

2011

LUCIO
GUILLERMO
LÓPEZ YÉPEZ



**INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE ADICIÓN
DE LA MICROSILICE Y DEL TIPO DE CURADO,
EN LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO EN
EL CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO**

**INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE ADICIÓN DE LA MICROSILICE Y DEL TIPO DE CURADO, EN LA
PENETRACIÓN DEL ION CLORURO EN EL CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO**

**Presentado por:
LUCIO GUILLERMO LÓPEZ YÉPEZ**

**Tesis presentada como requisito para optar el título de:
MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAS**

**Director:
JUAN MANUEL LIZARAZO MARRIAGA**

**Codirector:
JOSE GABRIEL GOMEZ CORTES**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN ESTRUCTURAS
BOGOTÁ D.C.
2011**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, enero del 2011

La ingeniería es el arte de modelar materiales que no comprendemos completamente, en formas que no podemos analizar precisamente y soportando fuerzas que no podemos preveer exactamente, de manera tal que el público no tenga razones para sospechar la extensión de nuestra ignorancia

Dr AR Dykes, British Institution of Structural Engineers, 1976.

Jairo Uribe Escamilla, Notas de clases Estructuras metálica ECI

Agradecimientos Especiales

Gracias a la vieja y al viejo, a toda mi familia, a mi Clarita bella, a mis amigos, ellos son lo más importante en mi vida, son las personas que siempre están a mi lado apoyándome en mis ideas locas de llegar a las estrellas y no a la luna.

Agradecimientos.

Esta tesis fue desarrollada con la colaboración de muchas personas, que se merecen todo el agradecimiento por la ayuda incondicional prestada para hacer realidad esta investigación:

Especial agradecimiento al ingeniero José Gabriel Gómez Cortes, por toda las enseñanzas impartidas en el área de la tecnología del concreto, por toda su colaboración en el transcurso de esta tesis y por todas las enseñanzas que me transmitió a lo largo de esta maestría.

Agradecimiento especial al Ingeniero Juan Manuel Lizarazo, por su amistad incondicional, por toda su colaboración en los momentos difíciles a lo largo de esta investigación y por el conocimiento adquirido por sus enseñanzas.

A los ingenieros Dorian Linero, Caori Takeuchi, Juan Tamasco, Carlos Vallecilla, Ricardo Parra y Gabriel Valencia por la formación impartida, a este su servidor, en este honorable claustro.

Al Ingeniero Ricardo Martínez, por su colaboración en la coordinación de las actividades realizadas en el laboratorio de estructuras.

A pastor Riaño, un amigo más, por toda la colaboración en la realización de los ensayos de mi tesis de maestría.

A Jorge Olarte, José López Julio Botia, por el apoyo en las diferentes actividades del laboratorio.

A Edgar Lizarazo y Edgar Rodríguez, quienes me colaboraron en la generación de las muestras de mi tesis de maestría.

A los Ingenieros Fabián Lamus, Juan Herrera, Manuel Jovane, Alexander Cortes, Diego Martínez, Oscar Pinzón, Jacobo Pinilla y Nelson Rodríguez, con quienes compartí infinidad de experiencias en este proceso de formación y con los cuales se generó amistad tras el batallar propio de la Maestría en Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia.

A la empresa Obciviles S.A. por la donación de los agregados del Rio Cohello, del Departamento del Tolima.

Al ingeniero Germán Hermida por la donación del plastificante utilizado en la primera fase de esta investigación.

Al Ingeniero Juan Carlos acero por la donación del plastificante usado en la fase final de este estudio.

A Luis Jiménez quien realizó la donación del impermeabilizante.

Contenido de la tesis.

Introducción

Antecedentes

Objetivos

1	Teoría conceptual	25
1.1	Historia del Concreto.....	25
1.2	Concreto de Alto Desempeño.....	26
1.2.1	Materiales del concreto de alto Desempeño.....	27
1.2.2	Propiedades del Concreto de Alto Desempeño.....	29
1.3	Durabilidad del Concreto.....	37
1.3.1	Vida Útil.....	37
1.3.2	Mecanismos de deterioro en el concreto.....	38
1.3.3	Modelos de vida útil.....	39
1.4	Mecanismos de transporte a través del concreto.....	40
1.4.1	Permeabilidad.....	41
1.4.2	Difusión.....	41
1.4.3	Electromigración.....	42
1.4.4	Termomigración.....	43
1.4.5	Absorción.....	43
1.4.6	Porosidad.....	44
1.4.7	Ensayo de estado de difusión uniforme.....	44
1.4.8	Ensayo de estado de difusión no uniforme.....	45
1.5	Cloruros en el concreto reforzado.....	45

1.6	La durabilidad en el Concreto de Alto Desempeño (HPC).	48
2	Programa Experimental.	51
2.1	Resistencia a compresión en el HPC.	56
2.2	Modulo de elasticidad (E) en el concreto de alto desempeño.	58
2.3	Velocidad de pulso Ultrasónico en el concreto de alto desempeño.	60
2.4	Métodos de medición de la valoración de los cloruros en el concreto.	60
2.4.1	Método de colorimetría en el concreto de alto desempeño.	60
2.4.2	Ensayo Rápido de Permeabilidad de Cloruros ASTM 1202 en el HPC.	63
2.4.3	Resistividad eléctrica del hormigón de alto desempeño.	65
2.5	Calculo de la porosidad en el concreto de alto desempeño.	66
3	Materiales	68
3.1	Agregados	68
3.1.1	Agregados del Departamento de Cundinamarca (CT1 Y CT2).	68
3.1.2	Agregados del Departamento del Tolima (TC).	71
3.1.3	Agregados del Departamento del Meta (MV).	72
3.1.4	Resumen de propiedades de los agregados gruesos usados.	73
3.1.5	Agregado fino del Departamento de Cundinamarca.	73
3.2	Cemento.	74
3.3	Microsilice.	75
3.4	Aditivos.	77
3.5	Gel de transición de ondas de VPU.	78
3.6	Nitrato de plata, Cloruro de Sodio y Hidroxido de Sodio.	79
4	Resultados y análisis de resultados.	80
4.1	Desarrollo y optimización del Concreto de Alto Desempeño.	80
4.1.1	Resistencia a compresión del Concreto de Alto Desempeño.	80
4.1.2	Módulo de elasticidad del Concreto de Alto Desempeño.	85
4.2	Propiedades mecánicas del HPC optimizado.	89
4.2.1	Resistencia a compresión del HPC con diferentes % de microsilice.	90

4.2.2	Influencia del % de adición de microsilice y del tipo de curado en la F'c.....	94
4.2.3	Influencia del % de adición de microsilice y del tipo de curado en el E.	95
4.3	Resultados de durabilidad del HPC ante el ion cloruro.....	97
4.3.1	Penetración del ion cloruro en el HPC con diferentes tipos de curado y % de microsilice.....	97
4.3.2	Influencia del % de adición de microsilice y del tipo de curado en el coeficiente de penetrabilidad del HPC.....	98
4.3.3	Influencia del porcentajes de microsilice y del tipo de curado en la resistividad del concreto.....	98
4.3.4	Influencia del porcentaje de microsilice y del tipo de curado en la carga en Coulombs del HPC.	100
4.3.5	Influencia del porcentaje de microsilice y del tipo de curado en la porosidad del HPC.....	101
4.3.6	Correlación entre la resistividad y el RCPT del HPC.....	103
	De igual manera, se puede observar que entre mayor sea la resistividad, menor es la carga en coulomb medida con la prueba de RCPT.	103
4.3.7	Correlación entre resistividad y la resistencia a compresión del HPC.....	104
4.3.8	Correlación entre el RCPT y la resistencia a compresión del HPC.....	105
4.3.9	Correlación entre el método de colorimetría y la resistencia a compresión del HPC...	106
4.3.10	Correlación entre el método de colorimetría y el ensayo de RCPT en el HPC.....	107
4.3.11	Correlación entre el método de colorimetría y la resistividad.....	108
4.3.12	Correlación entre el método de colorimetría y la porosidad en el HPC.....	109

Conclusiones y recomendaciones

Referencias

Lista de graficas.

<i>Grafica1. Granulometría del agregado grueso Cundinamarca – Tunjuelo</i>	<i>69</i>
<i>Grafica2. Granulometría del agregado grueso Cundinamarca – Tabio</i>	<i>70</i>
<i>Grafica3. Granulometría del agregado grueso Tolima – Chicoral</i>	<i>71</i>
<i>Grafica4. Granulometría del agregado grueso Meta –Guayuriba.....</i>	<i>72</i>
<i>Grafica5. Granulometría del agregado fino Tabio-Cundinamarca</i>	<i>74</i>
<i>Grafica6. Resistencia a compresión promedio del HPC con diferentes agregados.....</i>	<i>82</i>
<i>Grafica7. Evolución de la resistencia a compresión del Concreto de Alto Desempeño....</i>	<i>84</i>
<i>Grafica8. Correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad de onda.....</i>	<i>84</i>
<i>Grafica9. Módulo de elasticidad del HPC con diferentes agregados y distintas relaciones A/C.....</i>	<i>85</i>
<i>Grafica10. Evolución del modulo de elasticidad a edades tardías.....</i>	<i>86</i>
<i>Grafica11. Correlación entre el módulo de elasticidad y la raíz de la resistencia a compresión.....</i>	<i>87</i>
<i>Grafica12. Correlación entre el E y $Wc^{1.5}\sqrt{f'c}$ en el HPC.</i>	<i>88</i>
<i>Grafica13. Correlación entre módulo de elasticidad y velocidad de onda.....</i>	<i>89</i>
<i>Grafica14. Resistencia a compresión a edades tardías con 0% de microsilice.</i>	<i>91</i>
<i>Grafica15. Resistencia a compresión a edades tardías con 5% de microsilice.</i>	<i>92</i>
<i>Grafica16. Resistencia a compresión a edades tardías con 10% de microsilice.</i>	<i>93</i>
<i>Grafica17. Resistencia a compresión a edades tardías con 15% de microsilice.</i>	<i>94</i>
<i>Grafica18. Grafica en 3D de resistencia, % de adición y edad del HPC.....</i>	<i>94</i>
<i>Grafica19.....</i>	<i>95</i>
<i>Grafica20. Influencia del tipo de curado y del porcentaje de microsilice, en la edad del HPC.....</i>	<i>95</i>
<i>Grafica21. Influencia del porcentaje de microsilice y del tipo de curado en la edad del E, para Concretos de Alto Desempeño.</i>	<i>96</i>
<i>Grafica22. Influencia del porcentaje de microsilice y del tipo de curado en la penetración del ion cloruros.....</i>	<i>97</i>

