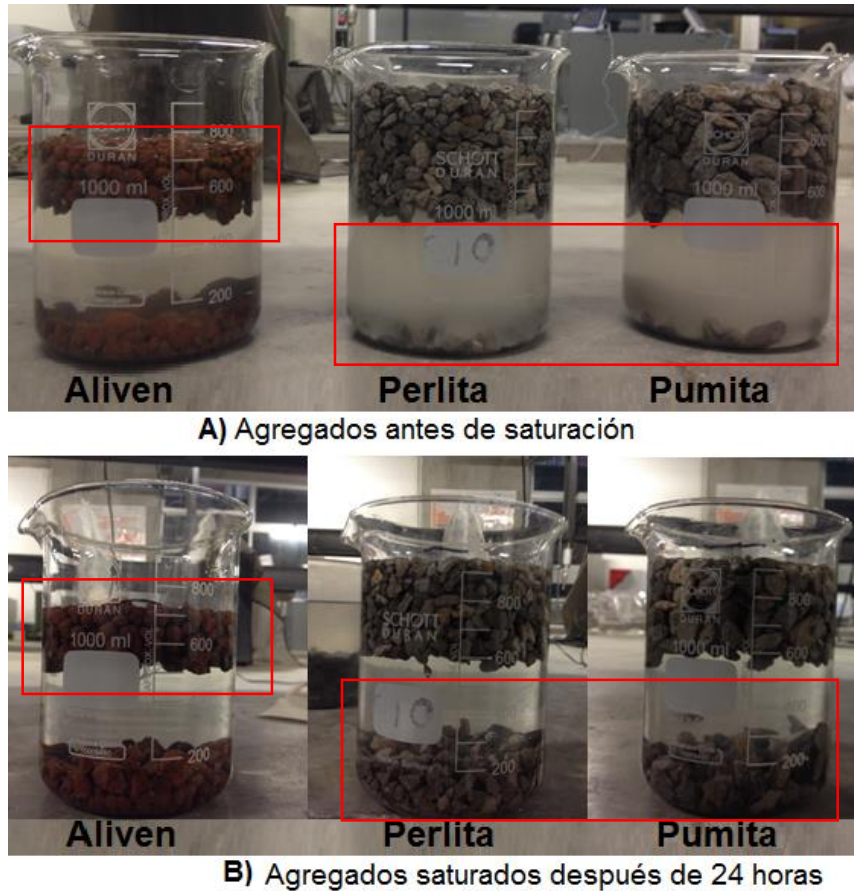


Figura 37. Absorción de agua de agregados después de 24 horas

Análisis digital de imágenes para porosimetría (DIP)

Se realizaron cortes de secciones de espesor aproximado de 2 mm de un agregado representativo de aliven, pumita y perlita de tamaño entre 9,5 a 4,36 mm. Figura 38. Una vez realizados las secciones delgadas para cada agregado, se tomaron alrededor de 200 microfotografías a iguales condiciones de ajuste de aumentos en el estereoscopio, (8X), apertura focal y similar histograma de escala de blancos y negros.

La Figura 39 presenta un mosaico de 4 imágenes, característico para la medida de porosidad por análisis digital de imágenes del agregado pumita, así como en la Figura 40 para la perlita y en la Figura 41 para el aliven. Las imágenes en la parte inferior en escala de blanco y negro corresponden al tratamiento digital mediante la herramienta Image J, la herramienta transforma la imagen original en escala de grises y los convierte en negro el cual corresponde al área de poros.

El tratamiento digital de imágenes logra describir el área de poros de una sección del agregado, al sumar todas las imágenes se busca recrear el contenido de poros de un agregado completo. La Tabla 22, resume el análisis de porosimetría por área examinada y el contenido de poros de cada agregado, el mayor valor de 70.3% corresponde al agregado aliven, debido a que es una arcilla expandida y el tamaño de poros es mayor al interior de su estructura y forma redondeada, esta morfología de poros poco interconectados de la estructura interna, es producto de la liberación de gases en el

proceso de expansión, aunque sea el agregado con mayor área de poros en su estructura interna, la absorción es menor debida a la capa que los recubre que inhibe la migración de agua al interior.

Para la pumita el área de poros corresponde al 63.2 %, seguido de la perlita con el 61.8%, la morfología de los poros es irregular, algunos de ellos interconectados, con variedad de tamaños. Esta morfología interna de los poros en la pumita y perlita, hace posible su alta absorción del 44% y 42%.

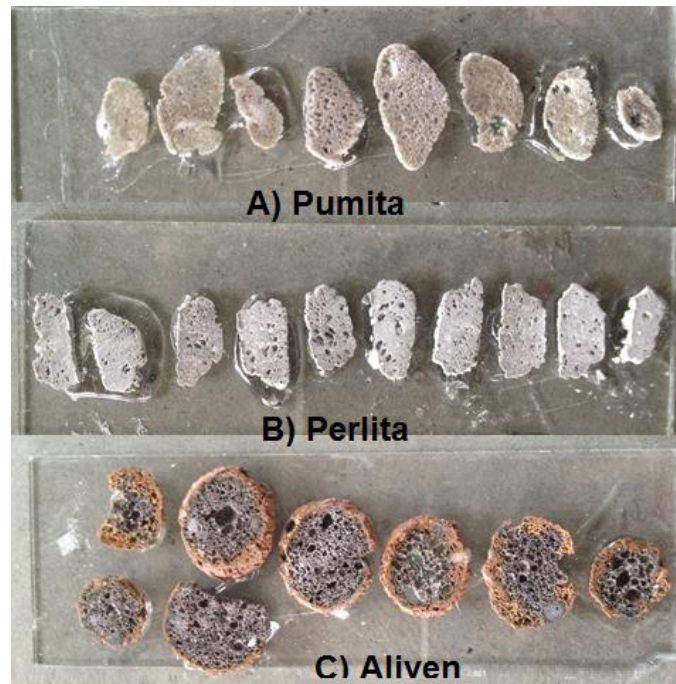


Figura 38. Secciones delgadas para toma de micrografías análisis de porosimetría

Tabla 22. Porcentaje de porosimetría mediante DIP

Agregado	Área analizada (μm^2)	Promedio área poros (μm^2)	Área poros (%)
Aliven	405,120,000	285,475,038	70.5
Pumita	284,160,000	179,454,425	63.2
Perlita	293,760,000	181,686,377	61.8
Convencional	3230720	90460	2.8

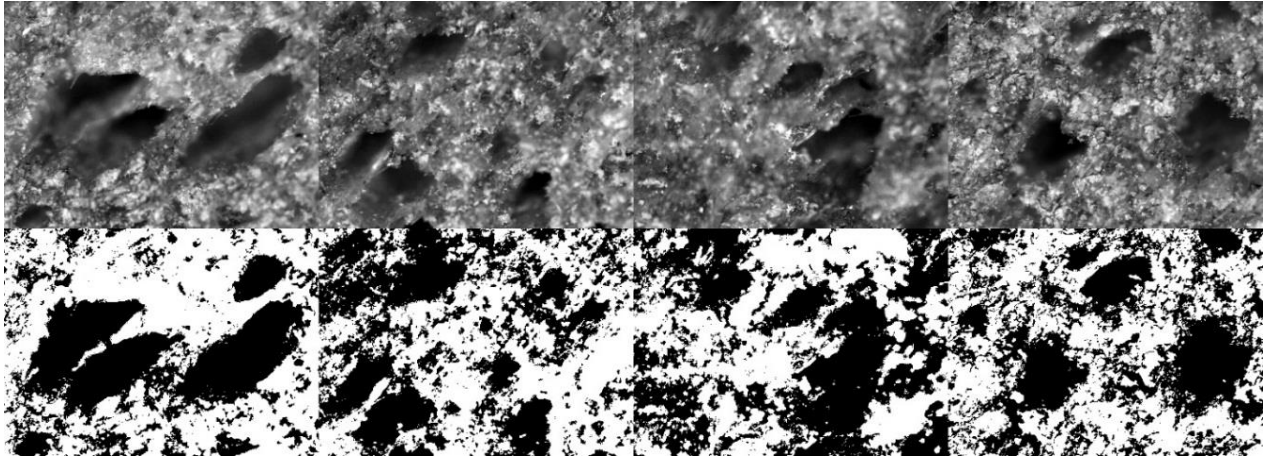


Figura 39. Análisis digital de imágenes típicas para porosimetría de pumita

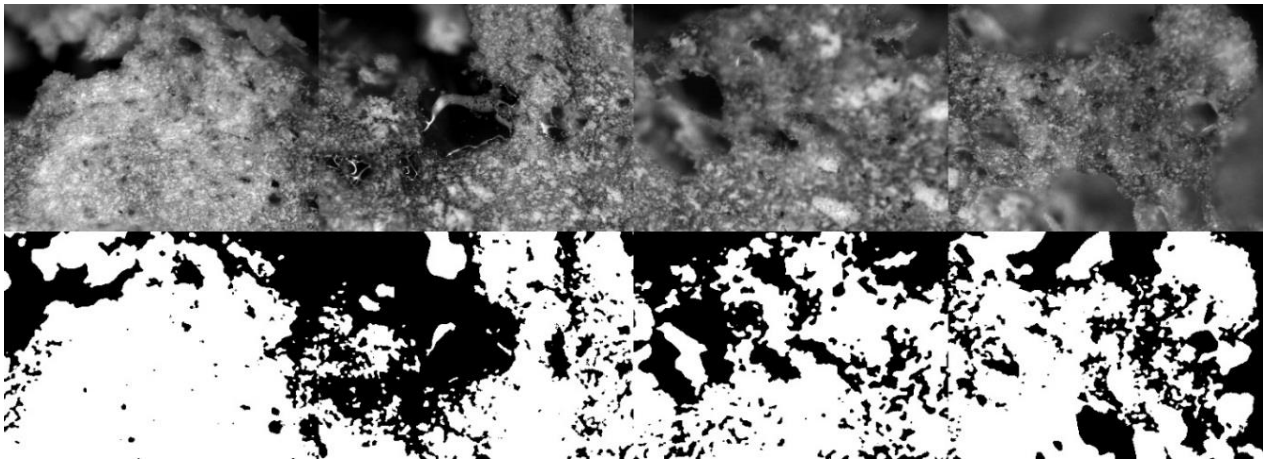


Figura 40. Análisis digital de imágenes típicas para porosimetría de perlita

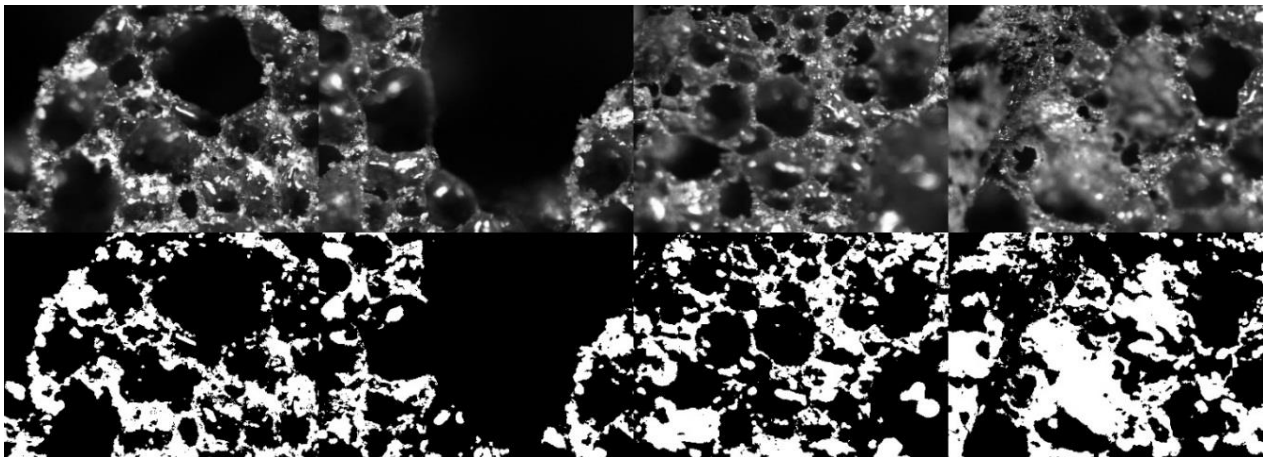


Figura 41. Análisis digital de imágenes típicas para porosimetría de aliven

4.2 Morfología de la ITZ

La formación de la ITZ puede darse por el “efecto muro”, en el cuál las partículas de cemento que están suspendidas en el agua de la mezcla, no pueden empaquetarse tan eficientemente cuando se encuentran en las inmediaciones de un objeto sólido mucho más grande, en este caso una partícula de agregado. Este efecto se magnifica en el concreto por las tensiones de cizallamiento ejercidas sobre la pasta de cemento por las partículas de agregado durante la mezcla, que tienden a hacer que el agua se separe de las partículas de cemento. El resultado es una región estrecha alrededor de las partículas de agregado con menos partículas de cemento y más agua, entonces la relación A/C en la pasta de cemento de la ITZ es mayor que la relación A/C del resto de la matriz cementate. (Ollivier et al 1995).

En las micrografías, Figuras 42, 43, 44 y 45 se observa la formación de ITZ alrededor de los distintos agregados en los concretos a 28 días de curado, la ITZ en las micrografías ópticas, corresponde a una aureola de color más claro que la matriz cementante, alrededor del contorno de los agregados, de un espesor delgado irregular.

En la Figura 42 se logra observar que en los agregados de pumita, el borde inicial de la ITZ es de difícil determinación, debido a la rugosidad de la superficie del agregado, este comportamiento también se evidencia en la Figura 43 para la perlita.

Una posible causa para la difícil determinación del borde de la ITZ en los bordes de los agregados de pumita y perlita es la porosidad superficial, que logra que los granos de cemento se alojen en estos poros e inicien su hidratación desde esta zona con la deposición de CH, (Hong et al 2014). Adicional el color de la mineralogía de los agregados de pumita y perlita junto con su porosidad, hacer parecer a la ITZ como parte del agregado, haciendo difícil determinar el borde de inicio, para medir el espesor.

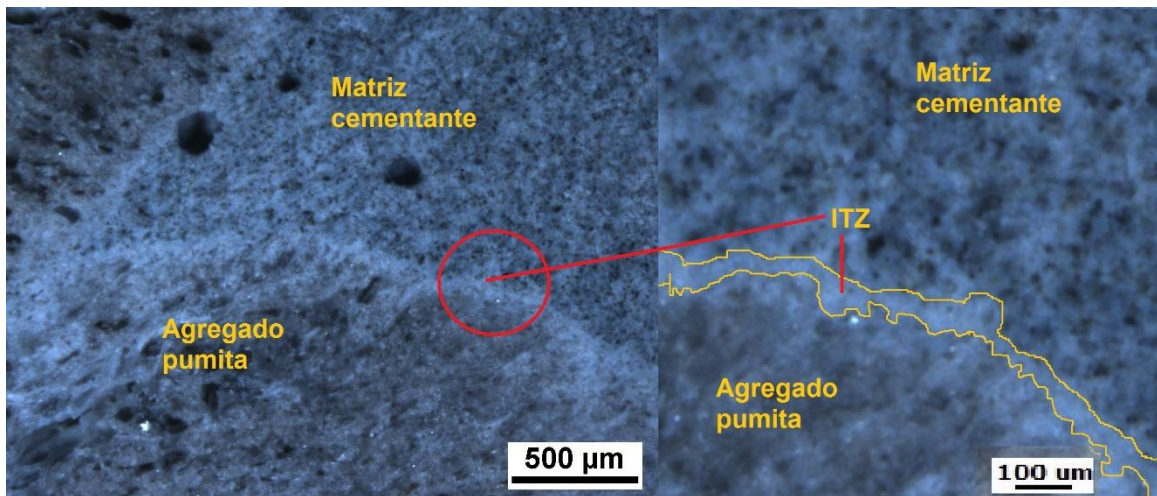


Figura 42. Formación de ITZ a 28 días de curado concreto de pumita

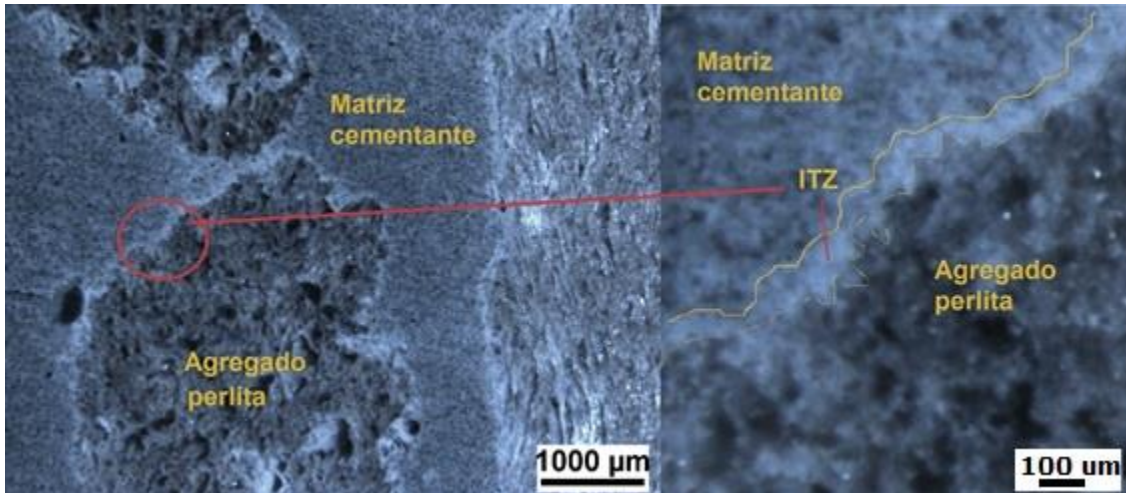


Figura 43. Formación de ITZ a 28 días de curado concreto de perlita

Para el agregado de aliven, en la Figura 44, la ITZ se logra observar más delimitada, debido al color del agregado y a su morfología esférica. Para los agregados convencionales la formación de la ITZ también es distinguible, como se puede observar en la Figura 45, el borde inicial se identifica debido al cambio en la textura del borde entre el agregado y la ITZ.

Alrededor de la ITZ en la matriz cementante, las micrografías permiten también observar la formación de poros, de tamaños capilares, a causa de la compactación del concreto en el molde en el proceso de fabricación de las probetas.

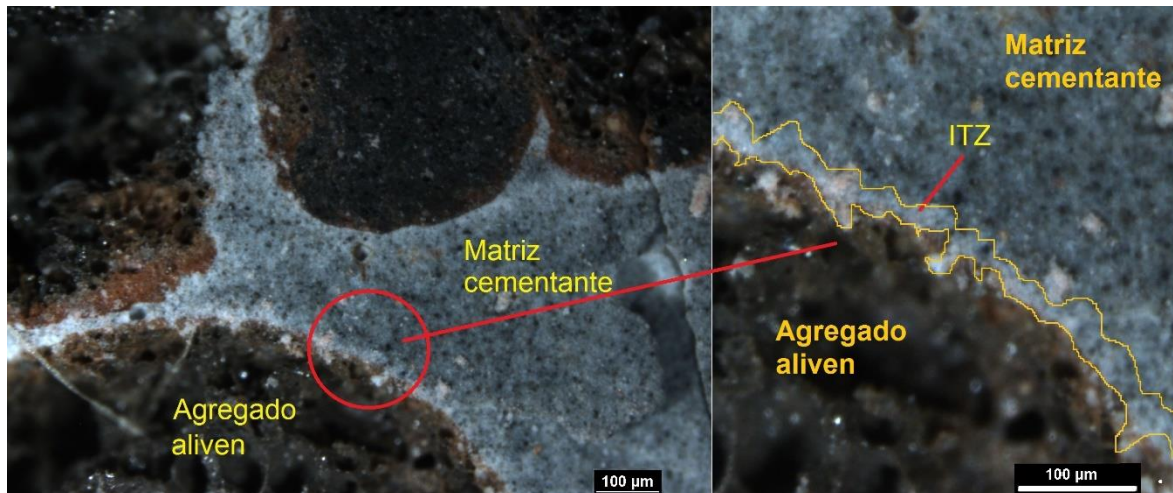


Figura 44. Formación de ITZ a 28 días de curado concreto de aliven

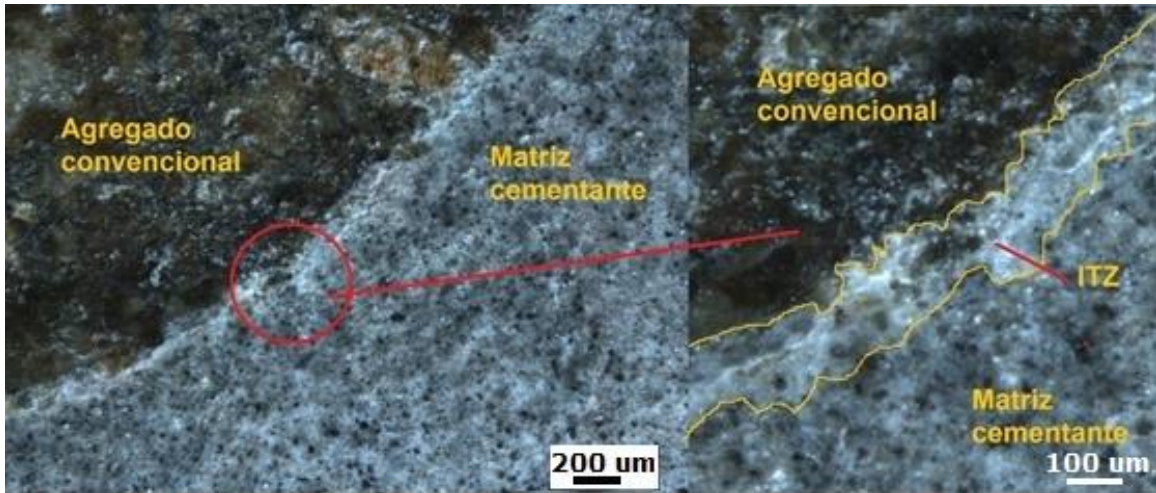


Figura 45. Formación de ITZ a 28 días de curado concreto de agregado convencional

Además del efecto muro, que contribuye a la microestructura de la ITZ, simulaciones digitales basados en imágenes de la ITZ de concretos, han identificado un mecanismo secundario activo en la formación de ITZ, llamado efecto de "crecimiento de un solo lado" Garboczi & Bentz, (1991). Como la hidratación se produce en regiones alejadas de la superficie del agregado, la porosidad se rellena con productos de hidratación que vienen de todas las direcciones. Sin embargo, cerca de una superficie del agregado, el crecimiento se produce sólo desde el lado de la pasta de cemento donde la porosidad disponible está llena de productos de hidratación que crecen en una sola dirección, estos productos de hidratación corresponden principalmente a CH, debido a que los iones Ca^{+2} poseen una movilidad relativamente alta en la solución tienden a difundirse en la zona más porosa de la ITZ (debido a gradientes de concentración más alto A/C en esta zona), dando lugar a la precipitación de hidróxido de calcio (CH) y productos de hidratación de aluminato tricálcico como etringita. Debido a que los iones de silicato y de ferrita tienen movilidades más bajas, tienden a formar productos de hidratación cerca de su fuente de disolución. Por lo tanto, el ITZ puede presentar fracciones de volumen de fase inferior de C-S-H.