<i>Grafica23. Coeficientes de penetrabilidad en el HPC con diferentes porcentajes de microsilice y diferentes tipos de curados.</i>	<i>98</i>
<i>Grafica24. Influencia del tipo de curado y del porcentaje de microsilice en la resistividad del Concreto de Alto Desempeño.....</i>	<i>99</i>
<i>Grafica25. Influencia del porcentaje de microsilice y del tipo de curado en la carga en Coulombs, en el HPC.</i>	<i>100</i>
<i>Grafica26. Influencia del porcentaje de microsilice y del tipo de curado en la porosidad abierta.....</i>	<i>101</i>
<i>Grafica27. Resistividad vs RCPT en el HPC.</i>	<i>103</i>
<i>Grafica28. Resistividad vs Resistencia a compresión del HPC.</i>	<i>104</i>
<i>Grafica29. RCPT vs Resistencia a compresión del HPC.....</i>	<i>105</i>
<i>Grafica30. Colorimetria vs resistencia a compresión del HPC.....</i>	<i>106</i>
<i>Grafica31. Colorimetria vs RCPT.....</i>	<i>107</i>
<i>Grafica32. Colorimetria vs resistividad en el HPC</i>	<i>108</i>
<i>Grafica33. Colorimetria vs porosidad en el HPC.....</i>	<i>109</i>

Lista de tablas.

<i>Tabla 1. Ensayos y numero de probetas de la fase I</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 2. Ensayos y numero de probetas de la fase II</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 3. Penetrabilidad del ion cloruro basada en la carga pasada.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 4. Propiedades físicas del agregado grueso Cundinamarca - Tunjuelo</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 5. Propiedades físicas del agregado grueso Cundinamarca – Tabio.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 6. Propiedades físicas del agregado grueso Tolima - Chicoral.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 7. Propiedades físicas del agregado grueso Meta -Guayuriba</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 8. Resumen de propiedades de los agregados.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 9. Propiedades físicas del agregado fino Tabio-Cundinamarca.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 10. Propiedades físicas del cemento de uso general.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 11. Parámetros químicos del cemento de uso general (suministrados por el fabricante..).....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 12. Composición química de la microsilice por DFX.</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 13. Dosificación de mezclas iniciales del HPC.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 14. Asentamientos del HPC inicial.</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 15. Dosificación de mezclas del HPC, para cada uno de los porcentajes estudiados....</i>	<i>90</i>

Lista de Fotografías.

<i>Fotografía 1. Falla explosiva y súbita del concreto de alto desempeño.....</i>	<i>31</i>
<i>Fotografía 2. Microestructuras de altas relaciones A/C en el concreto. Tomado (Aitcin, 2003).....</i>	<i>49</i>
<i>Fotografía 3. Microestructuras de bajas relaciones A/C en el concreto. Tomado (Aitcin, 2003).....</i>	<i>50</i>
<i>Fotografía 4. Tipos curado usados en la investigación del HPC.</i>	<i>55</i>
<i>Fotografía 5. Almohadillas de neopreno para el ensayo de resistencia a compresión del concreto.....</i>	<i>57</i>
<i>Fotografía 6. Maquina Universal Forney.....</i>	<i>57</i>
<i>Fotografía 7. Cilindro de concreto con sus correspondientes anillos para medición de módulos.....</i>	<i>58</i>
<i>Fotografía 8. Perfiles de penetración del ion cloruro del HPC con 0% de microsilice.....</i>	<i>61</i>
<i>Fotografía 9. Equipo de ensayo RCPT – Universidad Nacional de Colombia.....</i>	<i>64</i>
<i>Fotografía 10. Cementos argos tipo I de uso normal.....</i>	<i>75</i>
<i>Fotografía 11. Microsilice Eucon MSA 100P</i>	<i>76</i>
<i>Fotografía 12. Aditivo Plastol 6000.....</i>	<i>78</i>
<i>Fotografía 13. Gel para la realización del VPU.</i>	<i>78</i>
<i>Fotografía 14. Productos químicos.</i>	<i>79</i>
<i>Fotografía 15. Fisura a través del agregado en el HPC.....</i>	<i>83</i>
<i>Fotografía 16. Nivel de porosidad superficial, en una muestra curada con el 10% de microsilice.....</i>	<i>102</i>
<i>Fotografía 17. Nivel de porosidad superficial, en una muestra no curado con el 10% de microsilice.....</i>	<i>102</i>

Lista de figuras.

<i>Figura 1. Diferencia de rigidez entre agregados y pasta de cemento en hormigón normal (izq.) y el concreto de alto desempeño (der.). Tomado de (Isabel, 1993), basado en fib-CEB Working Group on HSC, 1990.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2. Diagrama típico para el concreto mostrando los diferentes módulos de elasticidad .Tomado (A.M. Neville, 1998).</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3. Esquema del aparato de velocidad de pulso ultrasónico. Tomado (ASTM-C597, 1997).</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4. Modelo de vida útil de Tuutti para corrosión de armadura pasivas. Tomado (Tuutti, 1982).</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5. Concepto de vida útil de las estructuras de concreto en función del fenómeno de la corrosión del refuerzo. Tomado</i>	<i>40</i>
<i>Figura 6. Mecanismo de difusión en el concreto. Tomado (Claisse, 2005).</i>	<i>41</i>
<i>Figura 7. Esquema de electromigración de iones. Tomado(Claisse, 2005).</i>	<i>43</i>
<i>Figura 8. Representación esquemática del proceso de corrosión electroquímica. Tomado (A.M. Neville, 1998)</i>	<i>46</i>
<i>Figura 9. Esquema de corrosión electroquímica en presencia de cloruros. Tomado (A.M. Neville, 1998).</i>	<i>47</i>
<i>Figura 10. Problema generado por la corrosión al concreto. Tomado (Neville, 2002).</i>	<i>48</i>
<i>Figura 11. Representación de la microestructura de dos tipos de pasta cemento con diferentes relaciones A/C . Tomado (Aitcin, 2003).</i>	<i>49</i>
<i>Figura 12. Matriz de ensayos primera fase.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 13. Esquema de corte de muestras para ensayos del HPC.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 14. Diagrama de flujo de ensayos realizado</i>	<i>54</i>
<i>Figura 15. Profundidad de Penetración del ion cloruro en el concreto.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 16. Esquema de ensayo RCPT.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 17. Esquema ensayo de resistividad eléctrica del concreto.</i>	<i>65</i>

Lista de Ecuaciones.

Ecuación 1. Esfuerzo.....	31
Ecuación 2 Módulo ACI 363 HPC.....	33
Ecuación 3 Módulo España.....	33
Ecuación 4 Módulo NSR – 10	33
Ecuación 5 Módulo Peso unitario NSR – 10	33
Ecuación 6 Velocidad.....	35
Ecuación 7 Velocidad de pulso	35
Ecuación 8 Módulo velocidad de pulso.....	36
Ecuación 9 Relación de Poisson	36
Ecuación 10 Difusión 1ra ley de Fick	42
Ecuación 11 Difusión 2ra ley de Fick	42
Ecuación 12 Resistencia a compresión.....	58
Ecuación 13 Módulo experimental.....	59
Ecuación 14 Corrección parámetro de módulo.....	60
Ecuación 15 Penetración de cloruros.....	63
Ecuación 16 Ley Ohm.....	64
Ecuación 17 Resistividad.....	67
Ecuación 18 Porosidad.....	68
Ecuación 19 Módulo HPC Loyez – Lizarazo.....	88
Ecuación 20 Módulo HPC Loyez – Lizarazo.....	88

Anexos

ANEXO A

1. Cementos	115
2. Microsilice.....	116
3. Ensayos de difracción de rayos X.....	118
4. Hiperplastificante Plastol 6000.....	120
5. Cloruro de sodio Merck.....	122
6. Hidroxido de sodio Merck.	123

ANEXO B

7. Resistencia a compresión, módulos de elasticidad y pesos unitarios Fase I.	127
8. Análisis estadístico de resultados Fase I.....	132
9. Resistencia a compresión Fase II.	135
10. Análisis estadístico – Fase II.	136
11. Resultado de colorimetría del HPC.....	137
12. Resultado de RCPT del HPC.	138
13. Resultados de resistividad del HPC.	139
14. Resultados de porosidad del HPC.....	140

Introducción

El concreto es el material de construcción más utilizado en el mundo. Tal vez por la aparente poca necesidad de mantenimiento de las edificaciones construidas con él, bajo condiciones normales, no se le presta suficiente atención a la durabilidad del material. En los últimos años la palabra durabilidad, ha venido ganando cada vez más importancia por el hecho de que se ha descubierto que entre mayor sea la capacidad del material de resistir los ataques exógenos del medio ambiente, mayor será el tiempo de servicio del mismo. Esto tiene gran importancia en la economía nacional ya que en países desarrollados y en vía de desarrollo se invierten miles de millones de dólares en mantenimiento y rehabilitación de obras de infraestructura.

El aumento de grandes proyectos construcción y la demanda por parte de la ingeniería y de la arquitectura hacia nuevos materiales tales como el Concreto de Alto Desempeño (HPC), ha permitido generar investigaciones de durabilidad de este tipo de concretos en nuestros países en vía de desarrollo. Esto, con el fin de poder introducir estas tecnologías al sector de la construcción, garantizado en las estructuras una adecuada vida útil.

Teniendo en cuenta lo anterior, en esta tesis se investigó la producción de Concretos de Alto Desempeño en Colombia con materiales de origen local (Agregados río Guayuriba, Cemento tipo I, hiperplastificantes, microsilice y arenas del río Tabio). Igualmente, se investigó en detalle la resistencia y durabilidad del HPC ante uno de los fenómenos más complejos que sufre el concreto, la penetración del ion cloruro, el cual disminuye la vida útil de las estructuras debido a la corrosión del acero. La llegada de un frente de cloruros al acero, genera corrosión en el metal, con un posterior descascaramiento del concreto en la zona aledaña. Cuando esta problemática no es atendida pronta y adecuadamente, puede causar problemas de servicio y hasta el colapso de la estructura.

En el desarrollo de esta tesis de maestría tal y como se describió anteriormente, se desarrolló un HPC, el cual se sometió a diferentes ensayos de caracterización mecánica del material (resistencia a compresión y Módulos de elasticidad) y de durabilidad del concreto. Como el objetivo principal de esta tesis fue determinar la influencia de la adición de microsilice sobre el comportamiento del HPC ante los cloruros, las muestras producidas se pusieron en contacto con una solución salina durante 4 meses con el fin de medir la penetrabilidad del ion. Para dicha medición se utilizó una solución de nitrato de plata mediante la metodología de colorimetría propuesta por Mario Collepardi(1995). Este ensayo se apoyo en el Nordtest Method NT-Built 492 Chloride migration coefficient from

non-steady-state migration experiment, para determinar las medidas finales de profundidad de penetración. De igual manera se realizaron ensayos de resistividad eléctrica del concreto para muestras de 6 meses de edad, siguiendo la metodología, mas no las forma de realizar el ensayo, descrita en la norma Española UNE 83988-1, Métodos de ensayo de determinación de resistividad eléctrica. También se realizaron ensayos de permeabilidad rápida de cloruros (RCPT), en probetas de 6 meses de edad, teniendo en cuenta lo descrito por la ASTM-C1202 2005, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Finalmente se realizaron ensayos porosidad abierta en probetas de 8 meses de edad.

Con los datos experimentales obtenidos se realizó una detallada disertación y discusión sobre lapenetración del ion cloruro en el concreto y su relación con los ensayos descritos anteriormente.

Antecedentes

El constante avance en los incrementos en resistencia del concreto en los últimos años, lo ha ubicado como el material de construcción, más utilizado en el sector, el estudio del concreto de alta resistencia comenzó a partir de la década de los 70s con la aparición de los aditivos y adiciones de humo sílice, lo que generó el aumento gradual de su resistencia, hasta alcanzar hoy en día concretos de más de 100 MPa. En el mundo han sido muchas las construcciones con este material enfocándose principalmente en Estados Unidos, Europa occidental y Sureste asiático, siendo los EUA el que comenzó con las primeras construcciones con HPC. Entre algunos ejemplos de edificios construidos con Concreto de Alta Resistencia se pueden mencionar los siguientes:

- *South Wacker Drive*, edificio ubicado en Chicago y construido en 1990, con 65 pisos y una altura de 293m.
- *Nations Bank Corporate Center*, se encuentra en Charlotte, Carolina del Norte, EUA. en 1992, tiene 65 pisos y una altura de 265 m.
- *Bay-Adelaide Center*, Toronto de 1990, con 57 pisos y 275 m de altura.
- *Edificio de la Banca de la Agricultura y la Industria*, situado en Perth (Australia) y construido en el primer lustro de los años noventa, tiene 207 m de altura y 48 pisos.
- *Edificio Trianon*, Frankfurt, el número de plantas de este edificio es de 48 sobre rasante y cuatro sótanos, con una altura de 186 m sobre aquélla y 19.61 m bajo la misma, fue construido entre los finales de los ochenta y principio de los 90s.
- *Pacific Toser*, en La defense, en Paris con 27 pisos
- *Central Plaza*, de 78 pisos y 374 m de altura, se encuentra en Hong Kong.
- *Sky Central Plaza*, ubicado en Guangzhou (China), tiene 80 plantas y 322 m de altura de estructura principal y 352 m el punto más elevado. Su construcción ha finalizado en 1997
- *Jin Mao Toser*, edificio, con 88 plantas y 421 m de altura, se encuentra situado en la ciudad de Shanghai.

- *Petronas Towers*, conjunto de dos torres, de 88 plantas cada una, se encuentra situado en Kuala Lumpur, Malasia. Con 450 m de altura.
- *Taipei 101 Tower*, 101 pisos por encima de la altura del suelo, columnas rellenas con HPC. *Taipei-Taiwán*.

La experiencia en Colombia, es reducida en cuanto a construcciones con este material, sin embargo, en el campo de la investigación, se ha comenzado a realizar proyectos sobre este tópico desde la década de los 80s, teniendo a instituciones como la Universidad Nacional de Colombia, la Pontificia Universidad Javeriana, la Universidad del valle y la Escuela Colombiana de Ingeniería; como las universidades que iniciaron con las investigaciones sobre este material en Colombia, hoy en día la Universidad Nacional de Colombia sigue con este campo de investigación por medio de esta tesis de maestría.

A continuación se citan algunas de las investigaciones realizadas sobre este materia, en nuestro país:

- *Concreto de Alta Resistencia*, Mejia Uribe Álvaro, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, 1984.
- *Desarrollo y determinación de las propiedades mecánicas del Concreto de Alta Resistencia*, Barrera Mora Ernesto, Uribe Márquez Juan José, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, 1991.
- *Bases metodológicas de diseño de Concretos de Alta Resistencia para la ciudad de Cali*, Carvajal Barrera Diego Alberto, Medina Uribe Carlos Felipe, Mora Valencia Diego Fernando, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad del Valle, 1994.
- *Aplicación del concreto de alta resistencia en edificios*, Guzmán Mejia Leonardo, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, 1994.
- *Investigación, diseño, obtención y ensayos de concretos de alta resistencia*, Quimbay Rodrigo Nel, Ruiz López Gilberto, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, 1995.
- *Módulo de elasticidad en hormigones de alta resistencia*, López Buitrago Cielo Piedad, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniera Civil, Universidad Nacional de Colombia, 1995.
- *Procedimientos para la dosificación de concretos de alta resistencia*, Correa Estupiñán Ricardo, Quintana Lemus Nelson, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, 1996.

- Estudio de la sinergia de mezclas binarias y ternarias de puzolanas en Concretos de Alta Resistencia, Pérez Chaparro Jorge Alberto, Pinto Ospina Julián Antonio, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniero Químico, Universidad del Valle, 1996.
- Incidencia de los agregados en la obtención de Concretos de Alta Resistencia, Salas Montoya Andrés, Pavi Jiménez Jesús Antonio, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad del Valle, 1996.
- Comportamiento de las mezclas de Concreto de Alta Resistencia empleando metakaolin como adición cementante, Carrillo García Jhon, Tolosa Villa Jose Antonio, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, 1997.
- Investigación y diseño de concreto de ultra-alta resistencia, reforzado con fibras de acero, Carvajal Celeita José, Tejedor Bayona José, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, 1998.
- Investigación y diseño de Concretos de Alta Resistencia, German Andrés Naranjo Faccini, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de los Andes, 2000.
- Efectos del Sulfato de Magnesio Sobre la Durabilidad en Concretos de Alto Desempeño, Jerez Barbosa Sandra Rocío, Tesis de Maestría en estructuras, Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- Concreto de altas prestaciones adicionado con Metakaolin, Silvia Judith, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad del Valle, 2004
- Concretos de Alta Resistencia I, Camacho Obregón Guillermo, Rodríguez Renteria Eduardo, Trabajo de grado realizado para optar al título de Especialista en Estructuras, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2005.
- Concreto de polvos reactivos con materiales colombianos, Orlando Garzón, Gina Lamilla Duran, Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniera Civil, Universidad Nacional de Colombia, 2005.
- Concretos de Alta Resistencia II, Ortega Jairo Fidel, Torres González Oscar, Trabajo de grado realizado para optar al título de Especialista en Estructuras, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2006.

En cuanto a la durabilidad, hoy en día, en las estructuras de concreto es uno de los temas más importantes en el estudio de la tecnología del hormigón, tópico que se considera nuevo en el sector de la construcción colombiana, pero que desde hace ya varios años se trabaja intensamente a nivel internacional. Desde los años 40s, según Mehta y Burrows (2001), P. Jackson ya hablaba

sobre la pérdida de durabilidad en los concretos de 200 puentes inspeccionados en California, Oregon, Washington y Wyoming en los Estados Unidos de América. De igual manera en los años 50s, en este mismo país se continuó discutiendo sobre la durabilidad en el concreto en el Estado de Colorado de acuerdo con la afirmaciones realizadas por L.H. Tuthill (ScienceNewsLetter, 1952), de la oficina de reclamación en Denver, *“el concreto que se usará en las estructuras situadas en agua, deben ser supervisados contra la variación del volumen y la filtración de agua, el control de estas dos cosas significará una mayor durabilidad del concreto”*.

En 1952 el Byram W. (ScienceNewsLetter, 1952) dijo lo siguiente: *“.....Sin embargo, los concretos a menudo no son los suficientemente buenos cuando se utilizan en estructuras situadas en el agua. Dentro de pocos años, muchas estructuras mostrarán graves signos de deterioro ya que el agua ha encontrado el camino para entrar a través del hormigón en muchos lugares.”*

Los problemas de durabilidad en el hormigón se han presentado desde que el concreto fue creado y difundido en todo el mundo; quizás porque durante los orígenes de este material no se tenían en cuenta aspectos tales como deficiente gradación de los agregados, relaciones agua/ cemento altas, y uso de materiales con alto contenido de sílice reactiva. Igualmente, cabe anotar que el medio ambiente y sus posibles agentes agresivos tampoco eran tenidos en cuenta al proyectar obras de concreto, lo que redundaba en la disminución de la vida útil de las edificaciones .