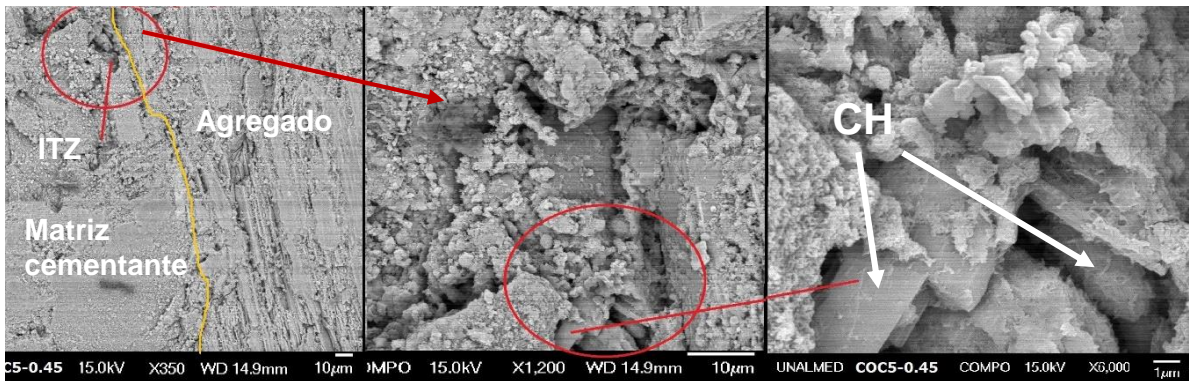


Figura 46. Micrografía de ITZ COC5-0.45 a 28 días de curado

La zona de interface tiene una microestructura con productos de hidratación del cemento con cristales más grandes de CH, pero menores que los de del resto de la matriz de cemento

hidratado, Zhang & Giorv, (1990); Neville, (1997). Éste fenómeno se puede observar en las micrografías de SEM de la Figura 46 para la ITZ del concreto de agregado convencional, en la

Figura 47 para la ITZ de concreto de perlita y en la Figura 48 en la matriz de concreto de perlita. En ambos casos el CH se encuentra cubierto por cúmulos de C-S-H. En la Figura 468, se puede observar adicional formación de C-S-H en la matriz a partir del CH de la mezcla del concreto de perlita.

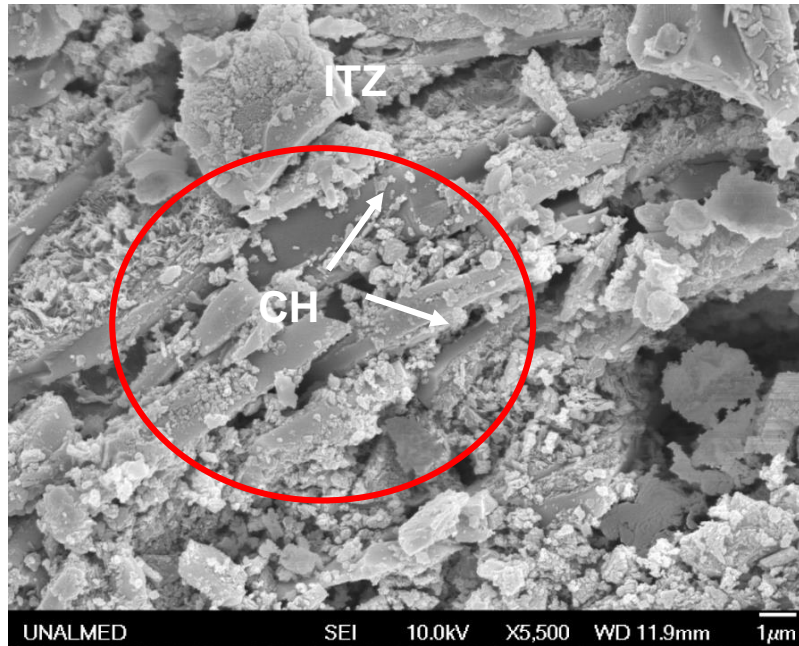


Figura 47. Micrografías de ITZ muestra PEC5-35 a 28 días de curado

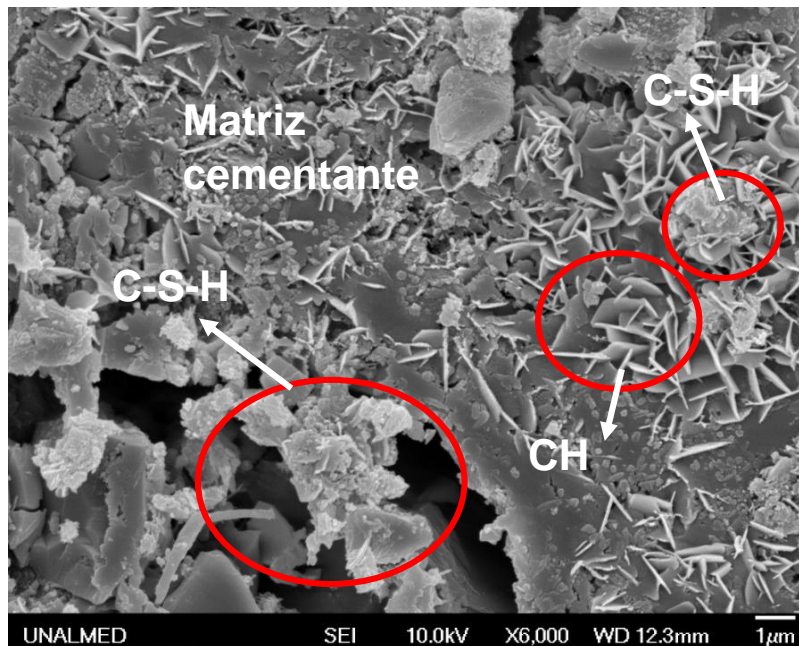


Figura 48. Micrografías de matriz cementante , PEC5-0.35 a 28 días de curado

Las Figuras 49 y 50 de SEM, muestran formación de C-S-H en la ITZ, dentro de los poros de los agregados livianos de pumita y perlita, se trata de cúmulos de C-S-H, la formación de esta fase se ve favorecida por el aumento de la A/C de la ITZ que se mantiene por el estado del agregado saturado al realizar la mezcla de concretos, así el efecto de exudación del concreto (migración del agua de la mezcla hacia la superficie del elemento estructural en el molde), no afecta la A/C en la zona de la ITZ, además los granos de cemento se logran depositar en los poros de la superficie del agregado liviano y favorece la hidratación y formación del C-S-H en la ITZ de estos concretos.

Adicional se observa un efecto de reacción puzolánica entre el agregado y el cemento, debido a los altos contenidos de silicio y a su baja cristalinidad para la pumita y perlita.

En el aliven, La temperatura de expansión puede provocar recrystalización de sus componentes, reduciendo posibilidad de reactividad puzolánica de la superficie de estos agregados.

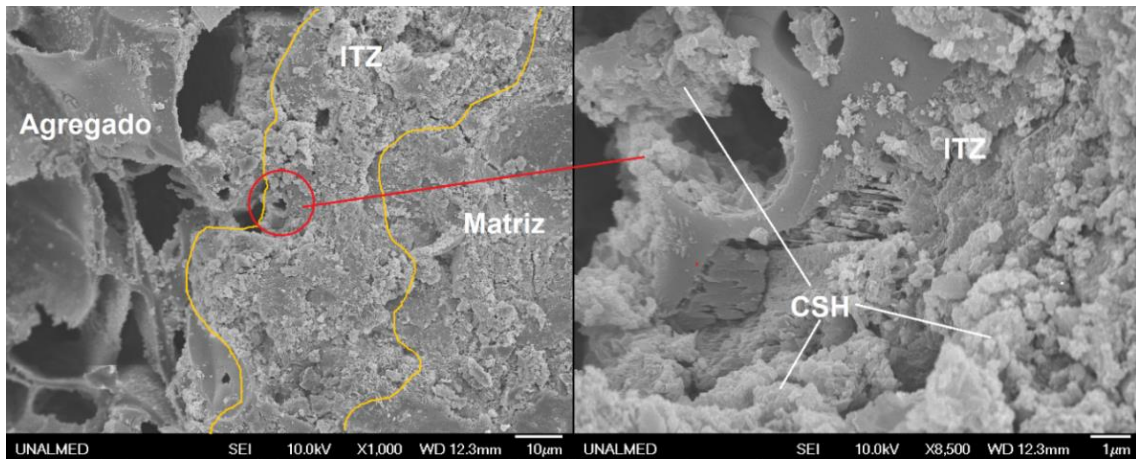


Figura 49. Micrografías reactividad puzolánica muestra PEC5-0.35 a 28 días de curado

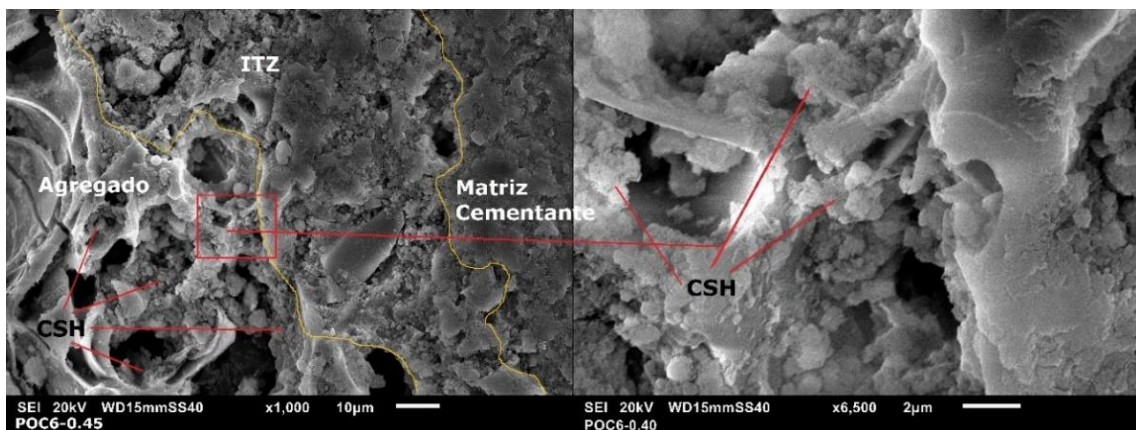


Figura 50. Micrografías reactividad puzolánica muestra POC6-0.45 a 28 días de curado

En la Figura 51 se puede observar que para los concretos de agregado convencional no hay una reactividad puzolánica entre el agregado y la matriz cementante. Los agregados de pumita, perlita tienen un alto contenido de aluminosilicatos, pero para el agregado convencional son aluminosilicatos de alto grado de cristalinidad, identificado en el análisis de DXR, en lugar de aluminosilicatos de bajo grado de cristalinidad, que los hacen no reactivos puzolánicamente.

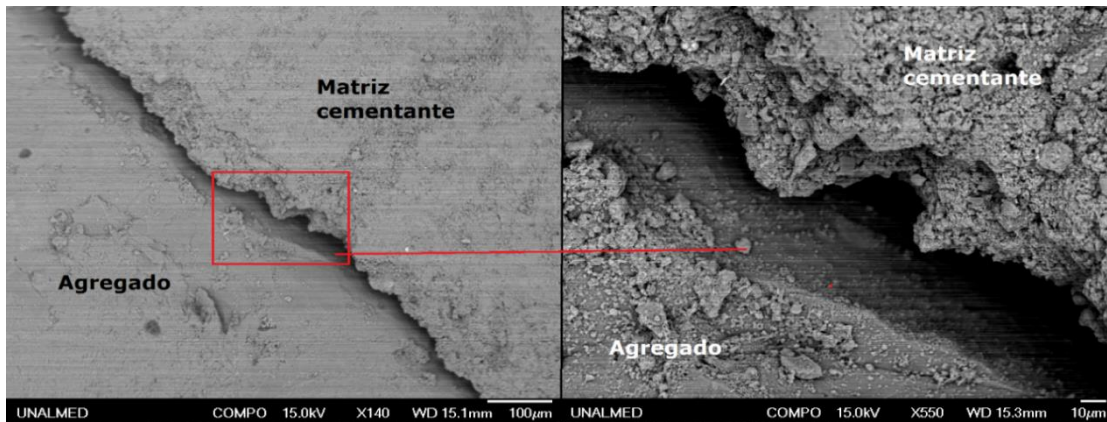


Figura 51. Micrografías de matriz cementante muestra COC5-0.45 a 28 días de curado