El estudio de la durabilidad en Colombia es reciente en comparación con las investigaciones realizadas en el resto del mundo acerca del tema; entre las primeras investigaciones que comenzaron en nuestro país en la década de los noventas sobresalen los trabajos dirigidos por José Gabriel Gómez en la Universidad Nacional de Colombia. En esta universidad se estudiaron diferentes fenómenos y problemas de durabilidad en el hormigón tales como la permeabilidad, ataque de sulfatos y corrosión del acero de refuerzo; años después, en la década del dos mil, los estudios alrededor del tema aumentaron considerablemente con investigaciones como la de Arango(2003), quien estudió, la durabilidad del concreto por medio de la permeabilidad en el concreto, Torres (2005) quien estudió el paso de los cloruros en concretos de diferentes características, Jované (2009) quien estudió la durabilidad del concreto por medio de la permeabilidad (ISAT y sortividad), y la ingeniera Patricia Valderrama (2009), quien estudió la permeabilidad y la penetración de cloruros en concretos con diferentes tipos de adiciones.

Todas las tesis anteriores abrieron el camino en el estudio de la durabilidad del concreto convencional generado con materiales producidos en Colombia; en cuanto al Concreto de Alto Desempeño (HPC), la durabilidad no ha sido muy estudiada en nuestro país y entre las pocas investigaciones acerca del tema se puede citar la tesis de Jerez (2002), en donde se investigaron los efectos del sulfato de magnesio sobre la durabilidad. Con los anteriores antecedentes, se planteó realizar la presente investigación, tratando de visualizar cual es el comportamiento del Concreto de Alto Desempeño ante la penetración de los iones cloruros. El HPC se proyectó con materiales de fácil consecución en nuestro país.

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar la influencia del porcentaje de adición de microsilice y del tipo de curado (Inmersión y al Aire) en la penetración de ion cloruro en el Concreto de Alto Desempeño

Objetivos Específicos

- Establecer la dosificación óptima para obtener un Concreto de Alto Desempeño fabricado con agregados gruesos de la zona de influencia de Bogotá -Colombia.
- Determinar la penetración del Ion Cloruro en Concretos de Alto Desempeño con diferentes porcentajes de adición (0%, 5%, 10% y 15%) de microsilice, mediante ensayos de difusión normal y ensayos acelerados eléctricos de migración y resistividad.
- Evaluar la influencia del curado en la penetración del ion cloruro en el Concreto de Alto Desempeño, respecto a los diferentes ensayos propuestos (Colorimetría, RCPT, Resistividad y Porosidad).

CAPITULO I

1 Marco conceptual

En este capítulo se describen los conceptos básicos que permitan al lector de esta tesis de maestría, hacerse una idea sobre el concreto de alto desempeño, la durabilidad del concreto y las principales técnicas experimentales para medirla.

1.1 Historia del Concreto.

La historia señala que en el antiguo Egipto se desarrolló el primer aglutinante conocido, el cual se usó con el fin de darle una textura lisa a las pirámides, este fue el yeso. Después, en la antigua Grecia y Roma se comenzó a usar la piedra caliza para construir los grandes monumentos de la historia de la humanidad, tales como el Partenón, el coliseo romano y sus acueductos, éstos, monumentos altamente durables se conservan hasta hoy en día. Entre los siglos 100 y 300 antes de Cristo -los Romanos descubrieron como crear morteros puzolánicos, para estos se utilizaron arenas volantes volcánicas *pulvis puteolanu*, procedentes del Monte Vesubio y consistentes en una mezcla de cal y tierra volcánica que generaba mejores resultados cementantes que la cal normal(J.P. Oleson, 2004).

En 1756 se comenzó a hablar de un concreto muy parecido al de los tiempos modernos. Durante la construcción del faro de Edsytone en el Reino Unido el ingeniero John Smeaton observó que el mortero con cal ordinaria no funcionaba bien bajo el agua de mar y que su resistencia no era la suficiente. Al realizar un minucioso estudio se dio cuenta que al producir morteros con calizas de mayor porcentaje de arcilla, se generaba un mortero mejor, capaz de resistir los problemas que se presentaban en la construcción del faro. Con este descubrimiento se dio un gran avance en el camino hacia los concretos de los tiempos modernos, tomado de revista ICPC el cual lo referencia

de (CivilEngineering, 1977). Después de Smeaton , el ingeniero francés J.L. Vicat descubrió que no podía existir mortero hidráulico, sin sílice y que toda cal contiene algo de arcilla compuesta por sílice y alúmina. En 1824 Joseph Aspin, registró una patente de un nuevo cemento al cual llamo Cemento Pórtland(CivilEngineering, 1977). A partir de momento se comenzó a producir concreto tal cual lo conocemos en nuestros días; sin embargo, grandes avances desde el tiempo de J. Aspin se han dado en la tecnología del cemento y el concreto. La aparición de aditivos químicos y adiciones minerales como nuevos materiales permiten fabricar concretos especiales muy durables y muy resistentes.

Entre estos concretos especiales se puede nombrar el Concreto de Alto Desempeño, los concretos de polvos reactivos, los concretos compactados con rodillos, los concretos autocompactantes y los concretos con fibras.

1.2 Concreto de Alto Desempeño.

Con el desarrollo de nuevos aditivos químicos para el concreto, se generó la posibilidad de trabajar con nuevos materiales como el concreto de alto desempeño, material que se ha venido usando desde la década de los setentas en lugares como Estados Unidos, Europa y Asia y que logró su gran impulso con la aparición de los plastificantes, superfluidificantes e hiperplastificantes. Estos aditivos permitieron la reducción en la relación Agua – Cementante (A/Cm) de las mezclas, pudiéndose así generar concretos con altas manejabilidades y al mismo tiempo relaciones A/Cte muy bajas, lo que redundó en concretos con resistencias a la compresión bastantes altas en comparación con los concretos convencionales ($f'c \leq 41$ MPa) de uso típico en el sector de la construcción.

Teniendo en cuenta que el comité ACI 363(1992) establece que la clasificación de alta resistencia esta directamente asociada a la base geográfica, a los materiales con los que se constituye el hormigón y a al desarrollo tecnológico de la industria local, es decir que “en regiones en donde los concretos con resistencia a compresión de 62 MPa estén siendo producidos comercialmente, se les puede llamar concretos de alta resistencia a los hormigones que estén en el rango entre 83 y 103 MPa; sin embargo, en regiones en donde el límite superior del material comercialmente disponible es 34 MPa, se puede considerar concreto de alta resistencia al hormigón que este en 62 MPa”.

De acuerdo con lo anotado atrás y teniendo en cuenta los materiales que se pueden encontrar en nuestro país y que la resistencia a compresión comercialmente disponible en las industria es como máximo de 28 MPa, el autor de la presente investigación define la siguiente clasificación para nuestro país: (a) a los concretos con resistencia a compresión menor o igual a 42 MPa se les llamará Concretos convencionales, (b) a los concretos que estén entre 42 MPa y 100 MPa se les llamará Concretos de Alta Resistencia y (c) a los concretos más de 100 MPa se le denominará concretos de ultra alta resistencia. Esta clasificación, excluye los concretos producidos con materiales o técnicas

de concreto no convencionales (concretos impregnados con polímeros, concretos epóxicos o concretos con agregados artificiales normales o pesados) tomando lo descrito por el ACI 363(1992).

En la actualidad el término concreto de alta resistencia ha cambiado por concreto de alto desempeño, esto con el fin de definir la durabilidad con un factor importante a tenerse en cuenta en la consecución del material; es decir en los concretos de alto desempeño (HPC) la alta durabilidad es también un requisito indispensable.

El término concreto de alto desempeño (HPC), fue usado por primera vez por Mehta y Aïtcin para las mezclas de concreto con las siguientes características: alta trabajabilidad, altas resistencias iniciales y finales, y sobre todo, alta durabilidad.

1.2.1 Materiales del concreto de alto Desempeño.

Los materiales usados para generar Concreto de Alto Desempeño, son iguales a los utilizados en el concreto normal, pero deben tener mayor control en su selección con respecto a los materiales utilizados en los concretos convencionales.

1.2.1.1 Cemento.

Este es un material muy importante en la fabricación del Concreto de Alto Desempeño, ya que del tipo, composición y finura de este, dependerá su interacción con el súper plastificante a ser utilizado para darle la fluidez y compacidad a la mezcla de concreto. Se recomienda cementos Portland tipo I, con pocas adiciones, *“ya que si se utiliza humo de sílice como adición, el cemento debe incorporar el mayor contenido de clinker posible, para que el humo sílice reaccione”* (Bernat, 2004). También se puede decir que si se utiliza cemento Portland, *“estos presentan en general una mayor velocidad de reacción que los que incorporan adición, por lo que el hormigón se impermeabiliza rápidamente con un curado no muy prolongado, lo cual garantiza sus resistencias sin confiar en curados prolongados en el tiempo”*. Los cementos utilizados en la realización del HPC deben garantizar altas resistencias a los 28 días; el contenido de cemento utilizado en las dosificaciones, no debe exceder los 500 kg/m³, ya que esto suele conducir a mezclas viscosas de poca trabajabilidad, y a un alto calor de hidratación provocado por el alto contenido de cemento, lo que puede generar problemas de durabilidad, si no se tiene cuidado al respecto.

1.2.1.2 Agregados.

El comité ACI 363, comienza, su definición sobre los agregados finos y gruesos para concreto de alto desempeño, sugiriendo que estos deberían seguir los requisitos de la ASTM C33. Sin embargo algunas excepciones a estos requerimientos, también pueden ser benéficas.

En el agregado fino el factor más importante a tener en cuenta es su granulometría y forma, ya que ambos son esenciales para el efecto de reducción en el requerimiento del agua de amasado. Esto debido a que agregados finos bien gradados con partículas redondeadas y textura suave, requieren menor cantidad de agua en el momento de mezclado; de igual forma, el módulo de finura se recomienda que sea mayor o igual a 3.0, pues esto mejora la trabajabilidad.

Hay que tener mucho cuidado en no sobrepasar la cantidad de material que pasa el tamiz #200, ya que se puede generar una pérdida de resistencia, debido a la pérdida de adherencia entre la pasta y el agregado grueso

En los concretos de alta resistencia las cantidades de los materiales cementantes es bastante alta, lo que hace que el agregado fino, tenga poca importancia en la consecución de altas resistencias, caso contrario al concreto normal, material en el cual el agregado fino se constituye en componente importante, para la matriz del concreto, por los contenidos moderados de material cementante.

En cuanto al agregado grueso, la Portland Cement Association expresa que para concretos de más de 34 MPa la resistencia depende esencialmente de la calidad de la pasta de cemento endurecida y de la calidad del agregado.

El ACI 363R recomienda que para resistencias a compresión óptimas, con altos contenidos de cementos y bajas relaciones A/C, el tamaño máximo de los agregados grueso debería ser mantenido en un mínimo de 1/2 a 3/8 de pulgada, no es recomendable emplear agregados de 3/4 y 1 pulgada.

López (2002), expresa en su libro que en los concretos de alta resistencia *“se debe considerar que los agregados de tamaño menor contribuyen a producir concretos de más alta resistencia debido a una menor concentración de esfuerzo alrededor de las partículas, originados por una diferencia entre los módulos de elasticidad de la pasta y el agregado”*.

La forma y textura se recomienda que sea angular y rugosa, resistente y con una absorción muy baja de no más del 1%.

1.2.1.3 Adiciones minerales (Microsilice).

La adición más utilizada en la fabricación del concreto de alta resistencia es el humo de sílice o microsilice, la cual es obtenida en hornos de arco eléctrico en la industria del ferrosilicio, en donde se recogen los vapores de los óxidos de silicio después de condensarse los vapores a baja temperatura, dando lugar a sílice amorfa de área superficial muy elevada (20-25 m²/g).

1.2.1.4 Aditivos (Superplastificantes).

Son de uso obligatorio en este tipo de concretos, ya que por su baja relación A/Cte, se hace casi imposible obtener una adecuada manejabilidad y fluidez del concreto, si no se le adiciona a la mezcla un súper-plastificante. Gómez (2001) en su libro, muestra como el uso de superplastificante en el HPC es indispensable pues su adición aumenta las resistencias del hormigón, especialmente a edades tempranas. Esto se debe tanto a la reducción del agua como a una mejor dispersión de las partículas de cemento que se traduce en una mejor hidratación.

1.2.1.5 Agua.

Los requerimientos del agua usada para en el Concreto de Alto Desempeño son los mismos que para el concreto convencional.

1.2.2 Propiedades del Concreto de Alto Desempeño.

Tal y como su nombre los describe, las propiedades a del HPC deben reflejar su alto desempeño en condiciones de uso. Entre las propiedades más importantes de este tipo de hormigón se puede mencionar la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, la relación de Poisson, la resistencia a la tracción y el flujo plástico; características de suma importancia en el momento del análisis y diseño de cualquier estructura. De igual manera, el HPC debe demostrar altas características de desempeño en durabilidad durante su vida útil de servicio.

Es práctica común estimar la gran mayoría de las propiedades del HPC y de cualquier tipo de concreto mediante correlación con la resistencia a la compresión. Esta propiedad se mide mediante el ensayo de probetas cilíndricas en compresión uniaxial.

1.2.2.1 Resistencia a compresión del HPC.

La resistencia a compresión junto con la durabilidad son quizás las propiedades más importantes en todo concreto, ya que de acuerdo con estas características inherentes del material se puede catalogar su calidad dentro de su periodo de servicio. Según el ACI comité 363 – 1992. En el HPC la resistencia a compresión se limitará teniendo en cuenta la posición geográfica del sitio en donde se genere el concreto como se dijo anteriormente, en Colombia se puede decir, según el autor, que el HPC puede estar en entre 42 y 100 MPa a los 28 días, para concretos normales tal resistencia deberá ser menor de 42 MPa. La anterior clasificación radica principalmente en que aunque los dos hormigones están compuestos por materiales frágiles (cemento y agregados) la diferencia de rigidez entre ellos disminuye al aumentar la resistencia de concreto, tal y como se puede observar en la Figura 1, Para un concreto convencional la diferencia de rigideces entre el agregado y la pasta de

cemento genera en el momento de la carga se produzcan deformaciones relativas en la superficie de contacto generando la pérdida de adherencia en la interfaz y microfisuración la cual se propaga con el aumento de la carga produciendo desviaciones no lineales en el diagrama esfuerzo – deformación del hormigón convencional (Bernat, 2004).

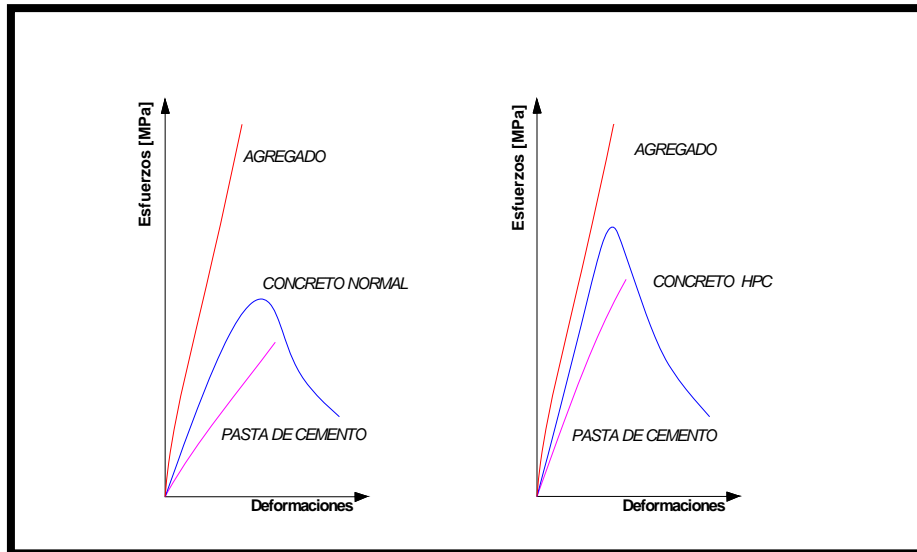


Figura 1. Diferencia de rigidez entre agregados y pasta de cemento en hormigón normal (izq.) y el concreto de alto desempeño (der.). Tomado de (Isabel, 1993), basado en fib-CEB Working Group on HSC, 1990.

El comportamiento de los materiales constituyentes del HPC se puede observar en la Figura 1. Allí se observa que existe una menor diferencia en las rigideces entre la pasta de cemento y de los agregados. Esto se traduce en una mejor y más uniforme distribución interna de los esfuerzos en el material produciendo así mayores resistencias a compresión. Es necesario tener en cuenta que el menor desarrollo del estado de fisuración interno de los HPC reduce la posibilidad de una redistribución de los esfuerzos en el material ante un aumento posterior de carga, lo que conduce finalmente a la ruptura frágil y explosiva del concreto (Isabel, 1993). La falla en el hormigón de alto desempeño se da atravesando los agregados en lugar de rodearlos tal y como sucede en el concreto convencional, por lo que se genera así la disminución notable de su capacidad de transmisión de los esfuerzos cortantes, aumentando así la pendiente de la rama post-pico y disminuyendo la deformación última (Bernat, 2004). Dicha falla explosiva se puede observar en la Fotografía 1.



Fotografía 1. Falla explosiva y súbita del concreto de alto desempeño.

1.2.2.2 Módulo de elasticidad del HPC

Como bien es sabido el módulo de elasticidad sigue los principios de la ley de Hooke expuesta en 1676, la cual expresa que para ciertos materiales de ingeniería existe una proporcionalidad en la parte elástica de la curva esfuerzo deformación entre los esfuerzos y la deformaciones unitarias. Lo anterior se puede plantear de la siguiente forma:

$$\sigma = \varepsilon E \quad (1)$$

De donde:

σ = Esfuerzo, [MPa]

E = Módulo de elasticidad, [MPa]

ε = Deformación Unitaria, [mm/mm]

Entonces, se podría decir que el módulo es la constante de proporcionalidad y que representa la pendiente de la recta en la curva esfuerzo deformación, esto si hablamos de materiales que presenten propiedades elásticas en la curva $\sigma - \varepsilon$. En materiales no lineales como el concreto, la relación esfuerzo y deformación se representa en la Figura 2.

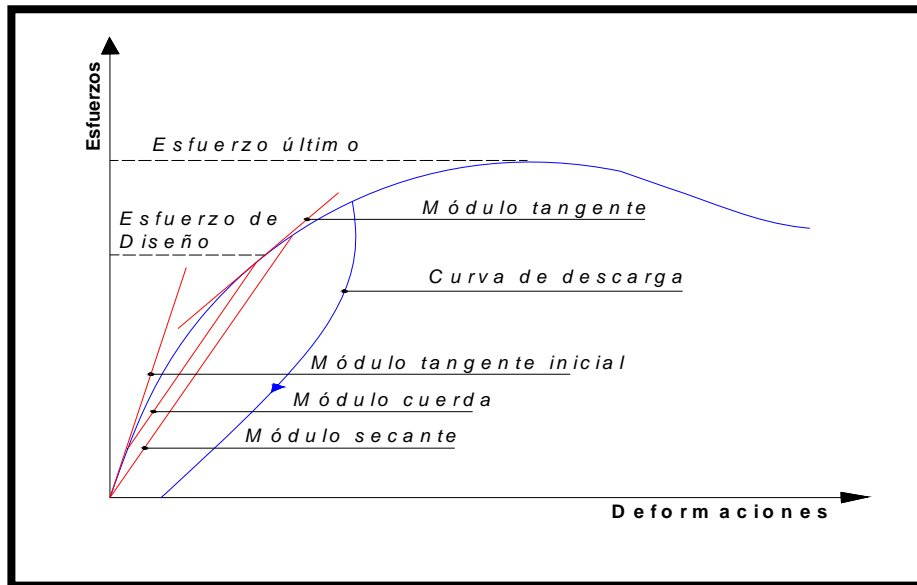


Figura 2. Diagrama típico σ - ϵ para el concreto mostrando los diferentes módulos de elasticidad. Tomado (A.M. Neville, 1998).