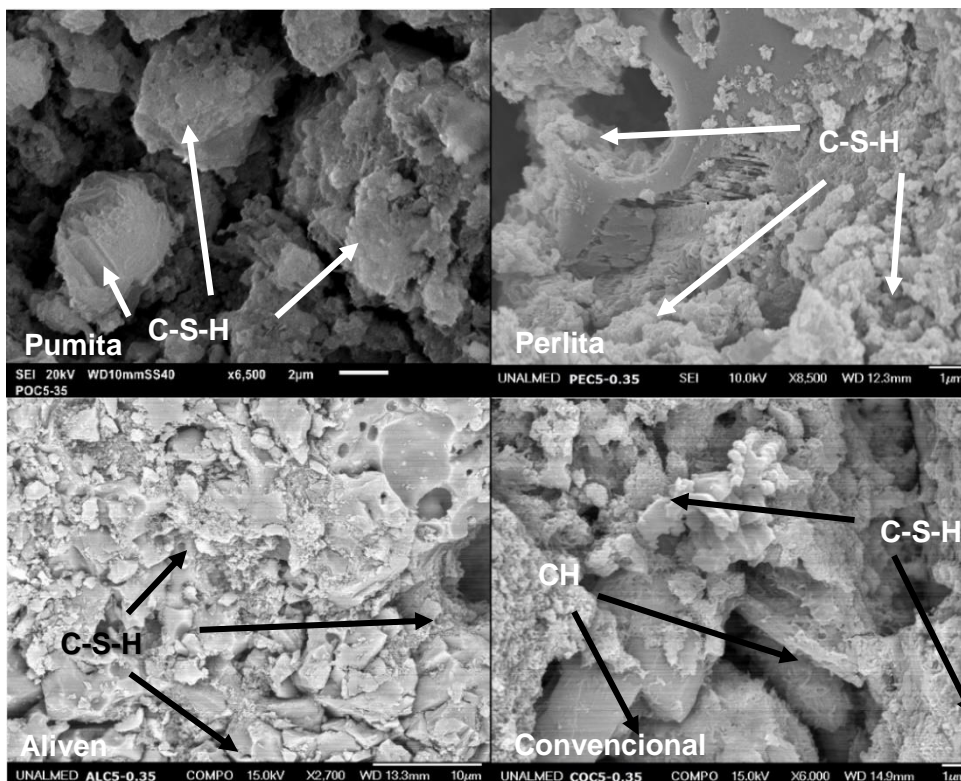


Figura 52. Morfología de ITZ para concretos C5-0.35

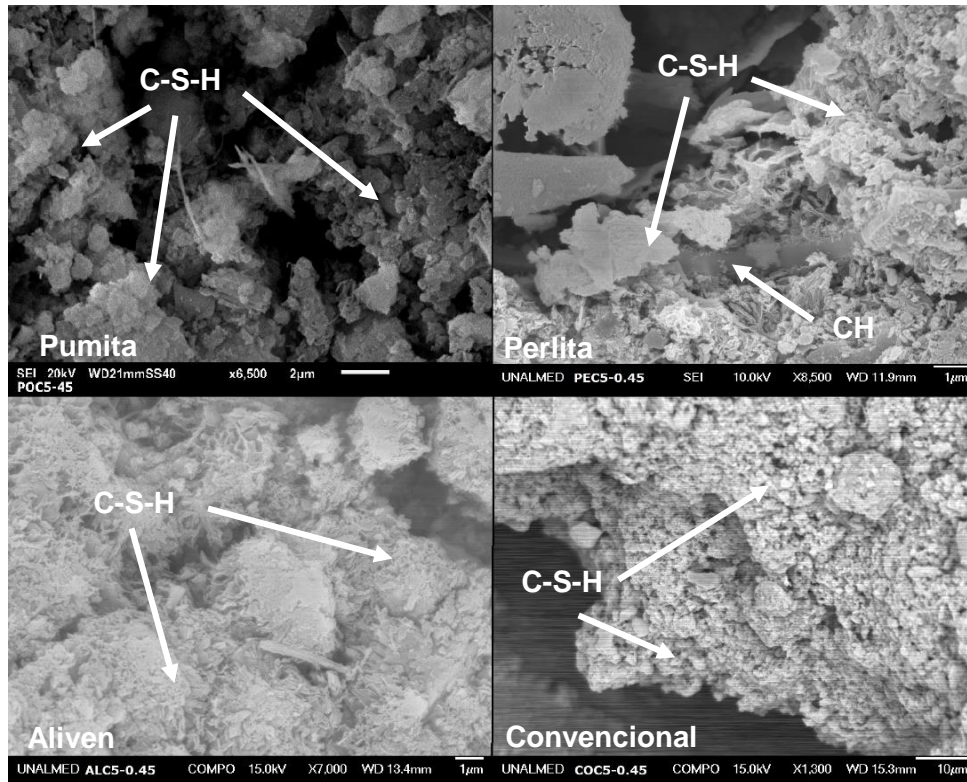


Figura 53. Morfología de ITZ para concretos C5-0.45

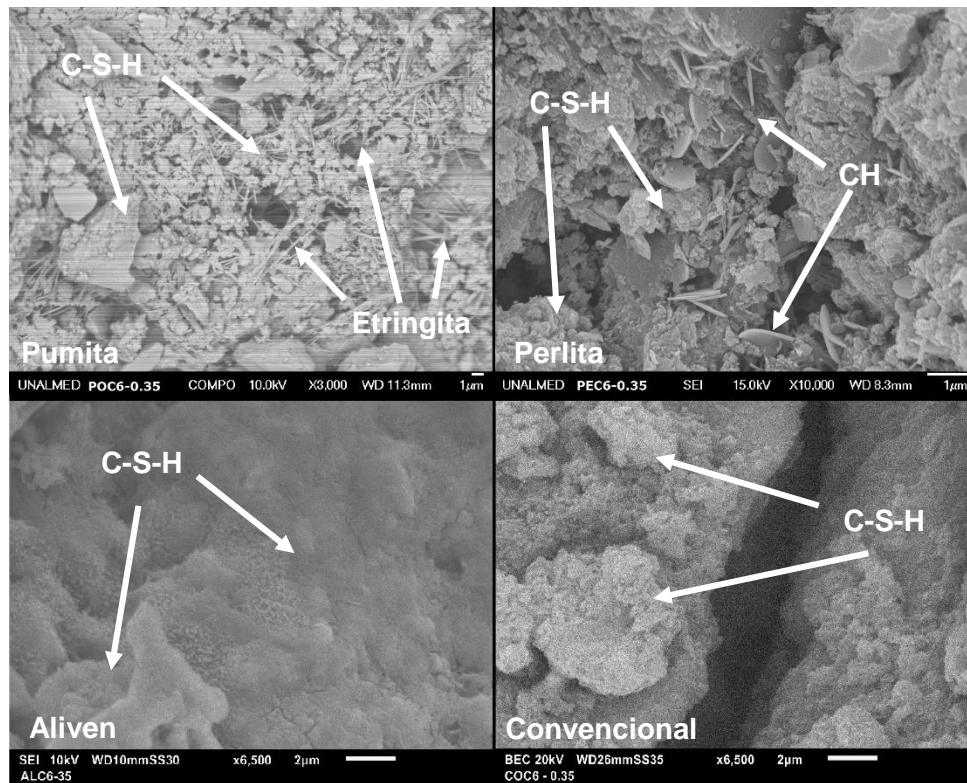


Figura 54. Morfología de ITZ para concretos C6-0.35

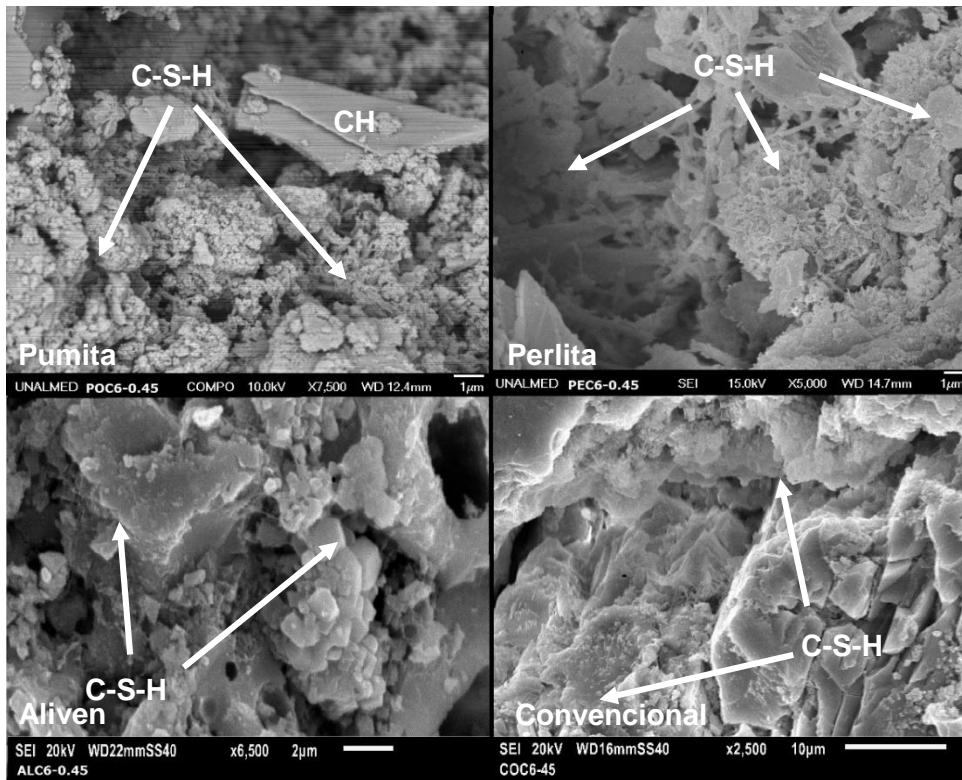


Figura 55. Morfología de ITZ para concretos C6-0.45

De la Figura 52 a la Figura 55 podemos observar que la formación de C-S-H en la ITZ, para las mezclas de pumita y perlita se observa formación de CH, fase característica de la ITZ, de nuevo para los agregados de pumita y perlita, la pasta de cemento o productos de hidratación del cemento pueden penetrar en las cavidades o poros en la superficie del agregado, actuando como varios "ganchos" de unión de la matriz y agregado, conocido como entrelazamiento mecánico, (Zhang & Gjrvv, 1990).

La reactividad química entre los agregados y la pasta son reacciones lentas (Bentur & Alexander, 2000). Por lo tanto, en el corto plazo la química de superficie debe ser tratada con más importancia, debido a que la interacción química afectará la microestructura de la ITZ a largo plazo.

4.3 Espesor de la ITZ

Una vez las muestras fueron preparadas, de acuerdo al numeral 3.4.2, se realizaron mediciones del espesor de la ITZ mediante microscopía óptica. Para cada muestra se tomaron alrededor de 100 mediciones, que incluían bordear los agregados en el caso que estos aparecieran completos en las muestras, las micrografías se tomaron para cada mezcla en dos y tres sub muestras, obtenidas por el proceso del numeral 3.4.2.

En las micrografías de la Figura 56 a la Figura 59 se exhiben algunas mediciones para los cuatro agregados en estudio, en cada micrografía se considera ITZ al bordeado alrededor del agregado, de color gris más claro que la matriz cementante, esta

identificación mediante microscopía óptica permitió realizar un barrido de toda la muestra, e identificar que dentro de la misma muestra el espesor es variable.

Para los agregados de pumita y perlita, el borde del inicio de la ITZ del lado del agregado es poco diferenciable, debido a la rugosidad de la superficie del agregado y a lo expuesto en el numeral 4.2. En algunas zonas, la ITZ entra hasta los poros de la superficie de los agregados, formando bahías de ITZ de mayor espesor, éste fenómeno se puede observar en la Figura 60 para el concreto de pumita, en la Figura 61 para el concreto de perlita y para el aliven en la Figura 62. También para el agregado de pumita, en las zonas donde los agregados presentan una superficie lisa, se observa una ITZ de menor espesor apreciable en el recuadro de la Figura 60.

En la medición del espesor, se encontró que algunas muestras reflejaban un bajo valor del espesor, pero distinguible que se lograba medir con las herramientas del software Image J, en el caso de no distinguirse claramente el espesor de la ITZ, ésta no se consideró cero y no se reportó este valor, únicamente se reportaron valores por encima 10 μm .

Al considerarse valores de cero en el análisis estadístico, hubiera incrementado la desviación estándar, así como la media de los resultados de cada muestra podría disminuir.

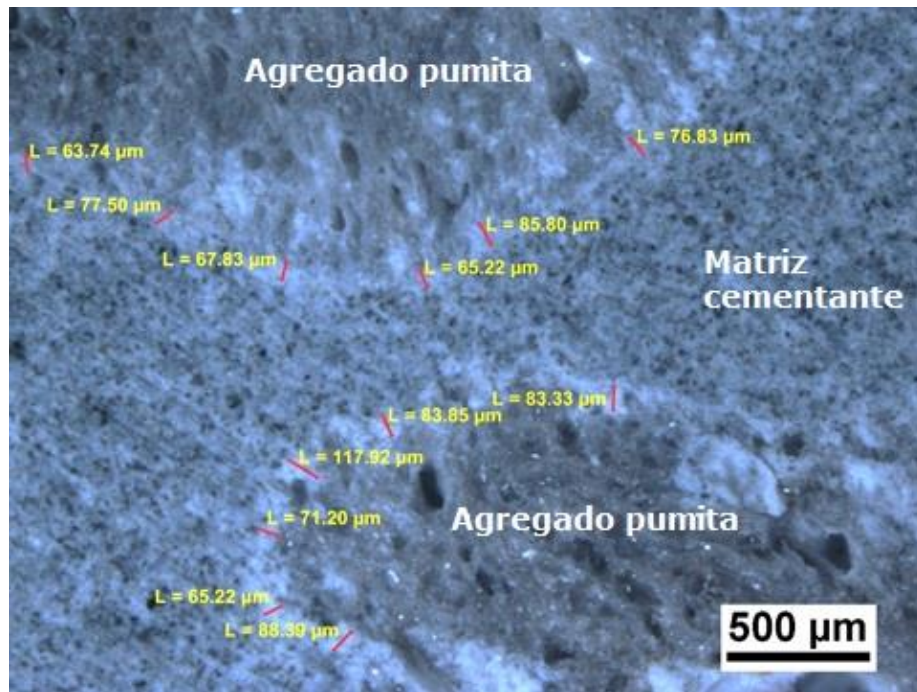


Figura 56. Micrografía espesores ITZ concreto pumita

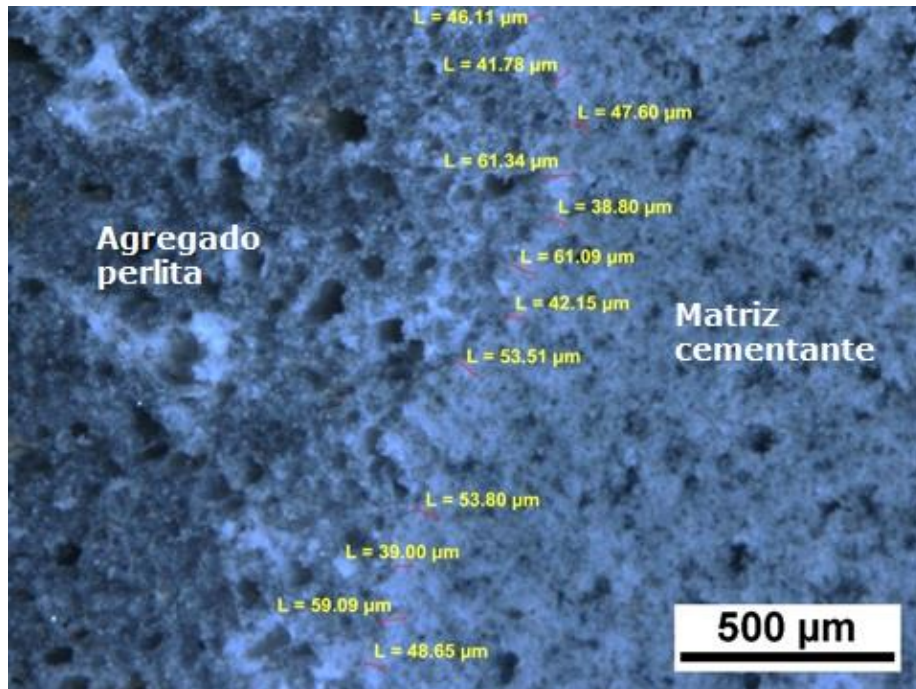


Figura 57. Micrografía espesores ITZ concreto perlita

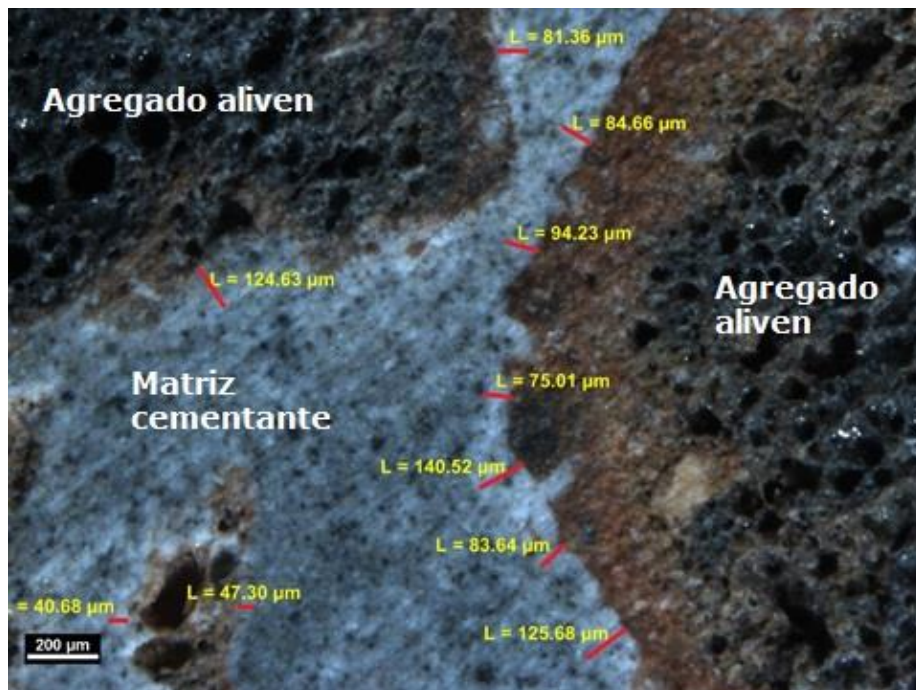


Figura 58. Micrografía espesores ITZ concreto aliven

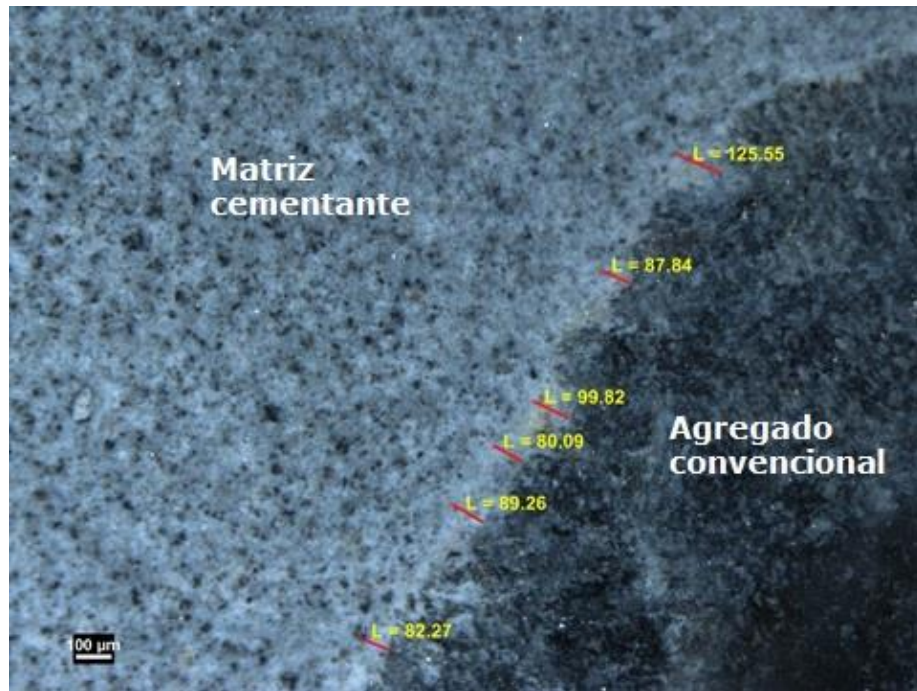


Figura 59. Micrografía espesores ITZ concreto convencional

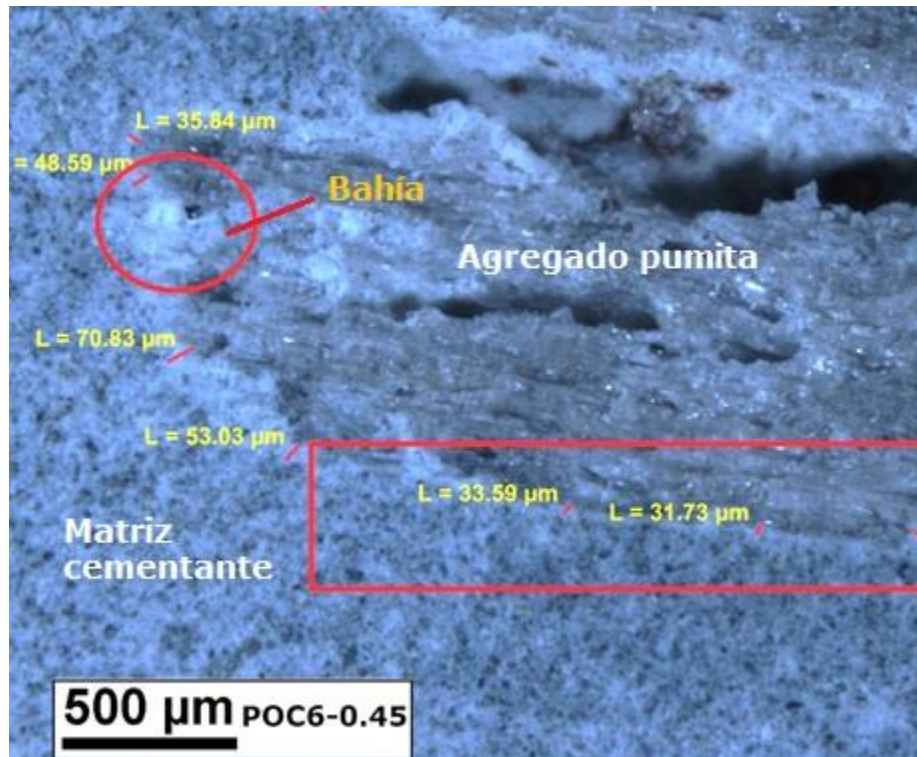


Figura 60. Presencia de bahías en ITZ, concreto pumita a 28 días de curado

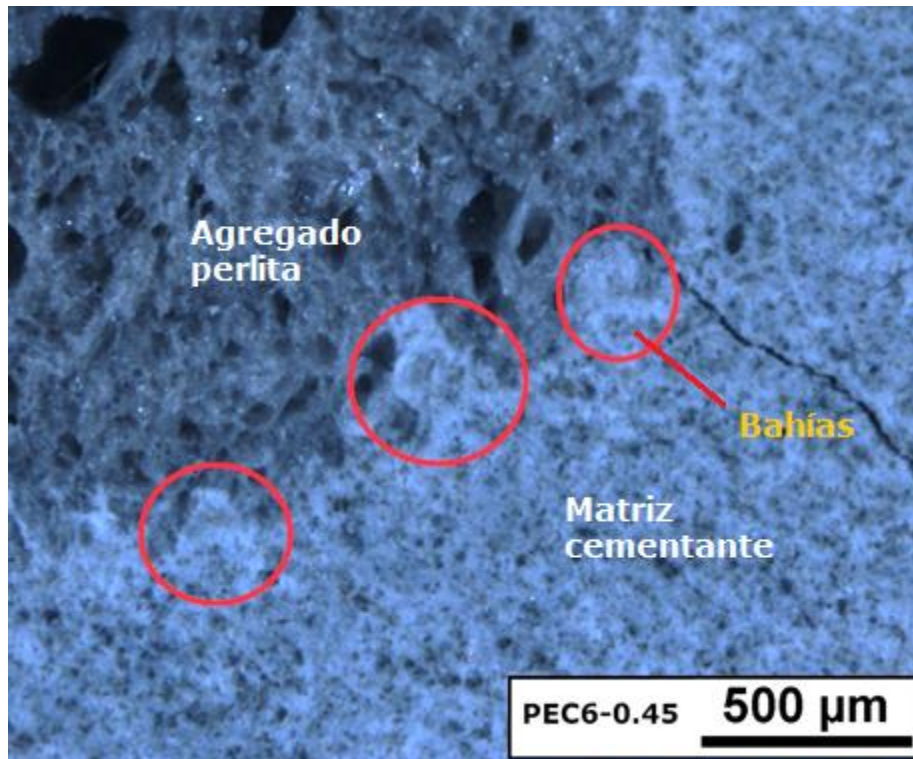


Figura 61. Presencia de bahías en ITZ, concreto perlita a 28 días de curado



Figura 62. Presencia de bahías en ITZ, concreto aliven a 28 días de curado

Las mediciones del espesor de la ITZ se pueden observar en la Figura 63 a la Figura 66, las cuales corresponden a un diagrama de caja de bigotes, donde la línea horizontal de la caja corresponde al valor de la media y el punto marcado con un cuadro al promedio. Los valores mínimo y máximo están representados por las líneas que salen al exterior de la caja (bigotes). El rango de información de la caja nos indicaría los valores de los percentiles del 25% por debajo de la media y 75% por encima de la media.

La Tabla 23 resume los valores de los diagramas de bigotes, al analizar los datos encontramos que el mejor comportamiento para el menor espesor de la ITZ lo presenta el agregado pumita con un promedio de 50.6 μm para la mezcla C5-0.35, para la cual los valores estarían entre 35.6 y 60.5 μm éste fenómeno se repite para la misma mezcla, al obtener un promedio para el aliven de 59,2 μm , en la perlita de 62.4 μm , y en el concreto convencional de 65.7 μm .

Éste comportamiento para el espesor está asociado a que las mezclas de concreto con una baja (A/C) producen una mejor distribución de los granos de cemento cerca de los agregados y, por ende, una ITZ de menor espesor (menor porosidad). Por el contrario, mezclas con (A/C) alta generan una ITZ de mayor espesor (mayor porosidad), (Solano 2011).

En el caso de la mezcla C5-0.45, el espesor se logra afectar en los concretos livianos de pumita, perlita, aliven y mucho más en el concreto convencional. Debido a que hay mucha más agua (225 L) en la zona de la ITZ, para la misma dosificación de cemento (500 kg/m^3).

La mezcla de C6-0.35, posee relación agua cemento más baja, pero dosificación de 600 kg. Los espesores mayores en ésta receta pueden ser debido a que al aumentar la dosificación de cemento, se logra una mayor densificación de las partículas alrededor del agregado y a causa del efecto muro en la formación de la ITZ, el espesor se puede ver afectado aumentando la porosidad en la zona.

Al continuar con el análisis encontramos que otra mezcla que presenta buen desempeño respecto al menor espesor es la mezcla C6-0.45, esta mezcla posee valores cercanos a la mezcla C5-0.35 para todos los agregados, logrando que en el concreto de perlita (63.7 μm) se logren valores promedio similares al de pumita (63.8). Comparando los anteriores valores con el concreto de aliven (61.1 μm), se trata de espesores muy similares para todos los concretos livianos. Este comportamiento para esta mezcla C6-0.45 indica que al aumentar la cantidad de cemento en la mezcla el aumento del agua por la relación agua permite que la hidratación se dé favorablemente y el espesor de la ITZ no se afecte.

Al observar en general la variación del espesor para las distintas mezclas de los cuatro agregados, encontramos que las desviaciones son del orden del 18.5 % hasta 31.5 %, indicando que la dispersión de los datos es muy alta en el ensayo.

Una de las causas para altas desviaciones en los ensayos se atribuye a la ejecución del ensayo, factores que alteren la medida, o a la baja cantidad de datos analizados.