Como se puede observar en la Figura 2, hay diversas formas de definir el módulo de elasticidad del concreto. El módulo de cuerda, es el más utilizado para poder calcular E experimentalmente, el cual se define como la pendiente entre un porcentaje de la deformación y la pendiente secante de la curva esfuerzo-deformación. En los concretos de alto desempeño este módulo secante tiende a coincidir con el módulo tangente inicial por la mayor pendiente en la curva en los HPC; igualmente ha sido también observado que la parte lineal de las curvas esfuerzo deformación en el concreto de alta resistencia se extiende a esfuerzos que pueden ser del 85 % de la carga última o a niveles más altos (Neville, 1997).

Una característica importante en el HPC es que se pueden obtener módulos de elasticidad bastante altos en comparación con los concretos convencionales; sin embargo, hay que tener en cuenta que existe un aumento notorio del módulo del concreto convencional con la resistencia, mientras que en el HPC este aumento no es tan notorio. Algunos investigadores han reportado valores de módulo de elasticidad entre 41 y 45 GPa en HPC, (Rivva-López, 2002).

Por medio de la correlación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión el comité ACI 363 estableció la siguiente expresión para calcular el módulo de elasticidad para concretos que están entre 21 y 83 MPa.

$$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900 \quad (2)$$

En las normas españolas se establece la siguiente formulación para concretos superiores a 50 MPa.

$$E_c = 2.0 E_4 \left(\frac{f'_c}{10} \right)^{0.3} \quad (3)$$

En Colombia, el cálculo del módulo de elasticidad para cualquier resistencia a compresión del concreto, se determina con la siguiente ecuación 4, (AIS, 2010). Esta fórmula es aplicable para cualquier tipo de concreto sin importar si se tiene concretos convencionales ($f'_c < 42$ MPa) o concreto con altas resistencias ($f'_c \geq 42$ MPa).

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (4)$$

Siendo en todos los casos anteriores E_c , el Módulo de elasticidad del concreto y f'_c , la resistencia a compresión del concreto.

Si se tiene el peso del concreto se puede obtener el módulo de elasticidad, para concretos con densidad del concreto de peso normal, que estén entre 1440 y 2560 kg/m^3 con la expresión que se puede observar a continuación.(AIS, 2010)

$$E_c = 0.043W_c^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad (5)$$

Siendo:

E_c = Módulo de elasticidad del concreto [MPa].

f'_c = Resistencia a compresión del concreto [MPa].

W_c = Densidad (peso unitario) del concreto de peso normal [kg/m^3].

Cabe anotar que la normativa colombiana, sigue las indicaciones del American Concrete Institute 318-08, en la forma del cálculo teórico en el cálculo del módulo de elasticidad.

1.2.2.3 Velocidad de Pulso Ultrasónico.

Para estudiar este tipo de ensayo no destructivo para el concreto, primero se discutirá lo que es una onda sónica. Teóricamente hay tres tipos de ondas mecánicas que abarcan diferentes intervalos de frecuencia: 1) las ondas sonoras, son las que están dentro de la sensibilidad del oído humano, por lo general están entre 20 Hz y 20000Hz. 2) las ondas infra-sónicas, cuya frecuencia están por debajo del intervalo audible. 3) las ondas ultrasónicas son aquellas que cuya frecuencia esta por arriba del intervalo audible y se extienden hasta 5.0×10^8 Hz. (Serway, 1997), una de las características más notables de las ondas ultra-sónicas, es su imposibilidad de bordear obstáculos cuando son emitidas; caso contrario a lo que sucede en las ondas sonoras. En las ondas ultra-sónicas por su reducida longitud, estas no bordean los obstáculos, lo que trae como consecuencia su alta capacidad de penetración.

Para generar una onda ultrasónica se utiliza un transductor, el cual contiene un disco de un material cristalino (cuarzo) con propiedades piezoeléctricas. Cuando se le aplica una corriente eléctrica a los materiales piezoeléctricos estos vibran generando ondas de alta frecuencia. El electrodo encargado de emitir la onda se conoce como emisor y el electrodo que detecta la llegada de la misma se conoce como receptor. Para que el ensayo quede adecuadamente realizado, los transductores deben estar adheridos al material con un medio viscoso que les permita disminuir la pérdida de energía cuando el sonido atraviese por el transductor hacia o desde el material a ensayar.

Por medio de esta teoría de vibraciones se puede estimar el módulo de elasticidad del concreto, siguiendo el método de la velocidad de pulso ultrasónico mediante la ASTM C596 (1997). Esta consiste en suministrar una onda que se propaga a través de la masa de concreto, por medio de un generador de pulsos, un par de transductores (transmisor y receptor) y un amplificador como se puede observar en la siguiente Figura 3.

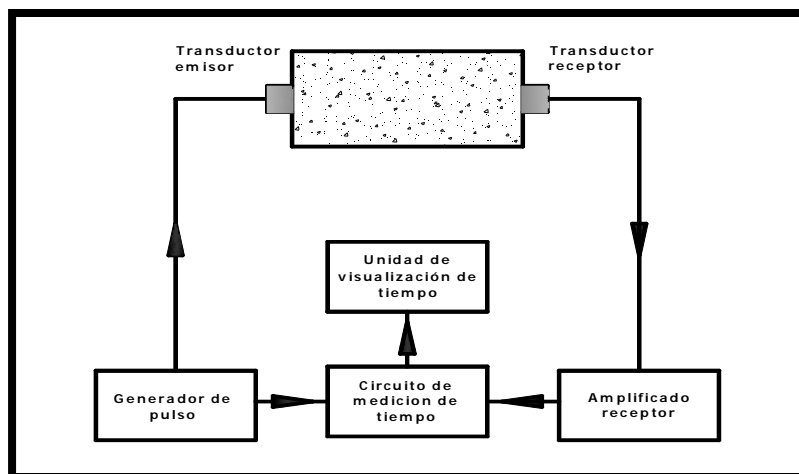


Figura 3. Esquema del aparato de velocidad de pulso ultrasónico. Tomado (ASTM-C597, 1997).

El método de velocidad de pulso ultrasónico proporciona información sobre las propiedades elásticas del medio analizado, este, se realiza de la siguiente manera: Los pulsos de ondas compresionales son generados por un transductor electro acústico el cual es sujetado a la superficie de concreto, después de atravesar completamente el concreto los pulsos son recibidos y convertidos en energía eléctrica por un segundo transductor localizado a una distancia del transductor transmisor.

El cálculo de la velocidad de pulso ultrasónico se realiza con las fórmula siguientes, definidas por el ASTM 597(1997):

$$V = \frac{L}{T} \quad (6)$$

De donde:

V= Velocidad Pulso Ultrasónico (m/s)

L= Distancia entre Transductores (m)

T= Tiempo de transmisión medido electrónicamente (s).

$$V = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (7)$$

De donde:

E= Módulo de elasticidad dinámico

μ = Relación de Poisson dinámico

ρ = Densidad

Al despejar de la ecuación (7) el E, se tiene la siguiente expresión, para ser usada en el cálculo del módulo dinámico de elasticidad.

$$E = \rho V^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (8)$$

1.2.2.4 Relación de Poisson.

Esta propiedad intrínseca del concreto describe la relación entre la deformación axial y transversal de un sólido elástico, al cual se le aplica una fuerza uniaxial. La deformación transversal se puede presentar como expansión o contracción dependiendo del sentido de aplicación de la fuerza. Dichos cambios de longitud transversal y longitudinal producto de la fuerza aplicada, presenta una relación siempre constante cuando el material permanece elástico, y es además homogéneo e isotrópico. La relación de Poisson (ν) se define como:

$$\mu = - \frac{\epsilon_{\text{Transversal}}}{\epsilon_{\text{Longitudinal}}} \quad (9)$$

De donde:

$\epsilon_{\text{Transversal}}$ = Deformación Transversal, [mm/mm]

$\epsilon_{\text{Longitudinal}}$ = Deformación Longitudinal, [mm/mm]

μ = Relación de Poisson

La bibliografía acerca del concreto de alto desempeño indica que la relación de Poisson (μ), es ligeramente menor que la del concreto normal (Persson, 1999), se ha encontrado valores para relaciones de Poisson, medidos dinámicamente entre 0.23 y 0.32 en concreto para rangos de resistencia a compresión de 17 a 79 MPa (ACICommittee363, 1992). Otros investigadores como (Iravani, 1996), basado en resultados anteriores a él describe que se puede considerar un μ promedio de 0.20 con una desviación estándar de 0.033 para concretos entre 55 y 125 MPa.

1.3 Durabilidad del Concreto.

El concreto por su composición es uno de los materiales más durables en la construcción ante el menor falta de mantenimiento, contrario a materiales como el acero y la madera los cuales necesitan un cuidado periódico para que no sufran un deterioro acelerado después de su puesta en funcionamiento. Sin embargo afirmar que el concreto es un material durable es solamente posible si se ha tenido un adecuado control de calidad en el momento de su producción; es decir, el concreto será durable si no se indujeron factores que afecten la vida útil del material (procedimientos constructivos deficientes, relaciones A/Cte altas, inclusión de agregados reactivos, uso inadecuado de las edificaciones).