En este caso las variaciones de los espesores son afectadas por la morfología de la superficie de los agregados y por las variaciones en la relación agua cemento en las distintas dosificaciones. Ésta dispersión no es atribuible a la cantidad de mediciones del espesor, los promedios corresponden a mediciones de 100 y más datos.

Tabla 23. Rangos de espesor ITZ

Mezcla	Percentil 25% μm	Percentil 75% μm	Promedio μm	Desviación
POC5-0.35	35.6	60.5	50.6	19.8
POC5-0.45	52.8	80.4	67.9	18.5
POC6-0.35	55.5	79.9	68.9	21
POC6-0.45	50.6	75.9	63.8	21.5
PEC5-0.35	49.9	75.6	62.4	19.1
PEC5-0.45	52.9	79.2	68.3	19.1
PEC6-0.35	52.3	82.2	68.7	22.8
PEC6-0.45	53.4	70.2	63.7	11.9
ALC5-0.35	44.9	72.8	59.2	19.8
ALC5-0.45	50	79.3	63.6	23.1
ALC6-0.35	56.2	83.1	69.8	21.2
ALC6-0.45	46.2	74.5	61.1	25.9
COC5-0.35	42.5	84.1	65.7	31.9
COC5-0.45	72	110.7	88.9	23.1
COC6-0.35	79	105.1	87.7	19.5
COC6-0.45	53.8	83.3	67.9	20.8

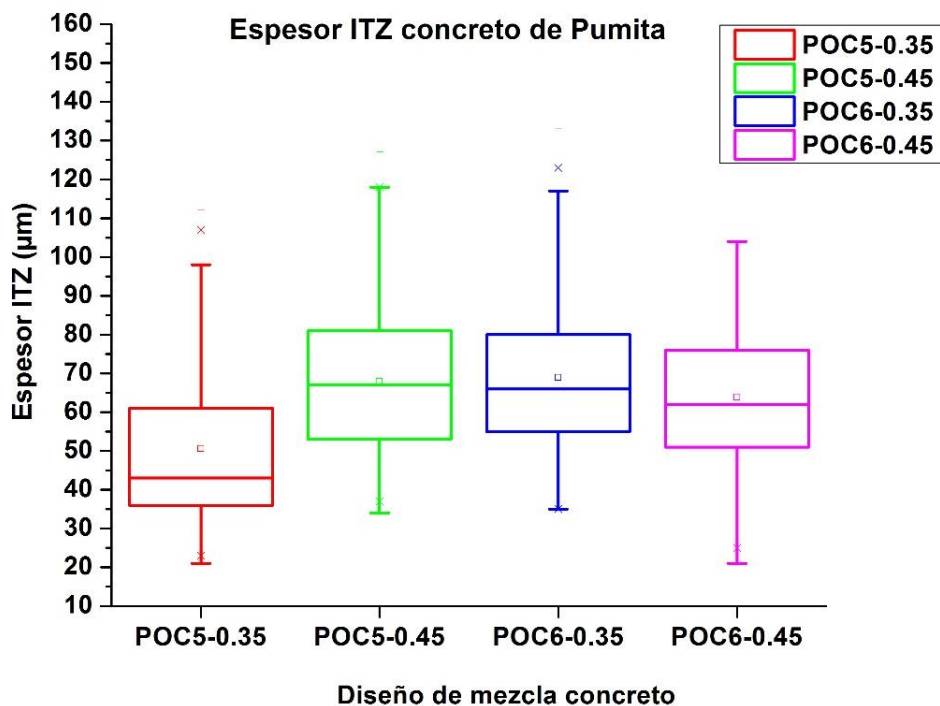


Figura 63. Distribución espesor de la ITZ concreto de pumita a 28 días de curado

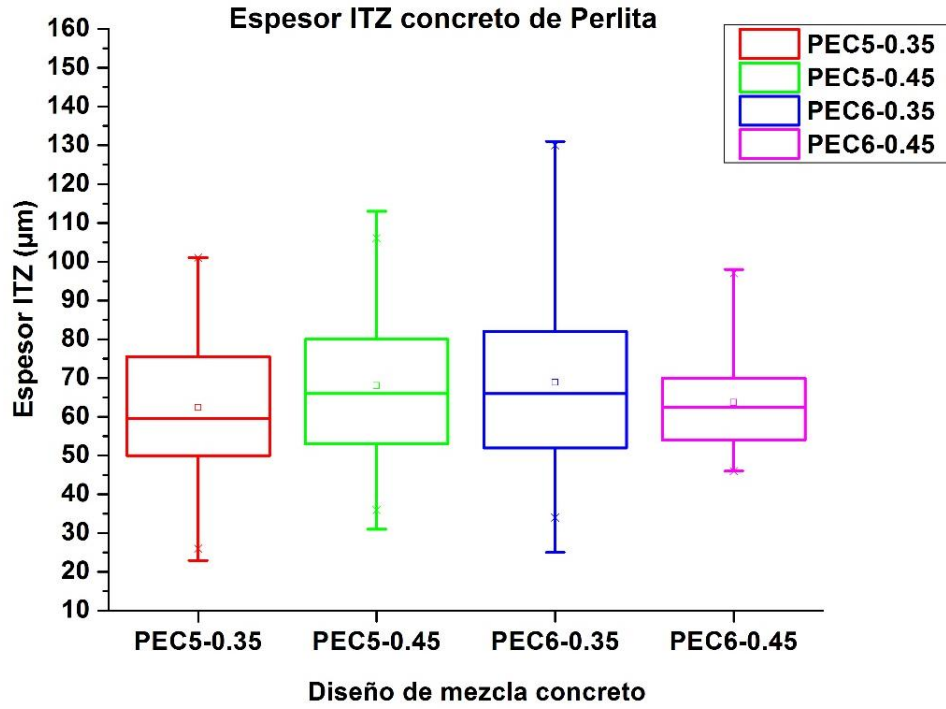


Figura 64. Distribución espesor de la ITZ concreto de perlita a 28 días de curado

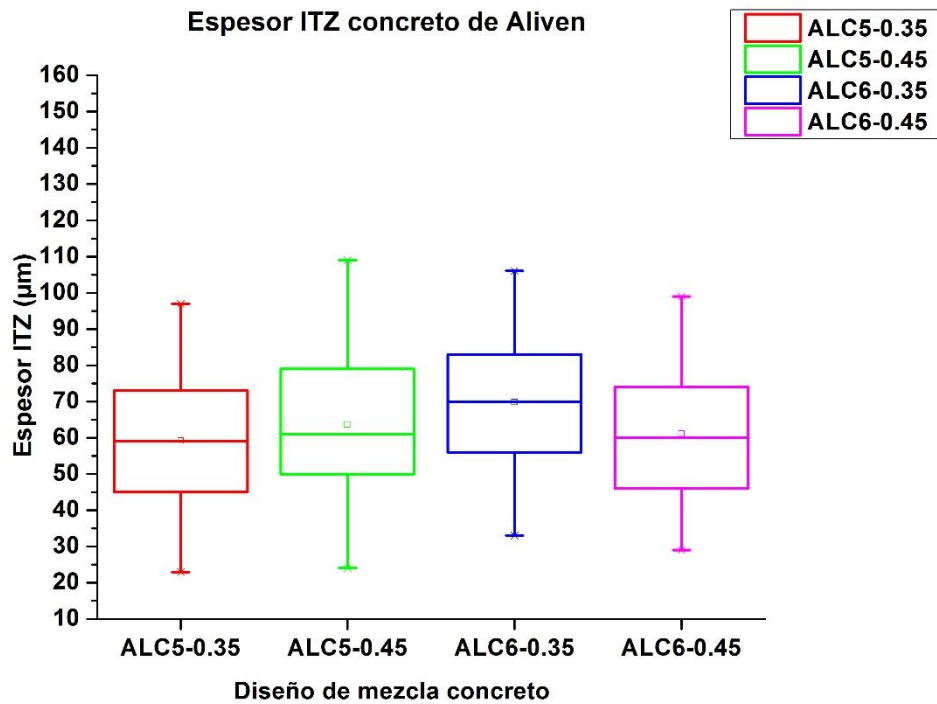


Figura 65. Distribución espesor de la ITZ concreto de aliven a 28 días de curado

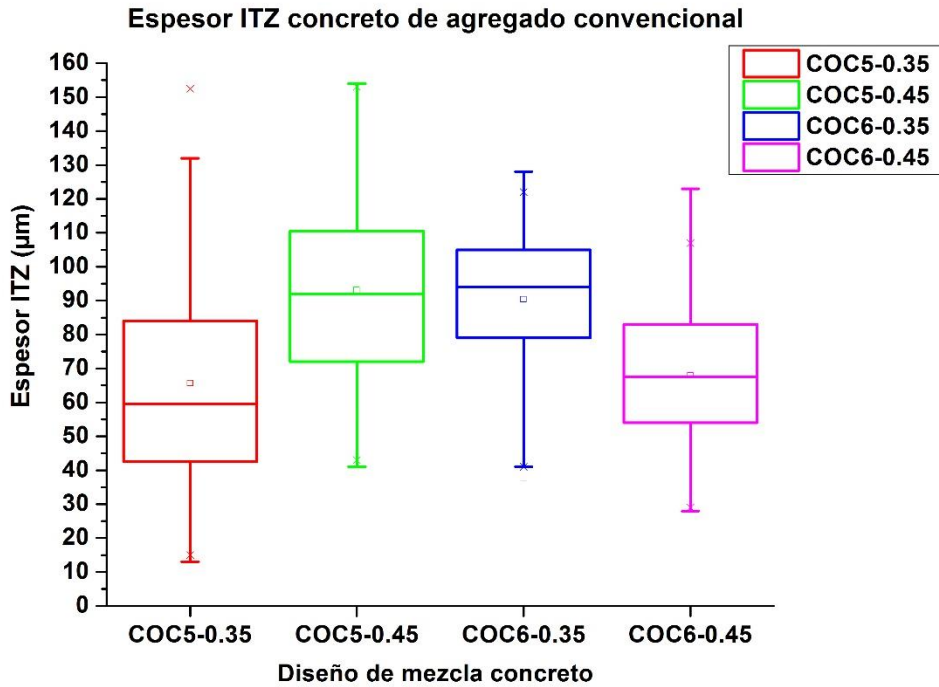


Figura 66. Distribución espesor de la ITZ concreto convencional a 28 días de curado

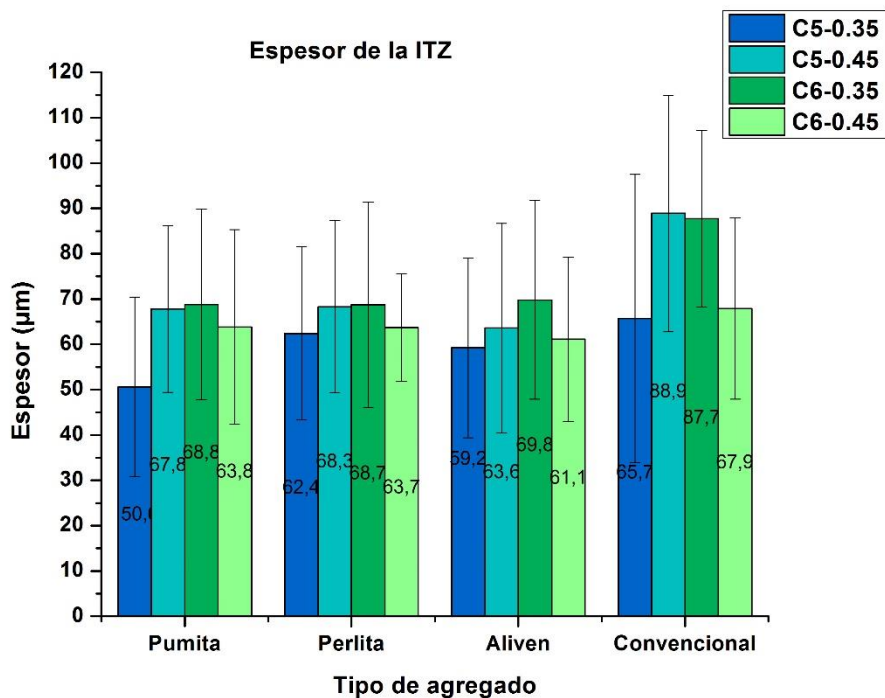


Figura 67. Distribución de espesor de la ITZ concreto a 28 días de curado

Al analizar la Figura 67, encontramos que en general la distribución del espesor es muy similar, pero con desviaciones muy grandes dentro de cada mezcla, así el concreto convencional fue el que mayor desviación tuvo para las mediciones de espesor.

Los agregados pumita y perlita exhiben un espesor muy similar al aliven, del orden de 50.6 a 68.8 μm , y en algunas recetas, inclusive son menores que para el aliven. Contradiendo lo hallado por Zhang & Gjorv, (1990), quien reporta que el espesor de la ITZ es mayor para los agregados que poseen una estructura porosa en la superficie, versus los que poseen una capa densa en su exterior, caso de las arcillas expandidas, en este estudio el aliven.

Otro factor a tener en cuenta en el espesor de la ITZ es el tamaño de los agregados en las mezclas, Monteiro et al, 1986, encuentran que en el espesor de la ITZ influye, el tamaño del agregado. Desde el inicio de la preparación se tuvo en cuenta este factor, pero es de resaltar que a pesar de tener un rango entre 4,75 y 9.5 mm de tamaño, en la preparación de la mezcla los agregados como la pumita y perlita sufrieron fracturas quedando dentro del concreto partículas de tamaños menores, que al observar la Figura 68 podemos apreciar este fenómeno que pudo tener una incidencia sobre el promedio general de las mediciones.

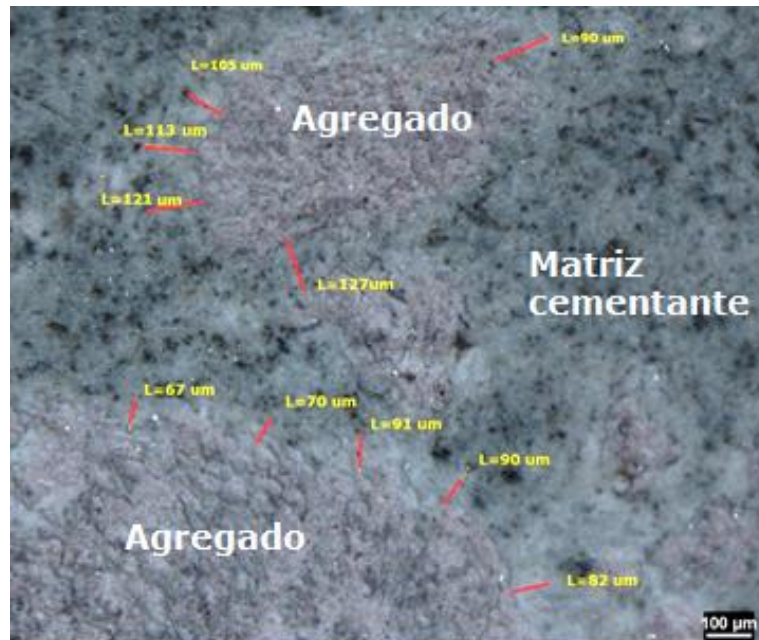


Figura 68. Distribución de espesor ITZ por tamaño de agregado

Para validar lo expuesto anteriormente se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para cada factor evaluado los efectos principales y los de las interacciones dobles. Los resultados se muestran en la Tabla 24.

Para el ANOVA, la hipótesis nula planteada consiste en que los factores “Tipo de agregado”, “A/C” y “Dosificación de cemento” no tienen ningún efecto sobre el espesor de la ITZ, y la hipótesis alterna, que los factores tienen efecto sobre el espesor de la ITZ.

Tabla 24. Resumen resultados de ANOVA para espesor de ITZ

Efectos	Factor	Valor P	R ²
Principales	Tipo de Agregado	0.023	96.71%
	A/C	0.886	
	Dosificación Cemento	0.061	
Interacción	Tipo de agregado *A/C	0.515	
	Tipo de agregado *Dosificación cemento	0.066	
	A/C*Dosificación cemento	0.607	

En la Tabla 24 el valor-p obtenido para los factores y el R² del modelo estadístico. Para una significancia $\alpha = 0.05$ es decir con una confianza asociada de $\beta = 95\%$, se puede decir que si el valor-p es menor que α , se rechaza la hipótesis nula.

El análisis estadístico para un 95 % de confianza indica que el tipo de agregado tiene efecto sobre el espesor de la ITZ, al igual que sus interacciones. La dosificación de cemento y la A/C no tienen efecto sobre el espesor. Los experimentos tuvieron un R² en promedio de 96.71%, lo que significa que el modelo estadístico explica el 96.71% de la variabilidad de los resultados.

Para verificar el correcto muestreo y análisis estadístico, se realizaron las gráficas de los residuos para analizar los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia de la variable respuesta. La Figura 69, la gráfica del histograma, presenta inconsistencias, una campana bimodal, a pesar de cumplir con los supuestos de normalidad y varianza constante e independencia, se puede concluir que el modelo no es válido pues incumple este supuesto. Se atribuye a las altas desviaciones de los datos para el espesor de la ITZ.

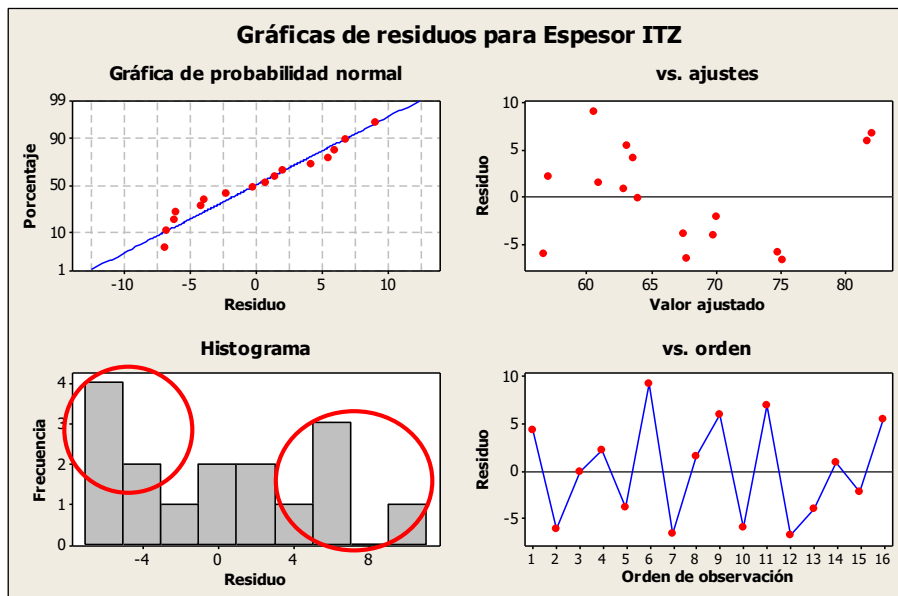


Figura 69. Verificación de supuestos estadísticos para espesor ITZ, (elaborado en Mintab)

La Figura 70, exhibe el comportamiento del espesor de la ITZ de las distintas recetas en los cuatro agregados, y se encuentra que para los promedios del espesor del ITZ se ve una clara disminución al usar agregados livianos en comparación con el agregado convencional.

Se puede concluir que en el espesor de la ITZ, influyen la rugosidad del agregado, causando bahías que aumentan el espesor, así como el aumento en la relación agua cemento y el aumento de la cantidad de cemento, afectan positivamente a los agregados livianos, pero tienen un efecto negativo en el caso del agregado convencional.

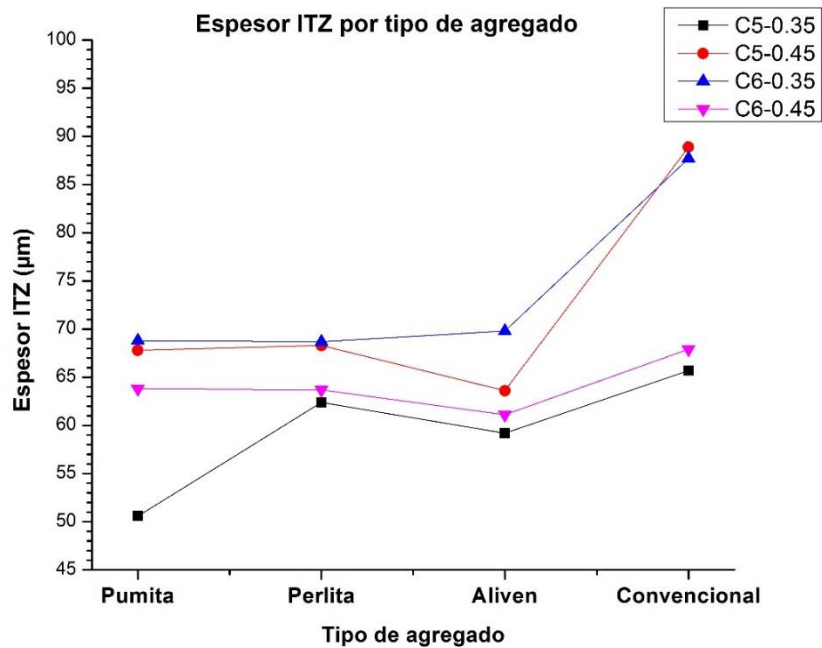


Figura 70. Espesor ITZ concretos a 28 días de curado por tipo de mezcla

4.4 Resistencia mecánica de concretos

4.4.1 Resistencia a compresión

Se realizó el ensayo de resistencia a compresión de acuerdo con la norma ASTM C 349 a edades de 3 y 28 días de curado a las distintas muestras de concretos.

En el concreto endurecido, la resistencia a la compresión y a la flexión, la elasticidad, así como la distribución de tensiones dentro del concreto están influenciados por la orientación de las partículas, el grado de adhesión entre las partículas de agregados con la pasta de cemento, y el comportamiento mecánico de la interfaz cemento - agregado. (Ozol, 1978).

La importancia de la A/C sobre la resistencia a compresión fue descubierta en 1918 por Duff A. Abrams especialista de EE. UU. Después de haber estudiado un gran número de

concretos de diferentes composiciones, anunció la ley que expresa que con un agregado dado, la resistencia a compresión depende sólo de la A/C. Este descubrimiento ha provocado desarrollos importantes puesto que otras propiedades de gran valor del concreto como durabilidad, también dependen de la relación agua / cemento.

La Figura 71 a la Figura 74, se muestra la evolución de la resistencia de los concretos livianos y convencional fabricados, a las edades de curado de 3 y 28 días, para los cuales se muestra la evolución en ganancia de resistencia de 3 a 28 días. Para el agregado de pumita la ganancia es del 23% en la receta C5-35, mientras que en el concreto convencional en la misma receta la ganancia es del 9%. La evolución de resistencia para lo concretos livianos es menor que en concreto convencional, para los cuales se logra un aumento del 37% en la mezcla COC5-0.45, del 23% en la COC6-0.35 y del 37% para la COC6-0.45.

La mayor resistencia a 28 días de los concretos livianos, se logró con el diseño de mezcla 500 kg de cemento/m³ con relación agua cemento de 0.35, correspondiente a la dosificación de la Tabla 16. Los resultados indican que el mejor comportamiento de esta mezcla lo presentó el agregado pumita con 23,8 MPa, seguido del aliven con 18.8 y finalmente el de perlita con 16.5 MPa.

Para el concreto de agregado convencional Figura 74, la mayor resistencia se logró con el concreto de 600 kg de cemento/m³ con relación agua cemento de 0.35, logrando un concreto convencional con resistencia a compresión de 56.7 MPa, seguido de la mezcla C5-0.35 con 48,5 MPa, 47.5 MPa para la mezcla C6-0.45 y finalmente la más baja de 44.4 MPa para la mezcla C5-0.45.

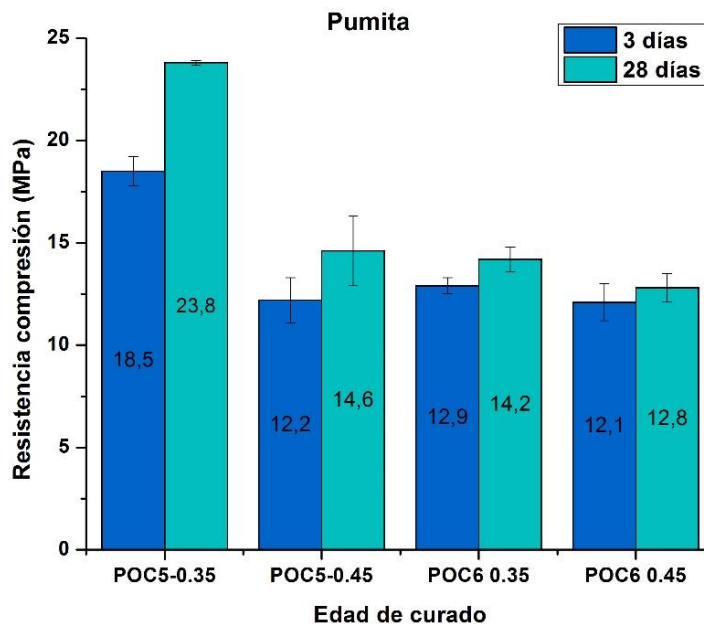


Figura 71. Resistencia a compresión concreto de pumita a 3 y 28 días de curado

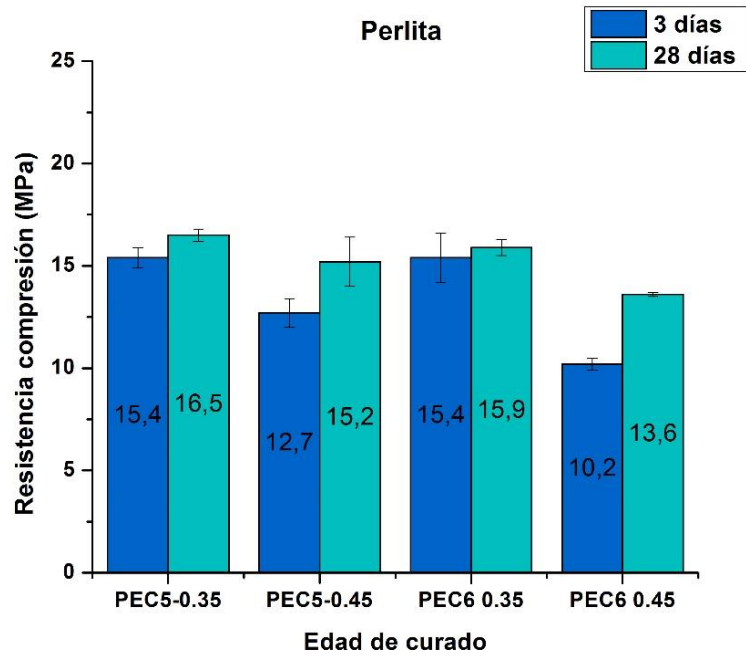


Figura 72. Resistencia a compresión concreto de perlita a 3 y 28 días de curado

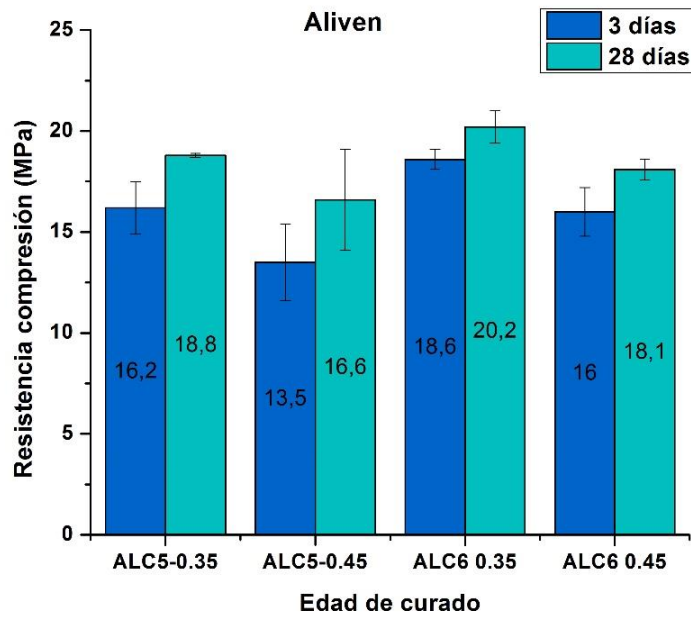


Figura 73. Resistencia a compresión concreto de aliven a 3 y 28 días de curado

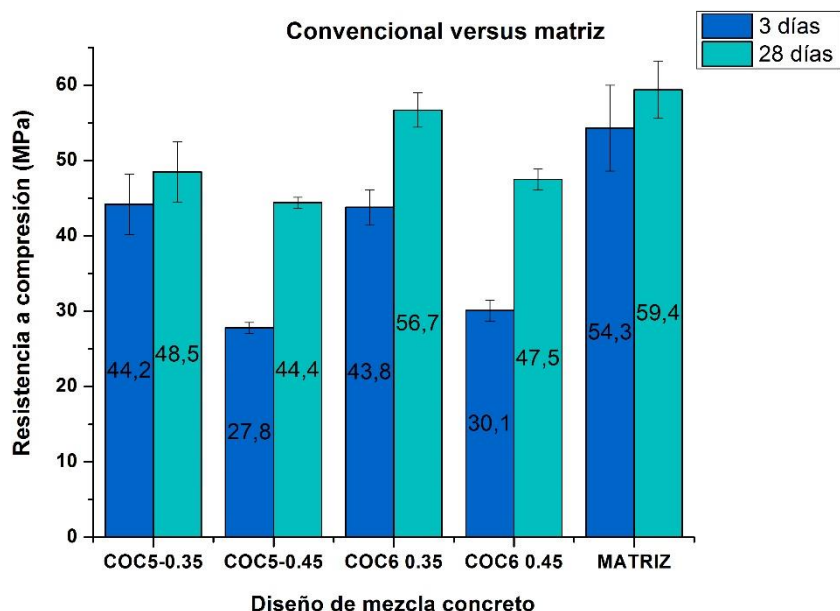


Figura 74. Resistencia a compresión concreto convencional a 3 y 28 días de curado versus matriz cementante

De la Figura 74, el mejor comportamiento para la resistencia puede ser atribuido al hecho que el concreto de agregado convencional posee mayor volumen de matriz cementante comparado con los concretos livianos, de la Figura 75, debido a que la dosificación para todos los concretos se realizó por peso, y la densidad del agregado convencional es de 1633 kg/m^3 y dentro de la matriz cementante se encuentra menor cantidad de agregado, que genera un concreto de mayor volumen de matriz cementante y bajo volumen de agregados.

La Tabla 25 contiene los valores para resistencia a compresión de la matriz cementante, la dosificación de la mezcla fue realizada de acuerdo a lo establecido en la ASTM C 109.

Tabla 25. Resistencia a compresión pasta de cemento

Edad de curado	Resistencia compresión (MPa)	Desviación
7 Días	54.3	5.7
28 Días	59.4	3.8

A/C = 0.266

Los valores obtenidos para la resistencia del concreto convencional, al relacionarlos con la Tabla 25, indican que las distintas mezclas de agregado convencional lograron valores de resistencia cercanas a la resistencia propia de la pasta de cemento, 56.7 MPa para la dosificación COC6-0.35.

El comportamiento de las bajas resistencias para los agregados livianos, en la Figura 75, al compararlas con el convencional, fue afectada por la porosidad de los agregados, asociada a uno de estos dos factores, el primero corresponde a la absorción de agua de los agregados y su condición de saturados antes de realizar las mezclas, estos agregados son capaz de retener desde el 11% de agua, caso del aliven, hasta el 44% caso de la pumita y perlita. Como segundo efecto de la porosidad de los agregados en la mezcla fue la cantidad por volumen de agregado en la mezcla, mucho mayor vs la del concreto convencional, debido a las densidades que son menores en los agregados livianos, tal como se expresa en la Tabla 21, sección 4.1.4.

El desempeño de los concretos de pumita y perlita, frente al aliven, muestran (Figura 75), que a pesar de ser concretos de menor densidad, las resistencias se pueden optimizar y llegar a valores superiores de 17.5 MPa. En este estudio se utilizó la pumita y perlita en su estado natural, sin ningún procesamiento como sucede para las arcillas expansivas (aliven), adicional las mezclas fueron carecientes de agregados finos y de aditivos, los cuales mejoran la resistencia a compresión de los concretos.

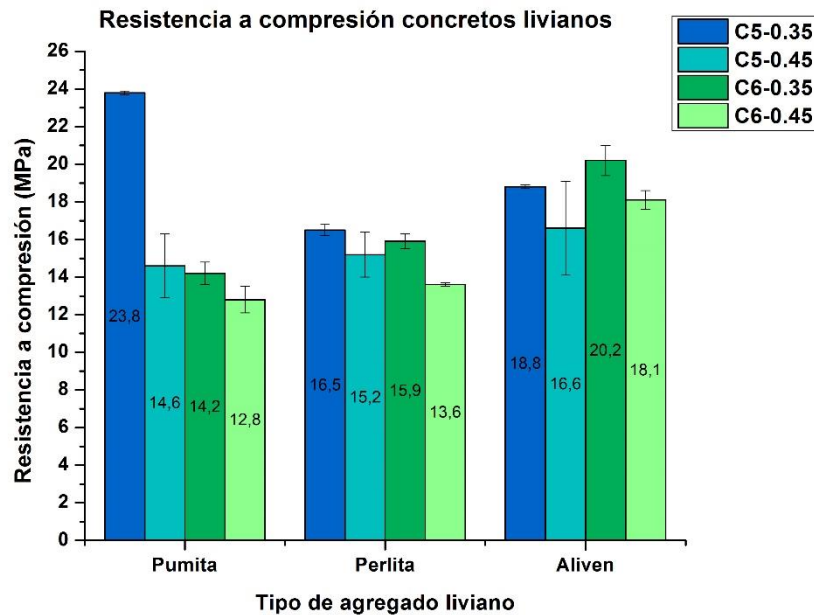


Figura 75. Resistencia a compresión de concretos livianos a 28 días de curado

La resistencia a compresión en el concreto depende de la resistencia, rigidez y densidad de los agregados gruesos utilizados, cuanto menor es la densidad, menor es la resistencia del concreto. (Anwar Hossain, K. M. 2004).

Al comparar los resultados de todos los concretos livianos cada uno de ellos en su mejor valor, la pumita logra un 40% de resistencia respecto a la pasta y un 42% respecto al convencional, el aliven logra un desempeño del 36 % respecto al convencional, y la perlita alcanza un 29 % respecto al convencional, lo cual indica que los concretos livianos al ser sometidos a una carga fallaron por la baja resistencia de los agregados causada por la alta porosidad de los mismos, mientras la resistencia del agregado convencional es más alta

logrando que el compuesto matriz, agregado resista hasta la resistencia propia de la pasta de cemento.

El aporte de las variaciones de dosificación de cemento y variación de la A/C de los concretos livianos en la microestructura de la ITZ, no se puede percibir en este estudio, debido a que los concretos livianos fallaron por la resistencia del agregado y no por la resistencia de la matriz. Este fenómeno se logra apreciar en la Figura 76, para el concreto convencional, las fisuras a causa del esfuerzo a compresión se presentan en la matriz cementante, bordeando el agregado, en algunos casos el agregado es desprendido de la matriz cementante.

Para el concreto liviano, las fisuras atraviesan el agregado liviano y la falla se traslada a la matriz cementante, este efecto se representa en la Figura 77.

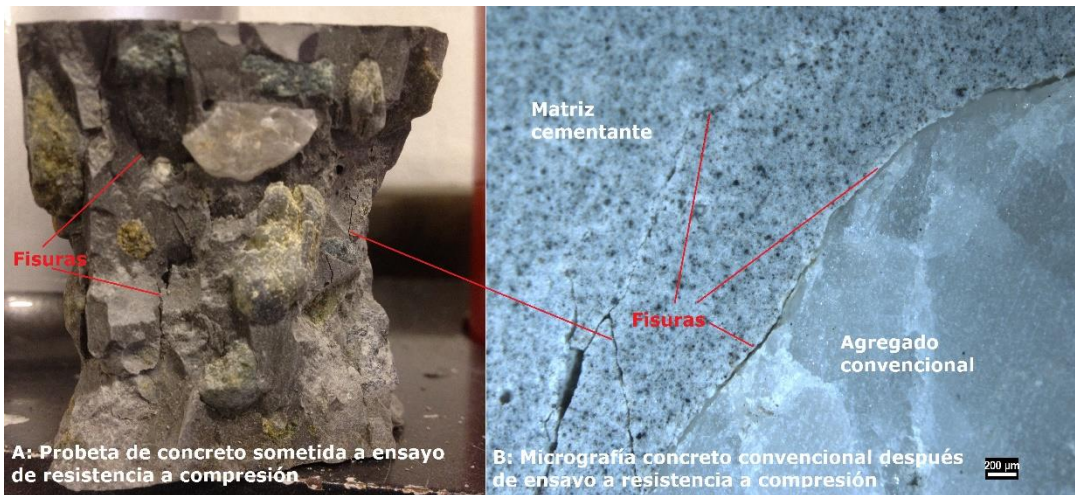


Figura 76. Representación falla en concreto convencional, después de ensayo de resistencia a compresión a 28 días de curado.

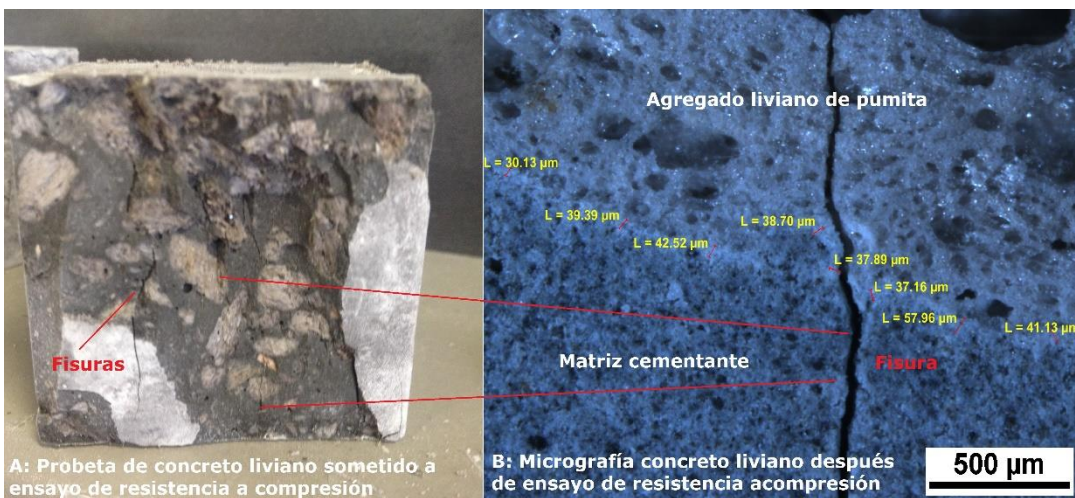


Figura 77. Representación falla en concreto liviano, después de ensayo de resistencia a compresión a 28 días de curado.

Los resultados de las mezclas de aliven de ALC5-0.35, ALC6-0.35 y ALC6-0.45, junto a la pumita POC5-0.35, indican que éstos concretos pueden ser clasificados como concretos livianos estructurales, debido a que el código de la ACI 213R, al igual que la norma ASTM C 330 clasifican el desempeño de un concreto liviano como concreto estructural a partir de la resistencia a compresión de 17.5 MPa.

Para verificar el análisis realizado para la resistencia a compresión se realiza un análisis ANOVA, para el cual, la hipótesis nula consiste en que los factores “*Tipo de agregado*”, “*A/C*” y “*Dosificación de cemento*” no tienen efecto sobre la resistencia a compresión, y la hipótesis alterna, que los factores tienen efecto sobre la resistencia a compresión.

Tabla 26. Resumen resultados de ANOVA para Resistencia

Efectos	Factor	Valor P	R ²
Principales	Tipo de Agregado	0.327	92.39%
	A/C	0.106	
	Dosificación Cemento	0.047	
Interacción	Tipo de agregado *A/C	0.539	
	Tipo de agregado *Dosificación cemento	0.206	
	A/C*Dosificación cemento	0.139	

En la Tabla 26 se muestra el valor-p obtenido para los factores y el R² del modelo estadístico. Por lo tanto este análisis estadístico, se valida la hipótesis nula, para la cual el los factores “*Tipo de agregado*” y la “*A/C*” no tienen ningún efecto sobre el resultado de la resistencia, al igual que ninguna de sus interacciones. Los experimentos tuvieron un R² en promedio de 92.39%, y un R² ajustado de 61.95% lo que significa que el modelo estadístico podría explicar el 92.39% de la variabilidad de los resultados, pero el R² ajustado menor indica que la variabilidad de éste análisis solo es confiable en un 61.95%.

Para verificar el correcto muestreo y análisis estadístico, se realizaron las gráficas de los residuos para analizar los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia de la variable respuesta. En la Figura 78 se muestran las gráficas de residuos para los resultados de resistencia a compresión, a partir de las cuales se puede concluir que la gráfica de probabilidad normal tiene una tendencia lineal, el histograma tiene forma aproximada de campana de Gauss con una leve tendencia bimodal. Para las gráficas de residuos versus orden y ajustes no se presentan ninguna tendencia. Entonces no hay un cumplimiento de los supuestos de normalidad, y se invalida el análisis del ANOVA obtenido.

El análisis estadístico para la resistencia a compresión dista del análisis global que se realizó, en el cuál se identifica que la incidencia del tipo de agregado es la que produce un mayor efecto sobre el resultado de la resistencia a compresión seguido de la A/C en los concretos livianos. Dicho análisis estadístico explicaría el efecto solo sobre el concreto convencional, donde claramente un aumento en la cantidad de cemento dio como resultado una mayor resistencia a compresión de estos concretos.