El American Concrete Institute 201 (2001) "Guide to durable concrete" define la durabilidad de la siguiente manera: *"La durabilidad del concreto está definida como la habilidad del material para resistir la acción de la intemperie, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. El concreto durable debe mantener su forma, calidad y condiciones de servicio originales cuando es expuesto a medio ambiente"*,

Las Normas Técnicas Colombianas (NTC), definen la durabilidad de la siguiente forma *" La durabilidad de una estructura de concreto es la capacidad de comportarse satisfactoriamente frente a las acciones físicas, químicas o físico químicas agresivas y proteger adecuadamente la armaduras y demás elementos metálicos embebidos en el concreto durante su vida útil"*

1.3.1 Vida Útil.

Este concepto siempre debe ir de la mano de la idea de durabilidad en las estructuras de concreto, a partir de esto la vida útil se puede subdividir según NTC5551 (2007) en 4 conceptos básicos, los cuales se mencionan a continuación:

1.3.1.1 Vida útil de proyecto.

Periodo de vida de diseño prevista por el diseñador o el especificador, para el cual ni el tipo de agresión, ni la profundidad alcanzada por el agresor, ni la cuantía de ese agresor en el concreto son suficientes para dar inicio al deterioro del concreto reforzado. La vida útil de proyecto coincide con la fase de iniciación del ataque del medio agresor contra la estructura; durante esta fase alguna barrera protectora es vencida por el agresor, no obstante, no ha debilitado aún la estructura ni los materiales que la componen.

1.3.1.2 Vida útil de servicio.

Periodo que inicia desde la ejecución de la estructura hasta que se completa un nivel evidente de deterioro. La vida útil de servicio coincide con la fase de propagación del daño. En esta etapa se

empiezan a evidenciar síntomas de deterioro tales como fisuras, desprendimientos del recubrimiento, manchas de óxido, exposición del agregado, entre otros. Desde el punto de vista de funcionalidad y aspecto estético, para algunas estructuras, el simple hecho de presencia de humedades, descascaramientos del recubrimiento, olores y presencia de hongos, será suficiente para considerar que se agotó el nivel aceptable de deterioro.

1.3.1.3 Vida útil total.

Período de tiempo que va desde la ejecución de la estructura hasta su colapso parcial o total.

1.3.2 Mecanismos de deterioro en el concreto

El concreto reforzado, durante su vida útil puede estar sometido a diversos agentes y factores que causa su deterioro, entre dichos mecanismos de ataque al hormigón podemos mencionar los siguientes:

1.3.2.1 Factores físico-mecánicos.

Estos son inherentes a la calidad de los diferentes procesos constructivos, ya que si se siguió un adecuado proceso de diseño, de producción del concreto y de mantenimiento, se producirá un buen comportamiento a lo largo de su vida útil de servicio, en caso contrario el hormigón tendrá una disminución en su durabilidad. Otro factor importante que genera concretos poco durables es el sometimiento de las estructuras de hormigón a sollicitaciones excesivas y, que no fueron tenidas en cuenta durante los cálculos y diseños previos, provocando posibles fisuras y deformaciones que pueden causar una disminución en la vida útil de la edificación.

1.3.2.2 Ataques químicos y biológicos.

El concreto puede sufrir ataques por ácidos al cemento en estado plástico y endurecido lo que puede producir deterioro acelerado del material; de igual forma, el hormigón puede ser susceptible a reacciones químicas por carbonatación y cloruros provocando problemas posteriores de corrosión. Los sulfatos también se pueden denominar como agentes nocivos para el concreto ya que generan expansión en el material. Todos los anteriores efectos nocivos son de naturaleza exógena, es decir son producidos desde afuera hacia el interior del hormigón. De la misma forma, existen ataques químicos endógenos que tienen un efecto altamente nocivo para las estructuras, es decir, se producen desde el interior de la matriz del material. Una de estas es la reacción álcali-silice, la cual provoca una expansión interna del hormigón causando la desintegración del mismo. Finalmente el

concreto también está propenso a ataques biológicos por interacción directa con aguas residuales o ambientes que contengan microorganismos como bacterias u hongos.

1.3.3 Modelos de vida útil.

Las estructuras de concreto reforzado poseen una vida útil que comprende un periodo que va desde el momento de la concepción, hasta el colapso de la misma por causa del deterioro, lo que por consiguiente permite el uso de la edificación. K. Tuutti (1982) propuso un modelo de deterioro para las estructuras de concreto reforzado, en el cual se describe cómo se genera el daño del concreto ante los frentes de carbonatación y cloruros.

El diagrama de Tuutti mostrado en la Figura 4, muestra que en la vida útil de servicio existen dos periodos en el deterioro, el primer período en donde se inicia el proceso, el cual determina el tiempo que tardan los cloruros o la carbonatación en llegar al acero para disminuir la capa de pasivación y el período de propagación, que es el tiempo en donde se genera la corrosión del acero de refuerzo y donde se pierde la seguridad de la funcionalidad estructural del elemento.

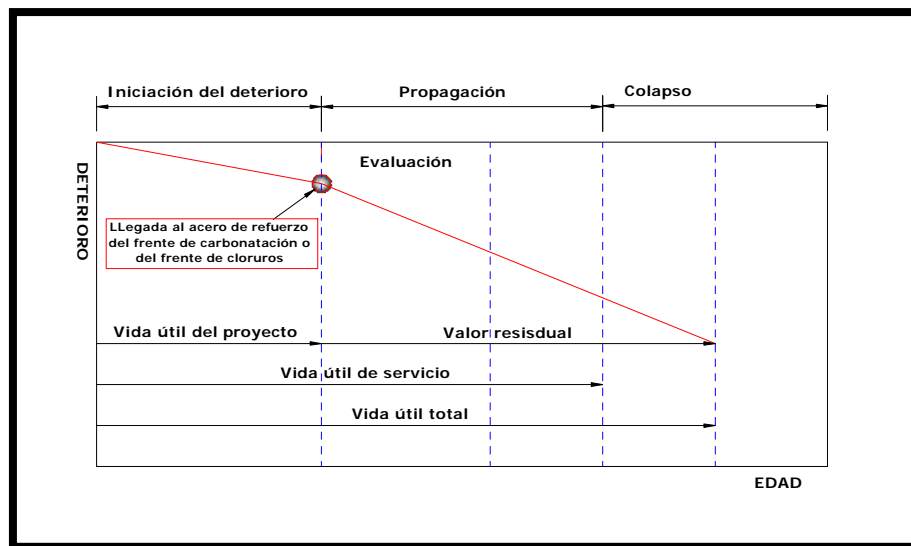


Figura 4. Modelo de vida útil de Tuutti para corrosión de armadura pasivas. Tomado (Tuutti, 1982).

De igual forma Paulo Helene (2003) señala que en el deterioro del concreto reforzado por corrosión del acero de refuerzo se pueden generar tres situaciones las cuales consisten en un periodo inicial, el cual se da desde la puesta en funcionamiento de la estructura hasta la despasivación del acero de refuerzo, llamada normalmente período de iniciación; a este período de tiempo se puede asociar la llamada vida útil de proyecto y en donde el frente de carbonatación o el frente de cloruros alcanzan la armadura.

Un segundo período en el cual aparecen las primeras secuelas (manchas fisuras) del ataque por carbonatación o por penetración de cloruros, este periodo termina con un deterioro avanzado (descaramiento del recubrimiento, deflexiones en elementos estructurales) de la estructura. En este periodo existe inseguridad para los ocupantes de la estructura.

Y el tercer período en el cual se evidencia el colapso inminente de la estructura. A este período de tiempo se asocia la llamada vida útil última o total.

Lo anteriormente descrito se puede observar en la Figura 5.

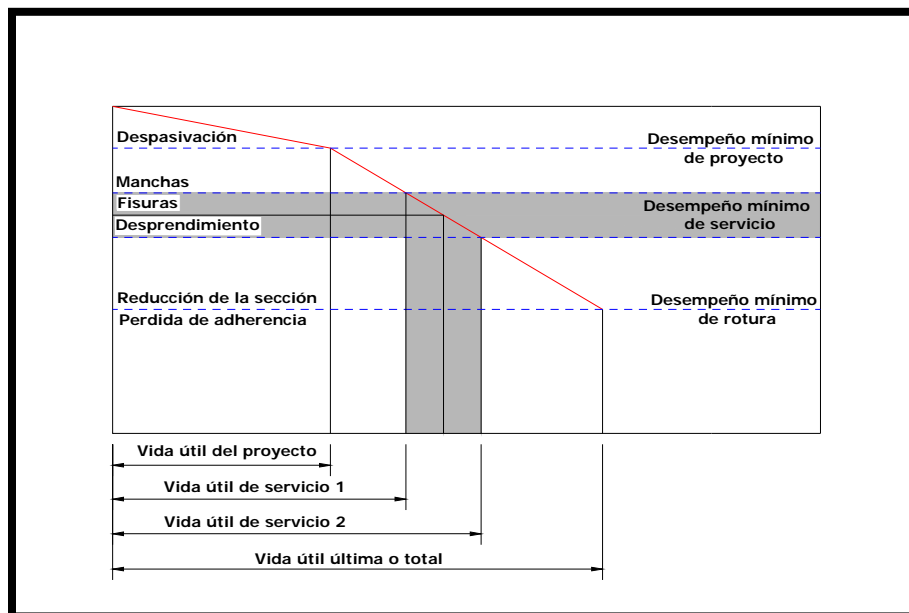


Figura 5. Concepto de vida útil de las estructuras de concreto en función del fenómeno de la corrosión del refuerzo. Tomado

1.4 Mecanismos de transporte a través del concreto.

En la industria de la construcción se puede afirmar que el concreto es el material más durable, por todo lo que puede resistir a través de los años de servicio. Sin embargo, si nos adentramos hacia el por qué de esta resistencia, se debe hablar acerca de la permeabilidad del mismo ante los ataques exógenos o endógenos que lo afectan. Estos ataques que se hacen efectivos por algunos fluidos que lo pueden penetrar y formar procesos de reacción provocándole problemas de vida útil. Los fluidos a los se hace referencia son el agua o químicos disueltos en el agua, el dióxido de carbono y el oxígeno, los cuales pueden moverse a través del concreto por medio de la naturaleza porosa del mismo generando reacciones con los constituyentes o con el agua presente en los poros iniciando ataques de sulfatos, de cloruros o la reacciones álcali – agregado.