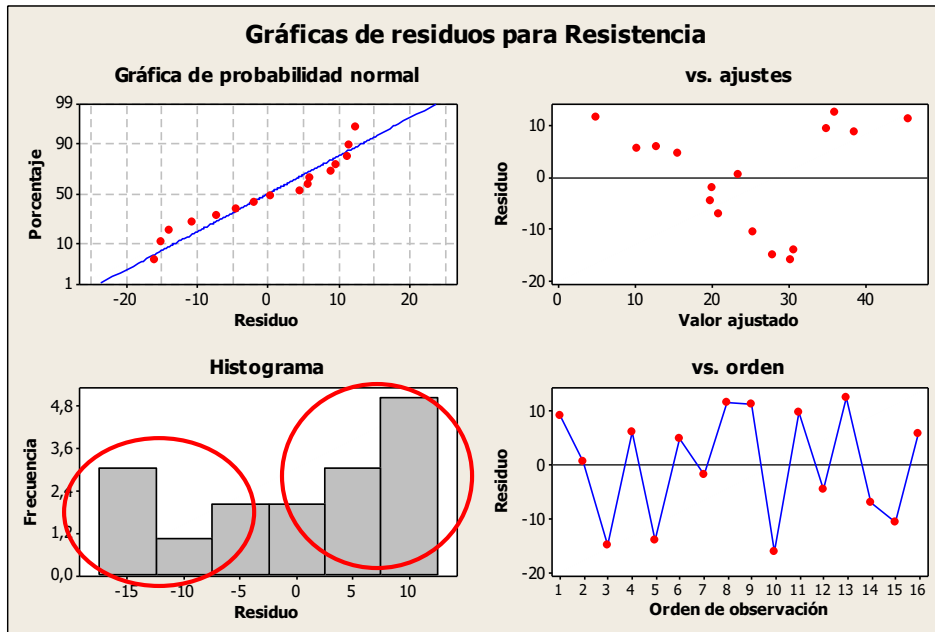


Figura 78. Verificación de supuestos estadísticos para resultados de resistencia a compresión. (Elaborado en Minitab)

El mejor desempeño para las mezclas de concreto deben ser aquellas que al contener una ITZ de menor espesor nos dé un comportamiento mejor en resistencia a compresión. (Chandra & Berntsson, 2002).

De la Tabla 23 la tendencia de las recetas para los concretos que obtuvieron menor promedio de espesor de ITZ fueron las que lograron un mejor desempeño en resistencia mecánica, correspondientes a las mezclas de 500 kg/m^3 con relación agua cemento de 0.35.

Al observar el comportamiento de la resistencia versus el espesor de la ITZ en la Figura 79, se encuentra que para altas resistencias a compresión del concreto convencional los espesores de la ITZ son similares que los de concretos livianos, inclusive mayor espesor para el concreto convencional. Espesores entre 65 y 70 μm de concretos livianos tienen menor desempeño de resistencia a compresión, mientras que el concreto convencional este mismo rango de espesor tiene resistencia a compresión mucho mayor. Si se comparan solo los resultados para los concretos livianos, el comportamiento es que para espesores bajos entre 50 y 60 μm se logran resistencias superiores a 17.5 MPa para los agregados de pumita y aliven y no muy lejanos para la perlita.

La variación del espesor de la ITZ de los concretos livianos no se puede relacionar directamente en este trabajo con la resistencia a compresión, ya que ésta resistencia se ve afectada negativamente por el tipo de agregado liviano, debido a que la falla se da por la resistencia propia de cada agregado. Pero el comportamiento expresado en el párrafo anterior indica que para bajos espesores de la ITZ en los concretos livianos, la resistencia a compresión es mayor en las dosificaciones C5-0.35.

Para los concretos convencionales no es clara la influencia del espesor de la ITZ sobre el comportamiento mecánico a la resistencia a compresión, se encuentra que para espesores promedios alrededor de 65.7 μm , la resistencia puede ser de 48.2 MPa, y para espesores

de 87.7 μm , se alcanzan resistencias de 56.7 MPa, el mecanismo de falla del concreto convencional está relacionado a la rigidez del agregado y este tipo de concreto alcanza resistencias cercanas a la resistencia propia de la matriz cementante.

Entonces el espesor de la ITZ no es un indicador directo del comportamiento del concreto convencional y liviano a la resistencia a compresión.

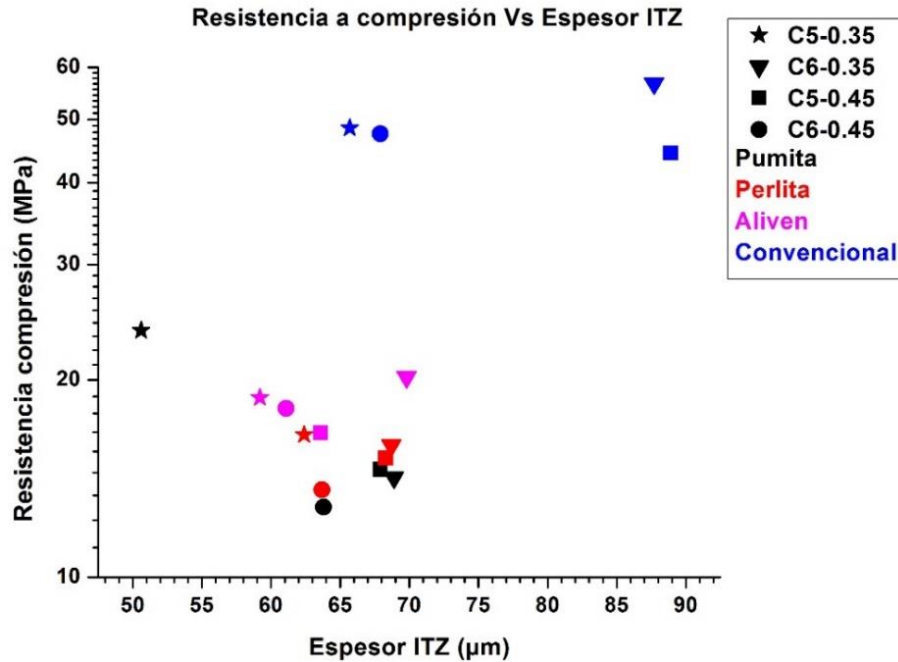


Figura 79. Resistencia a compresión Vs Espesor de la ITZ

4.4.2 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad fue medido con la técnica de nanoindentación en la ITZ. El método fue introducido en 1992 para medir la dureza y el módulo elástico, se ha adoptado y utilizado en la caracterización del comportamiento mecánico a pequeña escala. Desde su desarrollo original, el método ha sido objeto de numerosas mejoras y cambios producidos en equipos de prueba, así como de los avances en la comprensión de la mecánica del contacto elásto-plástico. (Oliver & Pharr, 2004).

Hui et al. (2009) junto con Mondal (2008), son unos de los primeros investigadores que utilizaron nanoindentación para estudiar el ITZ del concreto, y sus resultados revelaron información que no se obtiene por otros métodos (Xie et al. 2015).

Antes de la prueba de nanoindentación, se utilizó microscopía de fuerza atómica (AFM) para examinar la superficie de las muestras y determinar el perfil de rugosidad. Hu & Li, (2015), encuentran que en algunos trabajos para pastas de cemento con A/C = 0.5 logran una rugosidad promedio RMS de 150 nm en un área de medida de 40 x 40 μm . Valor mucho más alto que el sugerido por Miller et al. (2008). El cuál sugiere 8 horas de pulido para lograr RMS entre 52.9 y 22.1 nm, en pastas de cemento de A/C=0.2.

Se considera que la rugosidad de la superficie en materiales cementantes es causada principalmente por los poros de micro y nano escala, y por esto si la nanoindentación corresponde a la de un poro grande, el resultado puede ser excluido del tratamiento de datos. (Hu & Li, 2015)

De los ensayos de AFM, se encontró rugosidad media cuadrada (RMS) de las muestras pulidas de 228.2 nm para la muestra PEC6-45 y de 200.6 nm para la COC5-35. La Figura 80 muestra la superficie en 3D y el perfil de rugosidad correspondiente.

Los ensayos de nanoindentación se realizaron con una carga consante de 2 mN, en un tiempo de 5 segundos de carga, 5 segundos de sostenimiento y 5 segundos de descarga. Este procedimiento fué realizado para todas las indentaciones, en una matriz de 10X13 espaciado entre guiones adyacentes 10 μm en ambas direcciones X e Y, el área total examinada fue de 100 μm (paralelo al interfaz) y 130 μm (perpendicular a la interfaz). Esta disposición fue el resultado de una cuidadosa consideración de diferentes factores, como el espesor de la ITZ, el tiempo total de la prueba y la distancia mínima que evita posibles interferencias entre indentaciones adyacentes.

La Figura 81 muestra la selección de un área típica donde se realizaron las indentaciones y en la Figura 82 , la imagen de un área típica de una huella de indentación.

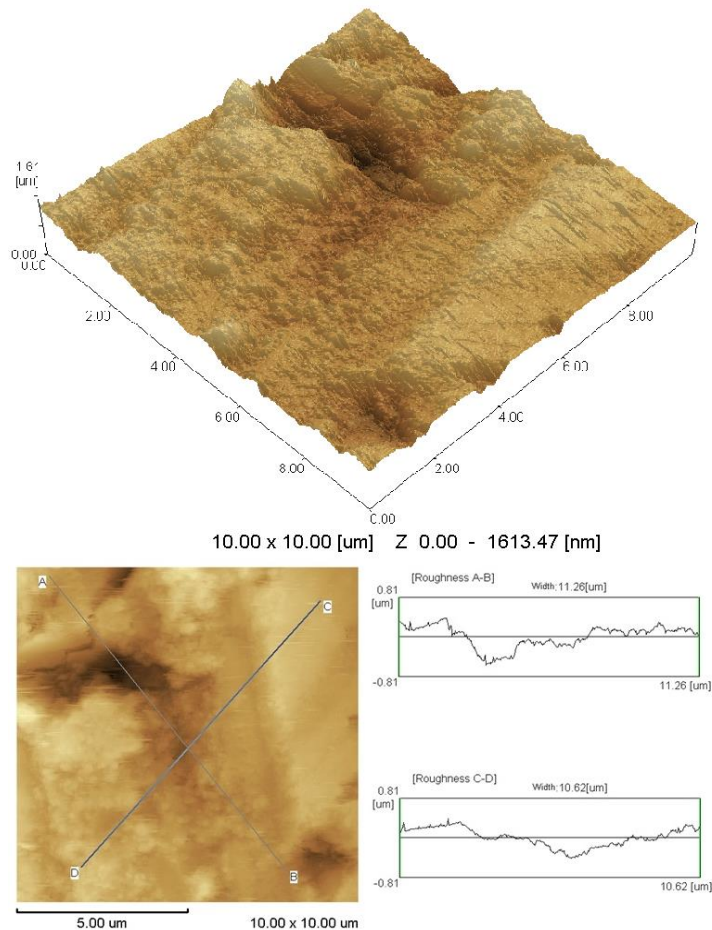


Figura 80. 3D y perfil de rugosidad zona de ITZ antes de nanoindentaciones



Figura 81. Selección de área de indentación en muestras de concreto

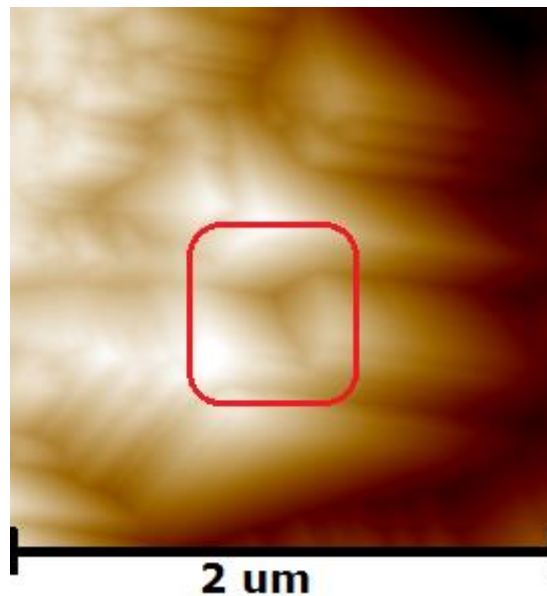


Figura 82. Huella de indentación en ITZ

En el estudio de Xiao et al (2013), la nanoindentación se realizó para una profundidad media de 350 nm para la fase de ITZ con una rugosidad superficial inferior a 100 nm. La profundidad media de indentación h es aproximadamente 3 veces más que la rugosidad superficial, la cuál es suficiente para evitar efectos de rugosidad sobre los resultados de las indentaciones, este criterio propone un valor menor al sugerido por Miller et al, (2008) quienes sugieren que h sea 5 veces mayor que la rugosidad media.

Para los resultados promedio de h en este proyecto, se encontró que la h máxima (746 nm), para los ensayos de nanoindentación es alrededor de 3 veces mayor que las RMS de este estudio.

El módulo de elasticidad del concreto depende de las cantidades relativas de pasta y del módulo de elasticidad de los agregados de arena y grava. El concreto convencional posee un módulo de elasticidad mayor porque los módulos de la arena y grava son mayores que los módulos de los agregados livianos. En la norma ASTM C 469 se describe el ensayo para la medida del módulo de elasticidad en concretos, la fórmula (1), del código de la ACI 318, se puede utilizar para valores de W , (W_c corresponde a la densidad, f_c' a resistencia a compresión de los concretos), entre 1440 y 2480 kg/m³ en concretos convencionales, en estas condiciones puede usarse como la expresión de la fórmula 2. Del mismo código para concretos livianos se puede aplicar la expresión de la fórmula 1, para la cual aparece un factor λ como un multiplicador de en toda la ecuación, donde $\lambda = 0.85$ en concretos de agregado grueso liviano y fino de arena, 0.75 para concreto de agregados fino y grueso livianos. Interpolaciones entre 0.75 y 0.85 son permitidas si se tienen mezclas con agregados finos entre convencional y liviano e igual para mezclas de agregados gruesos convencional y liviano.

$$E = W_c^{1.5} 33 \sqrt{f_c'} \quad \text{Fórmula 1}$$

$$E = 57000 \sqrt{f_c'} \quad \text{Fórmula 2}$$

Las variaciones en la gradación de agregado liviano por lo general tienen poco efecto sobre el módulo de elasticidad si los volúmenes relativos de la pasta de cemento y el agregado se mantienen bastante constantes. (ACI 213 R).

Para los valores del módulo de elasticidad en la ITZ, se ha encontrado que el módulo de elasticidad del hidróxido de calcio (CH) es mayor que la de silicato de calcio hidratado (C-S-H), en una matriz de A/C=0.5. La caída en la elasticidad macroscópica es una consecuencia de: (i) el aumento de la porosidad debido a la disolución de grandes cristales de CH; y (ii) la pérdida de elasticidad intrínseca de la fase C-S-H por descalcificación, de acuerdo con Constantinides & Ulm, (2004).

Los valores promedio del módulo de Elasticidad (E), en la ITZ de concretos livianos y convencional se encuentran en la Tabla 27. El módulo de elasticidad de la matriz cementante del agregado convencional fue medido logrando un valor promedio de 36.3 GPa con una desviación de 13.6%.

Estos datos junto con la Figura 83, muestran que el comportamiento de los agregados frente a cada diseño de mezcla es similar. Para la receta C5-0.35 el mayor valor para el módulo de elasticidad es de 30.2 GPa y corresponde a la pumita, seguido del agregado convencional de 30 GPa, estos valores, comparados con el módulo de elasticidad de la matriz cementante, corresponden al 78% y 77% respectivamente.

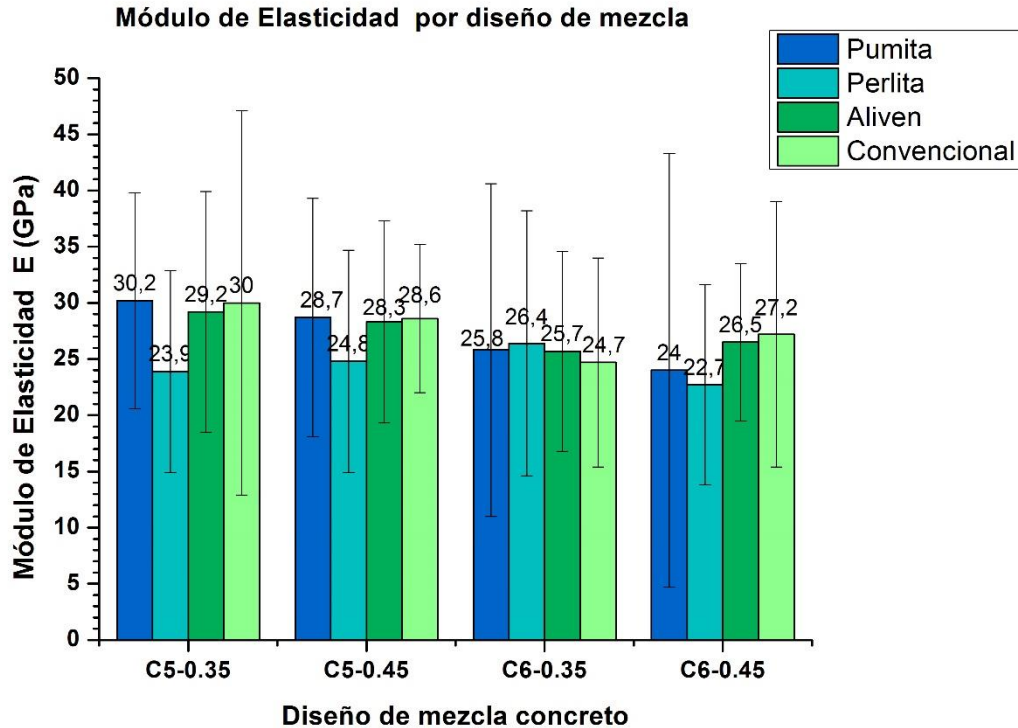


Figura 83. Módulo de elasticidad para concretos a 28 días de curado

Cui et al, (2012) argumentan que el módulo de elasticidad disminuye en los concretos livianos al aumentar la fracción por volumen dentro de la mezcla, validando a otros autores como la ACI 213R. Además, la disminución en el módulo elástico de LWAC con el aumento en el contenido de volumen de LWA sugieren que el módulo elástico de LWA es menor que el de la pasta de cemento. Así para 30% de contenido en volumen de LWA, la resistencia a la compresión y E del concreto liviano osciló entre 30.4 a 59.1 MPa y 21.3 a 28.7 GPa, mientras que al 50% de contenido en volumen de LWA, el rango fue de 18.9 a 54.7 MPa y 12.5 a 24.7 GPa, respectivamente.

En este estudio el porcentaje por volumen de agregados livianos en las recetas fue del 31% al 37%, así valores del módulo de elasticidad en la ITZ de los concretos livianos entre 22.7 a 30.2 GPa, son resultados similares a los obtenidos por Cui et al, 2012, quienes fabricaron concretos livianos de 400 y 500 kg/m³, A/C de 0.35 y 0.45, agregado fino arena, agregados gruesos de arcillas expandidas, esquistos expandidos y PFA sinterizados.

Una mejor variación para E se presenta en la Figura 84, módulo de elasticidad por tipo de agregado, se puede observar que los valores de E en la ITZ de los concretos livianos y el convencional son similares y empieza a tener efecto la cantidad de cemento, relación A/C y la absorción de agua de los agregados. El valor es menor para todos los concretos livianos y para el convencional al aumentar el contenido de cemento y mejora para todos al disminuir la A/C.

La receta C5-0.45 logra alcanzar valores para la pumita, aliven y convencional uno o dos puntos por debajo que la C5-0.35 para un 74% del módulo de elasticidad de la matriz.

Al aumentar la dosificación de cemento se aumenta la cantidad de agua de la mezcla para mantener la relación agua cemento del diseño, por este motivo, las dosificaciones

de mayor contenido de cemento pierden valor en el módulo de elasticidad en la ITZ, a causa de tener una interfaz más porosa generada por el aumento de la A/C en esta zona, respecto a la A/C del resto de la matriz cementante.

Tabla 27. Promedios espesor ITZ, resistencia a compresión a 28 días y módulos de elasticidad de concretos

Mezcla	Espesor ITZ (μm)	Resistencia compresión (MPa)	Promedio E, ITZ (GPa)	Desviación E (%)	Densidad concreto (kg/m^3)
POC5-0.35	50.6	23.8	30.2	9.6	1577.9
POC5-0.45	67.9	14.6	28.7	10.6	1551.7
POC6-0.35	68.9	14.2	25.8	14.8	1620.8
POC6-0.45	63.8	12.8	24.0	19.3	1652.3
PEC5-0.35	62.4	16.5	23.9	9.0	1444.8
PEC5-0.45	68.3	15.2	24.8	9.9	1581.6
PEC6-0.35	68.7	15.9	26.4	11.8	1760.4
PEC6-0.45	63.7	13.6	22.7	8.9	1567.2
ALC5-0.35	59.2	18.8	29.2	10.7	1525.3
ALC5-0.45	63.6	16.6	28.3	9.0	1534.1
ALC6-0.35	69.8	20.2	25.7	8.9	1574.9
ALC6-0.45	61.1	18.1	26.5	7.0	1532.5
COC5-0.35	65.7	48.5	30.0	17.1	2379.5
COC5-0.45	88.9	44.4	28.6	6.6	2328.0
COC6-0.35	87.7	56.7	24.7	9.3	2428.3
COC6-0.45	67.9	47.5	27.2	11.8	2279.5

La absorción de agua de los agregados en estado saturado superficialmente seco en la fabricación de los concretos, favorecen la disminución del microfisuramiento, al disminuir el calor de hidratación, y la retracción de la pasta cementante, microfisuras que afectan la matriz y la ITZ al ser sometidas a los distintos esfuerzos.

Adicional En la sección 4.2 se observa un posible efecto de reactividad puzolánica entre el agregado liviano de pumita, perlita y la matriz, ayudando a disminuir la porosidad en las mezclas de estos agregados livianos, por lo cual los módulos de elasticidad son valores cercanos al módulo del aliven, y de la matriz cementante.

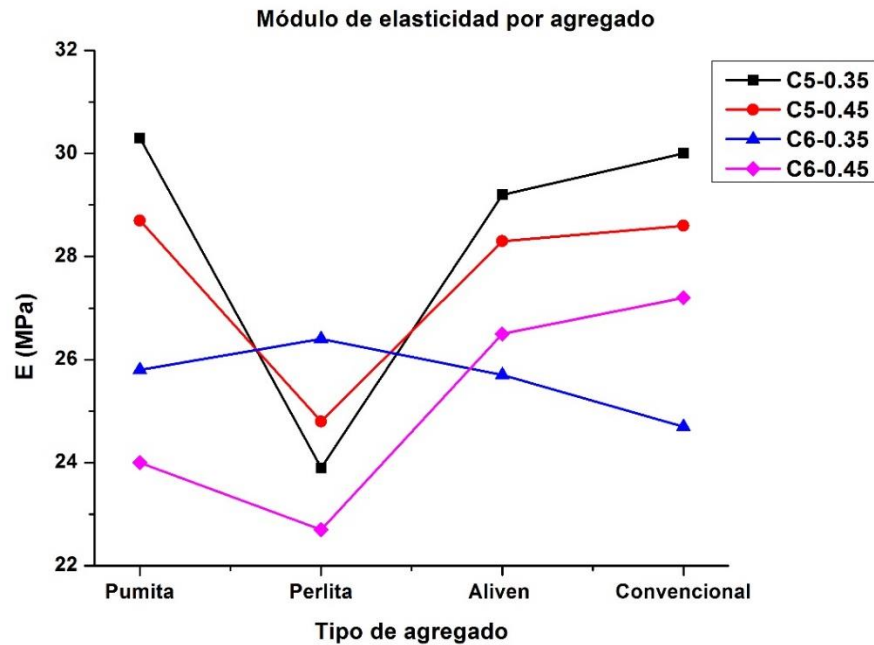


Figura 84. Módulo de elasticidad para concretos a 28 días de curado por tipo de agregado.

En la Figura 85, a la Figura 88, se presentan gráficos de contorno de la matriz de la zona indentada. Debido a que en la sección anterior se encontraron espesores menores a 100 μm , los diagramas en algunos casos corresponden a indentaciones en la ITZ y en la matriz cementante, y así podemos observar que los valores del módulo de elasticidad para la ITZ obtenidos en los concretos livianos no aumentan consistentemente cuando se alejan de la superficie del agregado y se acercan a la matriz. El módulo en la ITZ en algunos casos no es necesariamente menor que en la matriz cementante.

Se encuentra que el comportamiento del módulo de elasticidad en la matriz y en la ITZ cambia conjuntamente, así E es menor en la ITZ y en la Matriz para todos los concretos cuando se aumenta el contenido de cemento. E tiene mayor valor para todos los concretos en la matriz y en la ITZ al disminuir la A/C.

Los cristales de CH en forma de placa tienden a formarse en capas orientadas, proveyendo la formación de micro fisuras, esto junto con el volumen de poros capilares en la ITZ, incluso antes de que el concreto se somete a tensiones externas, son responsables de la menor rigidez y resistencia de la ITZ. Así la presencia de la ITZ en el concreto causa que el concreto falle a un nivel de esfuerzo menor, que la resistencia de cualquiera de sus dos constituyentes, (agregado y matriz cementante), dado que no se necesita mucha energía para extender las micro fisuras ya existentes en la ITZ. Lee & Cohen, (1998).

Sabemos que la ITZ ha sido afectada positivamente por la morfología de los agregados, las variaciones de la A/C, junto con la absorción de los agregados proveen de agua a ITZ y matriz cementante, mejorando la hidratación del cemento al disminuir el calor de hidratación y la retracción de la pasta cementante, Así la ITZ al poseer menor formación de micro fisuras, mejorando la rigidez, al comportamiento del módulo de elasticidad.

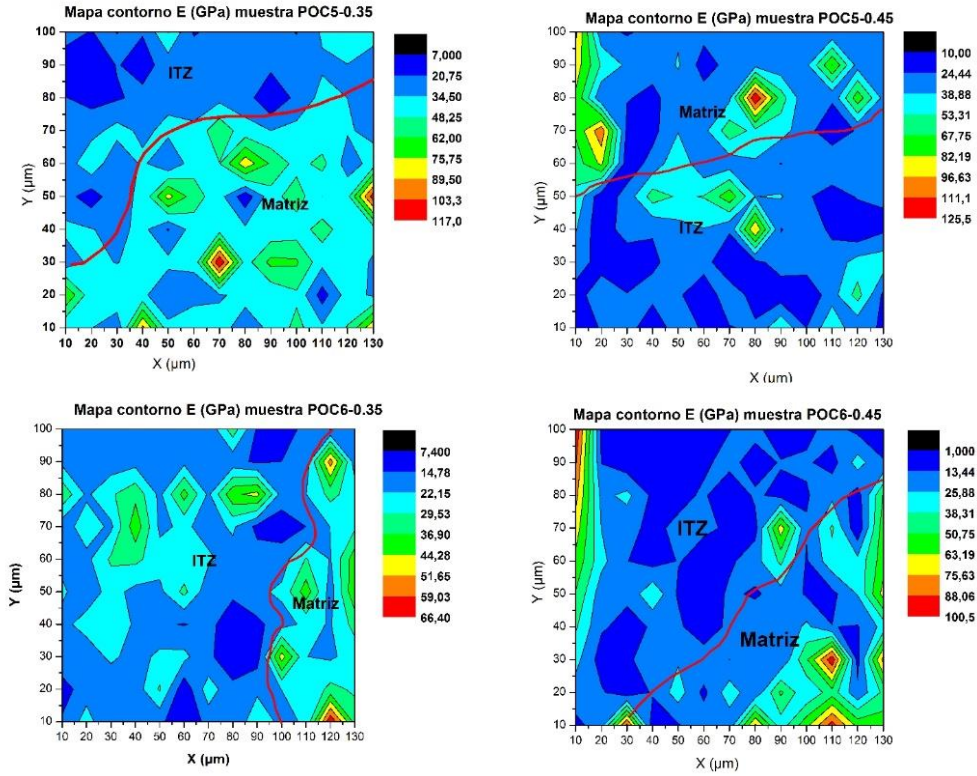


Figura 85. Mapa de contorno de matriz de indentaciones, concreto de pumita

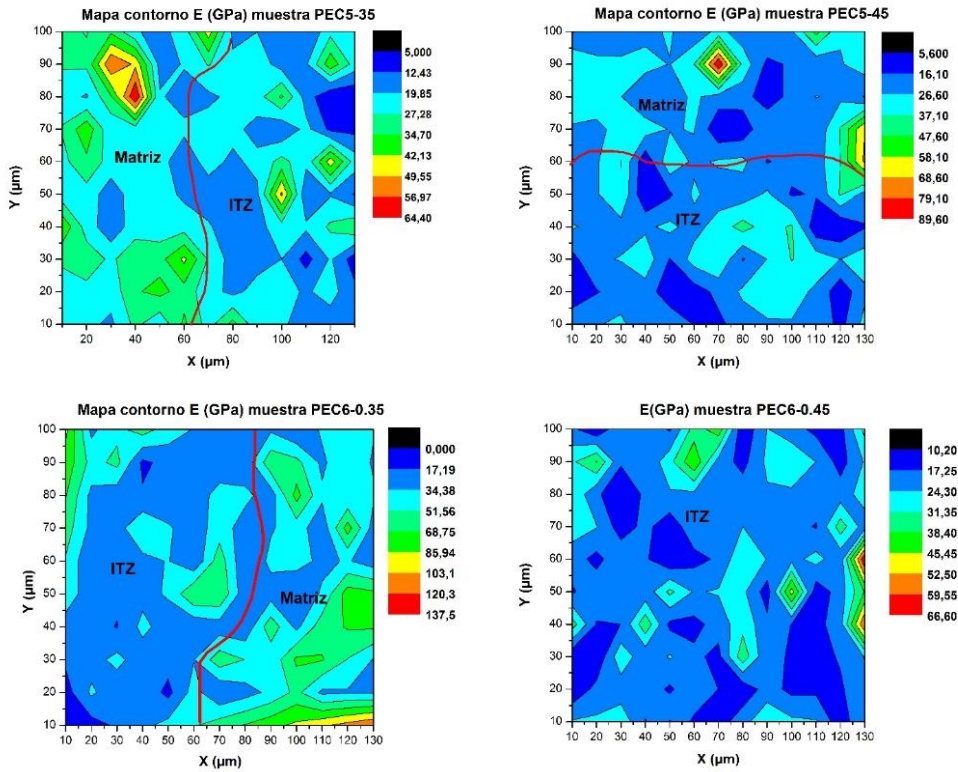


Figura 86. Mapa de contorno de matriz de indentaciones, concreto de perlita

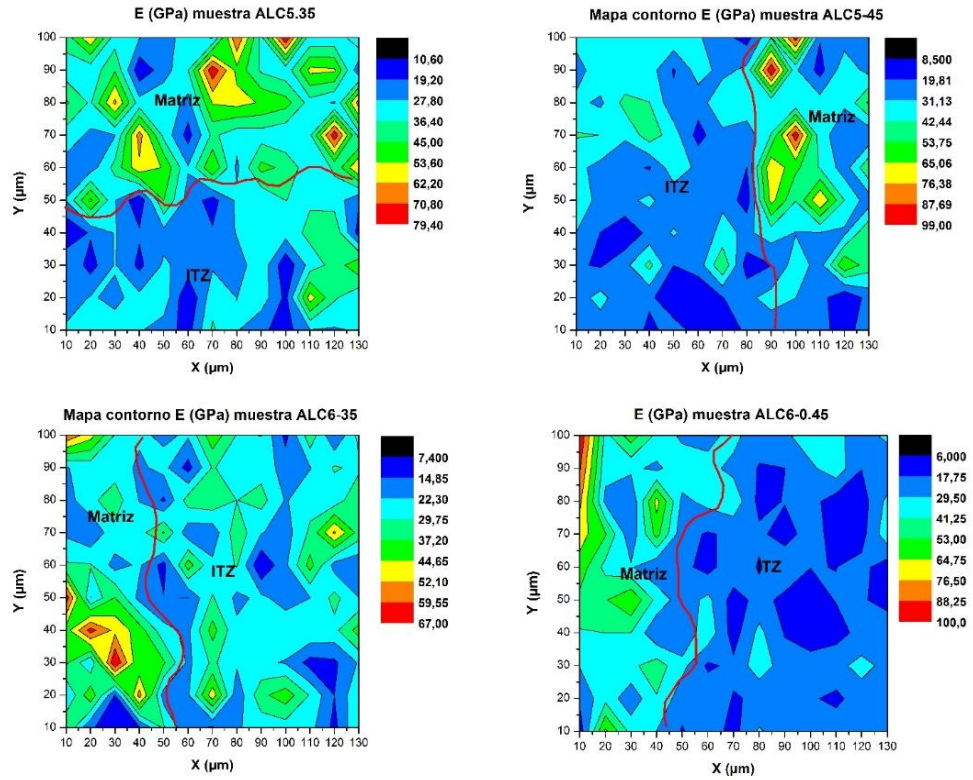


Figura 87. Mapa de contorno de matriz de indentaciones, concreto de aliven

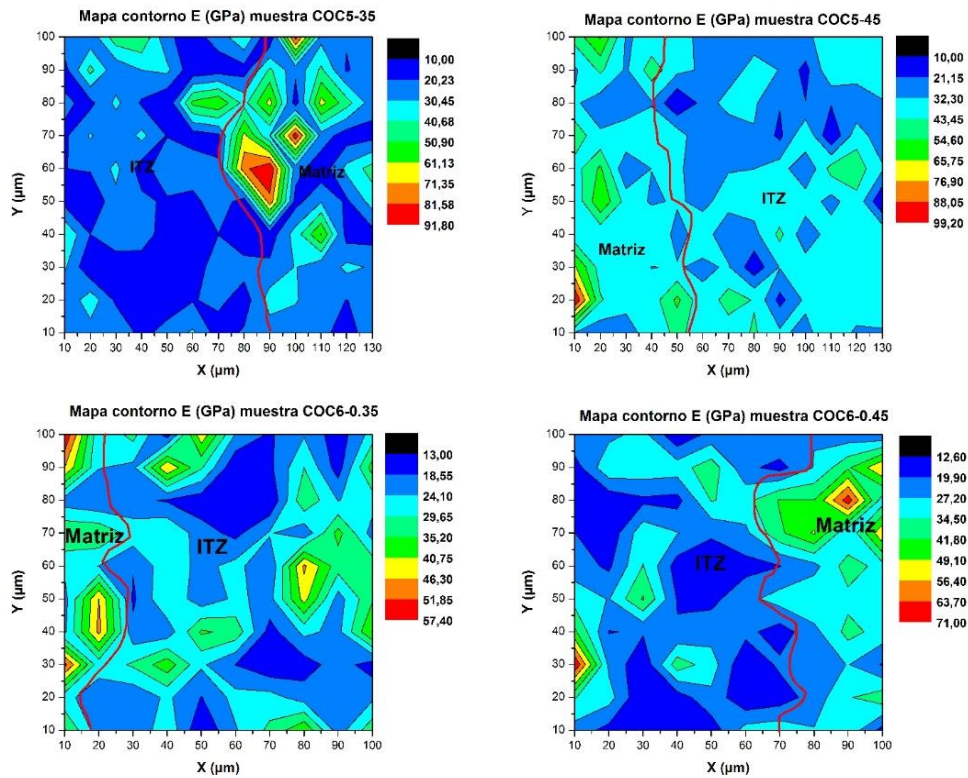


Figura 88. Mapa de contorno de matriz de indentaciones, concreto convencional

Constantinides, (2003), encuentra valores del módulo de elasticidad para la C-S-H de baja densidad entre 11 – 20 GP, para la C-S-H de alta densidad de 20 – 30 GPa; para la CH atribuye valores en el rango de 31 – 40 Gpa, módulos superiores a 80 GPa son atribuidos a granos de cemento sin hidratar, y módulos de elasticidad menores a 10 Gpa a poros de la matriz.

De las Figuras 85, 86, 87 y 88, de los distintos mapas de contorno del módulo de elasticidad de los concretos se clasificaron dos rangos para la ITZ y matriz, a pesar de estos presentar mayores divisiones se consideraron los dos rangos predominantes de cada mapa de contorno, Los valores se presentan en la Tabla 28.

De la Tabla 28, se puede notar que la ITZ de los concretos livianos que tienen menor relación agua cemento, está compuesta por poros capilares $E < A$ 10 GPa, CH y C-S-H de baja y alta densidad, sin la presencia de granos de cemento sin hidratar. La matriz cementante de estos concretos está compuesta por C-S-H de baja y alta densidad, algunas fases de CH, y en general sin la presencia de granos de cemento sin hidratar, excepto para la mezcla de POC5-0.45.

Tabla 28. Rangos de Módulo de Elasticidad para ITZ y Matriz

Mezcla	E promedio ITZ (GPa)	ITZ		Matriz	
POC5-0.35	30.2	7.0 – 20.7	20.7 – 34.5	34.5 – 48.0	48.8 – 75.7
POC5-0.45	28.7	10.0 – 24.4	24.4 – 38.8	10.0 – 38.6	38.6 – 82.1
POC6-0.35	25.8	7.0 – 14.7	14.7 – 29.5	22.1 – 29.5	29.5 – 44.2
POC6-0.45	24.0	3.0 – 13.4	13.4 – 25.8	13.4 – 25.8	25.8 – 50.7
PEC5-0.35	23.9	12.4 – 19.8	19.8 – 34.7	19.8 – 27.8	27.8 – 42.1
PEC5-0.45	24.8	5.6 – 16.1	16.1 – 37.1	5.6 – 16.1	16.1 – 37.1
PEC6-0.35	26.4	17.1 – 34.3	34.3 – 51.5	17.1 – 34.3	34.3 – 68.7
PEC6-0.45	22.7	10.2 – 17.2	17.2 – 31.3	–	–
ALC5-0.35	29.2	10.6 – 19.2	19.2 – 45.0	19.2 – 27.8	27.8 – 62.2
ALC5-0.45	28.3	8.5 – 19.8	19.8 – 31.1	8.5 – 19.8	19.8 – 65.0
ALC6-0.35	25.7	14.8 – 22.3	22.3 – 37.2	22.3 – 37.2	37.2 – 52.1
ALC6-0.45	26.5	6.0 – 17.5	17.5 – 29.5	17.5 – 29.5	29.5 – 64.7
COC5-0.35	30.0	10.0 – 20.2	20.2 – 40.6	10.0 – 20.2	20.2 – 81.3
COC5-0.45	28.6	10.0 – 21.1	21.1 – 43.4	21.1 – 32.3	32.3 – 54.6
COC6-0.35	24.7	13.0 – 18.5	18.5 – 40.7	18.5 – 29.6	29.6 – 46.3
COC6-0.45	27.2	12.6 – 19.9	19.9 – 34.5	19.9 – 34.5	34.5 – 55.4

Para el concreto convencional la ITZ está compuesta principalmente por CH y C-S-H de baja y alta densidad, al igual que la matriz cementante, sin la presencia de granos de cemento sin hidratar, excepto para la mezcla de COC5-0.35.

Para el ANOVA planteado para el módulo de elasticidad, la hipótesis nula consiste en que los factores “*Tipo de agregado*”, “*A/C*” y “*Dosificación de cemento*” no tienen ningún efecto sobre el módulo de elasticidad, y la hipótesis alterna, que los factores tienen efecto sobre el módulo de elasticidad.

En la Tabla 29 se muestra el valor-p obtenido para los factores y el R^2 del modelo estadístico. Por lo tanto se puede concluir del análisis estadístico que el tipo de agregado y la relación agua cemento y la dosificación de cemento no tuvo ningún efecto sobre el resultado del módulo de elasticidad, al igual que sus interacciones. Los experimentos tuvieron un R^2 en promedio de 77.63%, lo que significa que el modelo estadístico podría explicar el 77.63% de la variabilidad de los resultados, pero el R^2 ajustado con un valor de 15.05% menor indica que la variabilidad de este análisis no sólo es confiable, dado que se denota una observación con un residuo estandarizado grande.

Tabla 29. Resumen resultados de ANOVA para Módulo de Elasticidad

Efectos	Factor	Valor P	R^2
Principales	Tipo de Agregado	0.702	77.63%
	A/C	0.936	
	Dosificación Cemento	0.539	
Interacción	Tipo de agregado *A/C	0.569	77.63%
	Tipo de agregado *Dosificación cemento	0.300	
	A/C*Dosificación cemento	0.709	

Adicional para verificar el correcto muestreo y análisis estadístico, se realizaron las gráficas de los residuos para analizar los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia de la variable respuesta E. La Figura 89 muestra que la gráfica de probabilidad normal tiene una tendencia lineal, las gráficas de residuos versus orden y ajustes tampoco presentan ninguna tendencia. El histograma tiene forma aproximada de campana de Gauss, y tiende a ser bimodal y generan un problema de independencia y normalidad de los resultados, el cual invalida cualquier análisis estadístico y por lo tanto cualquier conclusión obtenida a partir de este análisis.

El análisis estadístico por poseer desviaciones estándar superiores al 20%, un posible factor incidente en la medición del módulo de elasticidad corresponde a la rugosidad de las muestras, producto del procedimiento de pulido aplicado. Para analizar la variabilidad de los resultados obtenidos de E, se realiza un análisis independiente del estadístico el cual indica que si hay efecto positivo de la dosificación de cemento y A/C, sobre el módulo de elasticidad de la ITZ de estos concretos.

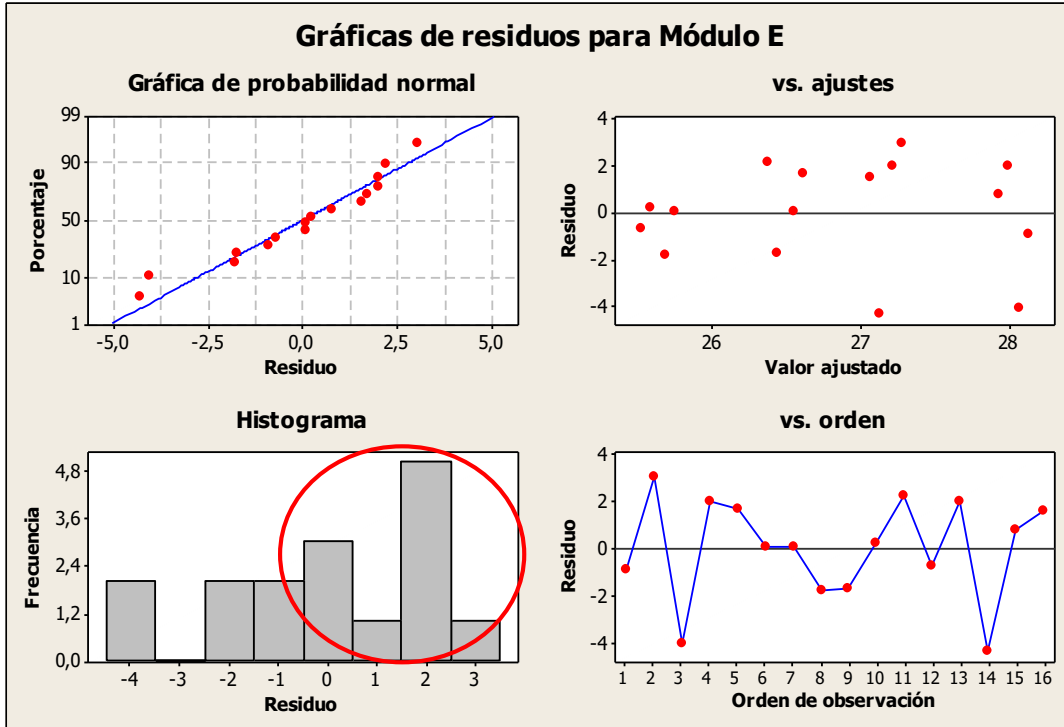


Figura 89. Verificación de supuestos estadísticos para resultados de resistencia a compresión. (Elaborado en Minitab)

Para los concretos convencionales se encuentra que el módulo de elasticidad, asociado a la rigidez del material, es mayor cuando la resistencia a la compresión es mayor. (Newman & Owens, 2003)

Al correlacionar los valores de resistencia mecánica y módulos de elasticidad Tabla 27 para las distintas dosificaciones y agregados junto a la Figura 90, observamos que el comportamiento de la resistencia es independiente del módulo de elasticidad. El mayor E no es el mayor valor de la resistencia a compresión, E logra valores de 30.3 GPa en la pumita (POC5-0.35) similar al módulo del concreto convencional (COC5-0.35) de 30.0 GPa y las resistencias a compresión de ambos concretos son distintas, pero para el concreto liviano, este módulo mayor si corresponde a la mayor resistencia a compresión y para el agregado convencional también.

En este proyecto se encontró que la porosidad de los agregados influyó en el la resistencia a compresión de los concretos livianos, y los resultados de módulo de elasticidad corresponden a la ITZ, y para estos resultados no hubo interferencia de E propio de cada agregado. Sólo el efecto de la morfología de los agregados, y la dosificación de cemento en la formación de la estructura de la ITZ. Por lo tanto se logra hacer una comparación de E para la ITZ de un concreto convencional, la matriz cementante y la ITZ de concretos livianos.

La Figura 91, correlaciona la influencia del espesor de la ITZ sobre el módulo de elasticidad, se puede observar que para espesores menores del concreto de pumita, el valor de E es mayor en la receta C5-0.35, y este comportamiento se replica en concreto de aliven y en el convencional. De la sección 4.3 se evidenció que el espesor de la ITZ es afectado por la relación agua cemento y por la morfología de los agregados; así un mayor

o menor espesor de la ITZ no es un indicador directo sobre la valoración de E en la ITZ, se trata de mediciones independientes para ambos valores, cuyas respuestas están afectadas por las mismas variables.

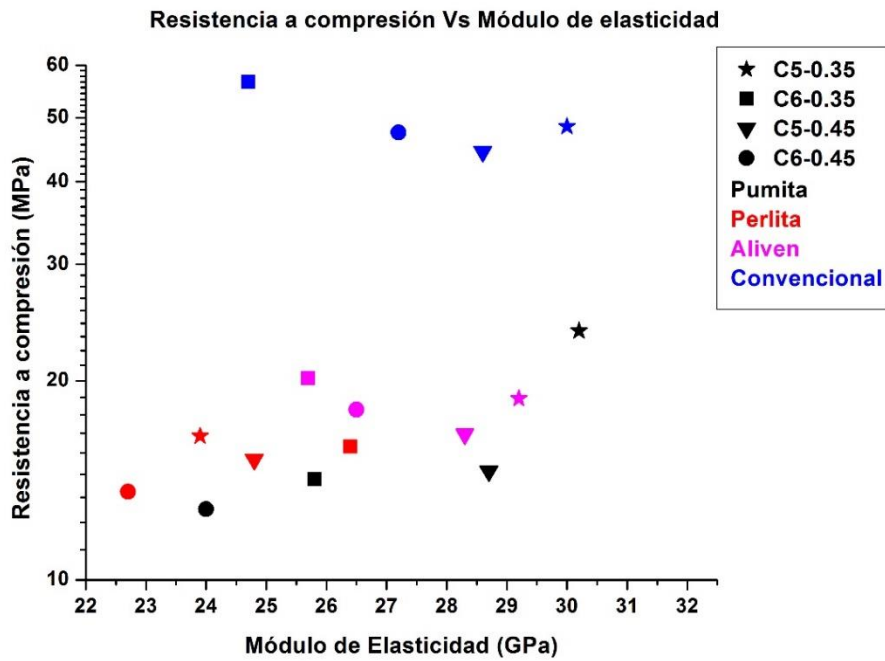


Figura 90. Módulo de elasticidad vs Resistencia a compresión

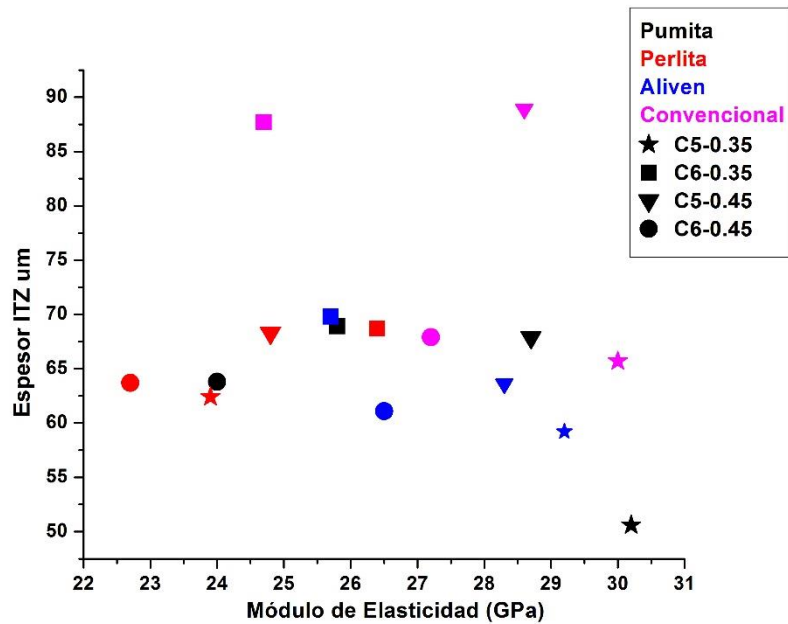


Figura 91. Módulo de elasticidad vs Espesor de la ITZ

5. Conclusiones

El estudio de la morfología de los agregados livianos y convencional, evaluada mediante la rugosidad del agregado, porosidad en la superficie y porosidad en su estructura, tiene una incidencia positiva en la formación de la microestructura de la ITZ.

Los agregados livianos contribuyeron a la formación de una ITZ densa, de espesor menor en algunos casos, al compararla con la ITZ de un concreto convencional. Las variaciones en la mejor densidad de la ITZ (menor porosidad y más fases de cemento hidratadas) son atribuidas a las propiedades físicas, composición química y morfológicas de los agregados livianos, debido a la porosidad superficial que contribuyó a la deposición de partículas de cemento, disminuyendo el efecto muro de la formación de la ITZ, y gestando desde la superficie la formación de fases hidratadas de C-S-H y CH, también favorecidas por la composición química de los agregados al generar reactividad puzolánica y físicas de entrelazamiento de fases hidratadas en la superficie de los agregados.

El índice de forma y textura puede llegar a incidir negativamente sobre el espesor de la ITZ, se observó que índices mayores para los agregados convencionales y agregados livianos como el aliven, lograron en algunos casos espesores mayores de la ITZ comparados con los espesores de los concretos de pumita y perlita, así la angularidad de estos últimos y la porosidad de la superficie, mejoraron en algunas mezclas la microestructura de la ITZ, haciéndola menos porosa y reduciendo su espesor. Se encontró que al aumentar la relación agua cemento en las mezclas de concreto de 0.35 a 0.45, el espesor de la ITZ aumentaba.

Los resultados obtenidos para el espesor, resistencia a compresión y módulo de elasticidad, llevaron a identificar la influencia de la morfología de los agregados livianos naturales de pumita y perlita en la formación de la ITZ, siendo estos dos agregados los de mayor influencia sobre la resistencia a compresión. Debido a la menor densidad y mayor porosidad, una vez la carga es aplicada, fallan los agregados, y la fractura es transmitida a la matriz cementante rápidamente debido a la porosidad interna de los agregados.

A pesar de este fenómeno de falla en los concretos livianos, se logran alcanzar valores para la resistencia a compresión de 23.8 MPa en los concretos de pumita versus 20.2 MPa para el concreto de aliven.

Para los concretos convencionales la resistencia a compresión se ve afectada por la variación de la relación agua cemento y la dosificación de cemento, las distintas mezclas obtuvieron resistencias cercanas a la resistencia de la pasta cementante.

El lograr resistencias a compresión superiores a los 17.5 MPa, para los concretos de pumita y aliven, equivale a decir que este proyecto logró desarrollar concretos livianos

estructurales, también se lograron densidades menores a 1920 kg/m^3 , valores establecidos por la ACI 213-03.

Para el módulo de elasticidad de los concretos livianos en la ITZ, este se ve afectado positivamente por la morfología de los agregados, la dosificación de cemento y relación agua cemento del sistema. Relaciones agua cemento de 0.35 y dosificación de 500 kg/m^3 de cemento, tienen a aumentar el valor del módulo de elasticidad en la ITZ. Para los concretos livianos como en el convencional, los valores del módulo de elasticidad en la ITZ, corresponden en su mayoría a fases de C-S-H de baja y alta densidad, seguido de una proporción de CH y menor de poros capilares. Mientras en la matriz, la composición es mayormente de fases de C-S-H de baja y alta densidad, seguido de una proporción de CH y algunos granos de cemento sin hidratar.

El encontrar en este proyecto módulos de elasticidad en la ITZ de concretos livianos similares al de la matriz cementante, indica que el comportamiento de la ITZ que sirve de puente entre dos componentes de diferente rigidez (agregado y pasta cementante), y que ha sido considerada como el eslabón débil del concreto, reducirá su efecto en el comportamiento del concreto liviano al aplicar esfuerzos. Debido a que la ITZ ha sido afectada positivamente por la morfología de los agregados, dosificación de cemento y A/C, los cuales han disminuido la porosidad, favorecido la formación de C-S-H, disminución del calor de hidratación y retracción de la pasta cementante. Así la ITZ al poseer menor formación de micro fisuras, mejoró la rigidez, al comportamiento del módulo de elasticidad.

Con la aplicación del diseño de experimentos, considerando como factores de diseño "*Tipo de agregado*", "*A/C*" y "*Dosificación de cemento*", para las variables respuesta, espesor de ITZ, resistencia a compresión y módulo de elasticidad; se identificó que a pesar del no cumplimiento del supuesto de normalidad e independencia, al presentarse un comportamiento bimodal de la campaña de Gauss, existe un efecto significativo de los tres factores estudiados. En el caso del módulo de elasticidad, un efecto a considerar sobre la variabilidad de los datos puede ser atribuido a la rugosidad de las muestras analizadas, y ésta a su vez del procedimiento de pulido aplicado.

Recomendaciones para trabajos futuros

Como recomendaciones de este proyecto se pueden tener las siguientes:

Se recomienda estudiar el efecto de la rugosidad de la superficie de las muestras en el ensayo de nanoindentación, para determinar con menor desviación los valores del módulo de elasticidad.

Se recomienda estudiar la permeabilidad de la matriz cementante versus la permeabilidad de la microestructura de la ITZ, para establecer la influencia del tamaño de poros de la ITZ e identificar si la morfología afecta dicho tamaño y cómo esta porosidad de la ITZ afecta la resistencia a compresión de los concretos.

Se recomienda analizar la relación calcio-silicio en la ITZ y en la matriz de los concretos para establecer el mecanismo de densificación de la ITZ a causa de la reactividad puzolánica.

Se recomienda estudiar el efecto del ataque a sulfatos de los concretos livianos, que permita estudiar si la morfología de la ITZ favorece positivamente la durabilidad de estos concretos.

6. Bibliografía

ACI 213, (2003). Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. ACI Manual of Concrete Practice.

ACI 211.2, (1998). Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete.

Acosta, a, J Cabrera, and A Medina. 2007. Influencia de la forma y la textura de los agregados gruesos. 1er Congreso Nacional de Ingenieria Civil. <http://www.ing.una.py/pdf/1er-congreso-nacional-ingcivil/03ho-ma-03.pdf>.

Ayhan, M., Gönül, H., Gönül, İ. A., & Karakuş, A. (2011). Effect of basic pumice on morphologic properties of interfacial transition zone in load-bearing lightweight/semi-lightweight concretes. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2507–2518.

Anwar Hossain, K. M. (2004). Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 283–291.

ASTM C29 /C 29M - 97. Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate.

ASTM C127 - 07. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.

ASTM C136 - 01. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.

ASTM C330 - 99. Standard Test Method for Lightweight Aggregates for structural concrete.

ASTM C349 - 08. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars.

ASTM D3398 - 00. Standard Test Method for Index of Aggregate Particle Shape and Texture

Bentz, D. P. (2009). Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars. *Cement and Concrete Composites*, 31(5), 285–289.

Bentur, a., & Alexander, M. G. (2000). A review of the work of the RILEM TC 159-ETC: Engineering of the interfacial transition zone in cementitious composites. *Materials and Structures*, 33(2), 82–87.

Bektas, F., Turanlı, L., & Monteiro, P. J. M. (2005). Use of perlite powder to suppress the alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 35(10), 2014–2017

Celik, A. G., Kilic, A. M., & Cakal, G. O. (2013). Expanded perlite aggregate characterization for use as a lightweight construction raw material. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49(2), 689–700.

- Chandra, S. & Berntsson, L. (2002). Lightweight aggregate concrete, Science, Technology, and Applications. Chapter N°6. Pag 131-164.
- Constantinides, G. (2003). On the use of nanoindentation for cementitious materials. *Materials and Structures*, 36(257), 191–196.
- Constantinides, G., & Ulm, F.-J. (2004). The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 67–80.
- Cui, H. Z., Lo, T. Y., Memon, S. A., & Xu, W. (2012). Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 149–158.
- Elsharief, A., Cohen, M. D., & Olek, J. (2003). Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1837–1849.
- Elsharief, A., Cohen, M. D., & Olek, J. (2005). Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar. *Cement and Concrete Research*, 35(7), 1368–1376.
- Fagerlund, G. (1978). Frost resistance of Concrete with Porous Aggregate ", Report of Cement and Concrete Institute in Sweden.
- Garboczi E.J., Bentz D.P. (1991). Digital-simulation of the aggregate–cement paste interfacial zone in concrete, *J. Mater. Res.* 6 (1) 196–201.
- Hong, L., Gu, X., & Lin, F. (2014). Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete. *Construction and Building Materials*, 65, 338–349.
- Hu, C., & Li, Z. (2015). A review on the mechanical properties of cement-based materials measured by nanoindentation. *Construction and Building Materials*, 90, 80–90.
- Hu, J., & Stroeve, P. (2006). Shape Characterization of Concrete Aggregate. *Image Analysis & Stereology*, 25(1), 43–53.
- Hui, X., Jacobsen, S., Ying, J., Liang, Z., Foon, S., & Lea, H. (2009). Application of nanoindentation testing to study of the interfacial transition zone in steel fiber reinforced mortar. *Cement and Concrete Research*, 39(8), 701–715.
- Jamkar, S. S., & Rao, C. B. K. (2004). Index of Aggregate Particle Shape and Texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 2021–2027.
- Kwan, a. K. H., Mora, C. F. (2001). Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles. *Magazine of Concrete Research*, 53(2), 91–100.
- Ke, Y., Beaucour, A. L., Ortola, S., Dumontet, H., & Cabrillac, R. (2009). Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2821–2828.
- Ke, Y., Ortola, S., Beaucour, a. L., & Dumontet, H. (2010). Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone (ITZ). *Cement and Concrete Research*, 40(11), 1590–1600.
- Kong, L., Hou, L., & Du, Y. (2014). Chemical reactivity of lightweight aggregate in cement paste. *Construction and Building Materials*, 64, 22–27.

- Lee, Turng-Fang. F. & Cohen, M. D. (1998). Strength and durability of concrete: Effects of cement paste-aggregate interfases. Vol. II, Significance of transition zones on physical and mechanical properties. Purdue University. 260p.
- Lo, T. Y., Cui, H. Z., Tang, W. C., & Leung, W. M. (2008). The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 22(4), 623–628
- Lo, Y. Gao, X. F. & Jeary, A. P. (1999). Microstructure of pre-wetted aggregate on lightweight concrete. *Building and Environment* 34, 759–764.
- Martínez, D. R. Concreto liviano estructural con arcilla expandida térmicamente extraída de canteras localizadas en el sur de la sabana de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. (2010).
- Maya, M. (2006). Zonas potenciales para agregados naturales en los alrededores de Medellín, Colombia, 117(4), 703–714.
- Melgarejo J.C. (2003) Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada. Editorial Universidad de Barcelona. España.
- Molina Bas, O. I.; Moragues Terrades, A.; Gálvez Ruiz, J. C. (2008). Procesos de hidratación del cemento portland, porosidad. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. p46-55
- Monteiro, P. J. M., and Mehta, P. K., (1986). Interaction between carbonate rock and cement paste, *Cement and Concrete Research* 16:127–134.
- Nemati, K.M. (2005). The Strength of concrete, University of Washington, USA, Winter Quarterly.
- Neville, A. M. y Brooks, J. J. (1999). Tecnología del concreto. Editorial Trillas. México
- Newman, J., & Owens, P. (2003). 2 - Properties of lightweight concrete. *Advanced Concrete Technology Set*. Woodhead Publishing Limited.
- Oliver, W. C., & Pharr, G. M. (2004). Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 19(01), 3–20.
- Ollivier, J.P. Maso, J.C. Bourdette B. 1995. Interfacial Transition Zone in Concrete. *Advn Cem Bas Mat*, 2(94), 30-38.
- Pan, T., & Tutumluer, E. (2007). Quantification of Coarse Aggregate Surface Texture Using Image Analysis. *Journal of Testing and Evaluation*, 35(2), 100181.
- Punkki, J. & GjØrv, O. E. (1995). Effect of Water Absorption by Aggregate on Properties of High-Strength Lightweight Concrete. *International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*, ed. by I. Holand, T. A. Hammer and F. Fluge, Norwegian Concrete Association, Oslo. pp. 604-616
- Rao, G. A., & Prasad, B. K. R. (2002). Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength. *Cement and Concrete Research*, 32(2), 253–257.
- Restrepo, J. C., Restrepo, O.J., Tobón, J.I. (2012). Reducción de CO2 en la industria cementera por medio de procesos de síntesis química. *Revista Colombiana de Materiales* N. 5 pp. 54-60
- RILEM Technical Committees 78-MCA and 51-ALC. (1993). *Autoclaved Aerated Concrete Properties, Testing, Design*, Londres, 404 pp

- Sánchez De Guzmán, D. (2001). *Tecnología Del Concreto y Del Mortero*. Biblioteca de la Construcción. Editorial Bhandar. Bogotá Colombia.
- Sánchez-Fajardo, V. M., Torres, M. E., & Moreno, a. J. (2014). Study of the pore structure of the lightweight concrete block with lapilli as an aggregate to predict the liquid permeability by dielectric spectroscopy. *Construction and Building Materials*, 53, 225–234
- Sari, D., & Pasamehmetoglu, A. G. (2005). The effects of gradation and admixture on the pumice lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 936–942.
- Scholer, C.F. (1969). The role of mortar-aggregate bond in the strength of concrete” Purdue University, USA, Engineering Reprints
- Sidorova, A., Vazquez-Ramonich, E., Barra-Bizinotto, M., Roa-Rovira, J. J., & Jimenez-Pique, E. (2014). Study of the recycled aggregates nature’s influence on the aggregate–cement paste interface and ITZ. *Construction and Building Materials*, 68, 677–684.
- Solano J. (2011) Instituto costarricense del cemento y concreto, Boletín N° 31, Tomado de <http://boletin-icccyc.com/index.php?docId=94&seclId=679>, Abril de 2014.
- Spiesz, P. Yu, Q. L. & Brouwers, H.J.H. (2013). Development of cement-based lightweight composites – Part 2: Durability-related properties. *Cement & Concrete Composites*. In Press, Corrected Proof, Available online 17 April.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry*. 2nd ed. Thomas Telford, London.. 459p.
- U.S. Department of the Interior, & Geological, S. (2010). *Mineral Commodity Summaries, Minerals yearbook*.
- Wasserman, R, Bentur A. (1996). Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength. *Cement Concrete Composite* 18(1):67–76.
- Xiao, J., Li, W., Sun, Z., Lange, D. a., & Shah, S. P. (2013). Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by Nanoindentation. *Cement and Concrete Composites*, 37, 276–292.
- Xie, Y., Corr, D. J., Jin, F., Zhou, H., & Shah, S. P. (2015). Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC). *Cement and Concrete Composites*, 55, 223–231.
- Zhang, M.-H., & GjØrv, O. E. 1-(1990). Microstructure of the Interfacial zone Between Lightweight Aggregate and Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, 20(c), 610–618.
- Zhang, M.-H., & GjØrv, O. E. 2-(1990). Pozzolanic reactivity of lightweight aggregates, 20(c), 884–890.