Los cuatro principales procesos de transporte que generan la penetración de sustancias en el concreto son los siguientes: presión de flujo, difusión, electro-migración o migración térmica, en adición a estos se pueden citar tres procesos internos del concreto que puede afectar los procesos de transporte ellos son: la absorción, la succión capilar y la osmosis.

1.4.1 Permeabilidad.

Un concepto a tener claro es el de permeabilidad, el cual se define como la facilidad con la cual los fluidos tanto líquidos como gases pueden adentrarse en el concreto y moverse por medio de él, cuando existe un diferencial de presión que los impulsa, (Rodríguez, 2002), también se puede definir como la propiedad del concreto en donde se mide que tan rápido un líquido fluirá a través del concreto cuando se aplica una cabeza de presión, (Claisse, 2005).

1.4.2 Difusión

La difusión es un proceso por el cual cualquier ion puede pasar a través del concreto saturado sin necesidad que exista flujo de agua. La difusión es impulsada por los gradientes de concentración, es decir, si una solución fuerte está en contacto con una solución débil los iones migrarán entre las soluciones hasta que ambas tengan igual concentración. (Claisse, 2005)

Un proceso de difusión se puede observar en la siguiente Figura 6.

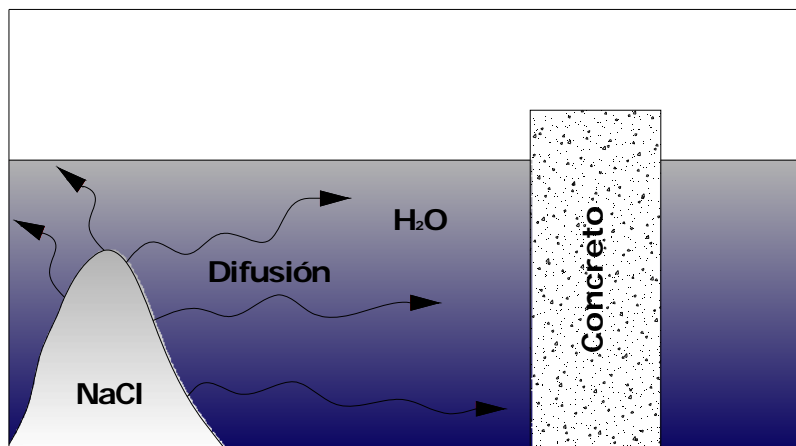


Figura 6. Mecanismo de difusión en el concreto. Tomado (Claisse, 2005).

Hablando del concreto y de sus agentes agresores, en el caso de los cloruros existe dos condiciones:: los cloruros libres y los fijos, la sumatoria de los dos serán los cloruros totales. En el concreto, en el caso de los cloruros libres estos son los únicos que se pueden mover en el medio y por tanto contribuir a la concentración o al potencial químico(Tang, 1999).

Usualmente la difusión en el concreto se calcula utilizando la primera ley de Fick la cual supone que el flujo de una sustancia es directamente proporcional al gradiente de la concentración. La difusión se describe mediante la siguiente ecuación conocida como la primera ley de Fick:

$$J = -D \frac{\delta c}{\delta x} \quad (10)$$

La formulación anterior no tiene en cuenta el cambio de la concentración en el tiempo x por tanto se establece la segunda ley de Fick, la cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = \left(-D \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} \right) \quad (11)$$

La segunda Ley de Fick, conocida también como **Ecuación de Difusión**, es una ecuación diferencial cuya integración suministra la concentración de la sustancia que se difunde en función del espacio y el tiempo.

1.4.3 Electromigración

Este fenómeno ocurre cuando un campo eléctrico(o diferencia de voltaje) está presente, este campo puede ser derivado de una fuente externa o de la interacción iónica entre especies. Si un campo eléctrico se aplica a través del concreto, Figura 7, los iones negativos se mueven hacia el electrodo positivo, mientras que los iones con carga positiva se mueven hacia el electrodo negativo. En un ensayo de electromigración se produce en el concreto transporte electrolítico, generando evolución de la corriente eléctrica, ya que este es el único mecanismo por el cual el concreto puede conducir electricidad.(Claisse, 2005).

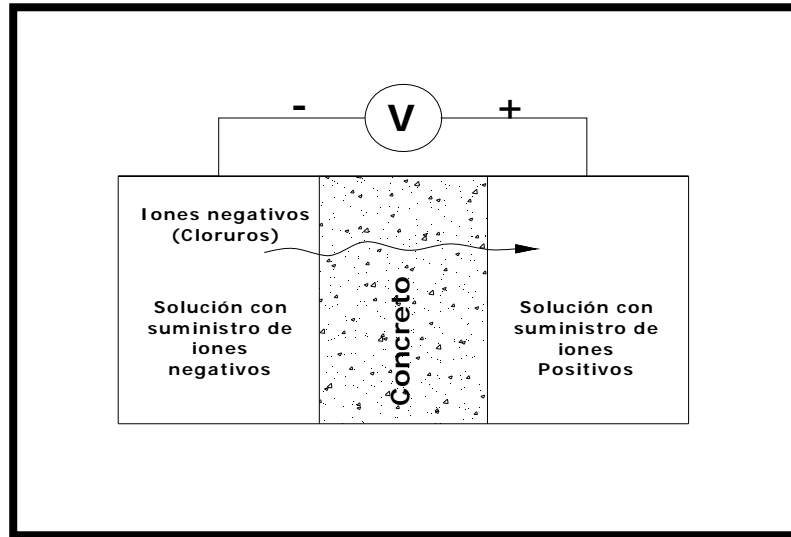


Figura 7. Esquema de electromigración de iones. Tomado(Claisse, 2005).

1.4.4 Termomigración.

Es el movimiento de los fluidos impulsados por un gradiente de temperatura, desde regiones cálidas a frías o viceversa. La velocidad con que se produce el movimiento del fluido dependerá de la permeabilidad del sólido. Este proceso es diferente al ocurrido en el secado por evaporación que tiene lugar en las superficies expuestas. Un ejemplo de este tipo de proceso ocurre cuando una estructura es afectada con sales de deshielo que al ser calentada por el sol produce el movimiento de migración rápido del agua con sal, que está en los superficie de los poros del concreto, hacia una parte más fría de la estructura (Claisse, 2005).

1.4.5 Absorción

La absorción es el proceso por el cual hay movimiento de iones desde el medio ambiente exterior hacia el concreto. Este movimiento se produce en los capilares de los poros del concreto que están expuestos al ambiente externo. El proceso de acción capilar puede ocurrir teniendo en cuenta dos factores: el primero tiene que ver con la estructura porosa del hormigón y el segundo con la condición de humedad que tenga el material, es decir, se genera de manera diferente dependiendo de las condiciones de saturación del material.(Rodríguez, 2002).

1.4.6 Porosidad.

La porosidad se define como la cantidad de poros de una masa de concreto, originados por la evaporación del agua de mezcla y el aire atrapado. Se expresa como el volumen de vacíos respecto al volumen total. Los poros se pueden subdividir en los siguientes tipos.

1.4.6.1 Poros de aire.

Estos son los poros que suelen estar interconectados y se forman naturalmente con el proceso de mezclado o los poros producidos por el aire incluido intencionalmente en la mezcla, su diámetro es mayor a 200 micras (Guzman, 2003).

1.4.6.2 Poros capilares.

Los poros capilares se encuentran por fuera del gel del cemento, cuando se interconectan en grandes densidades, generan la mayoría de problemas de durabilidad ya que es el camino directo de los mecanismos de transporte para llegar al acero de refuerzo, su tamaño oscila entre 0.02 micras y las 200 micras (Guzman, 2003).

1.4.6.3 Poros de Gel.

Son los poros que se presentan en la pasta de cementos ya hidratada, su diámetro es menor de las 0.02 micras.

1.4.7 Ensayo de estado de difusión uniforme estacionario. (Steady state difusión test).

Este ensayo consiste en usar un gradiente de concentración entre dos tipos diferentes de soluciones, entre las que se encuentra una delgada muestra de concreto, que debe ser atravesada por los iones mediante los cuales se quiere medir el coeficiente de difusión. La primera solución deberá contener los iones que penetrará a la muestra y la segunda solución no deberá contener ningún tipo de estos iones. Una vez producido un flujo de iones constante el coeficiente de difusión se puede calcular utilizando la primera ley de Fick.

1.4.8 Ensayo de estado de difusión no uniforme (Non Steady state difusión test):

Un ensayo no estacionario consiste en someter una muestra de concreto a una penetración unidireccional de iones, en la que nunca se alcanza un estado de flujo uniforme. Para esta condición el tiempo es un factor importante y debe ser tenido en cuenta en el cálculo del coeficiente de difusión. Para esta condición de penetración es posible utilizar la segunda ley de Fick para calcular el coeficiente de difusión.

1.5 CLORUROS EN EL CONCRETO REFORZADO.

Los cloruros en el concreto principalmente generan corrosión en el acero de refuerzo. Estos se presentan como agentes nocivos en el momento de la mezcla de concreto o cuando el concreto ya está en servicio, principalmente en ambientes con altas concentraciones (industrias, agua de mar, sales de deshielo).

Los cloruros se pueden presentar en dos formas: fijos y libres. En el primer estado los cloruros se pueden encontrar físicamente adsorbidos por las paredes de los poros o pueden estar químicamente ligados por la reacción con ciertos compuestos del cemento, como por ejemplo de los hidratos del aluminato tricalcico C_3A . Estos aluminatos están normalmente presentes en las pastas de cemento y causan una acción importante de fijación de los iones Cl^- a la pasta de cemento.

Los ciclos de humedecimiento – secado, son muy frecuentes en las costas marinas, estos aumentan la posibilidad de penetración de los cloruros debido a que pueden ser absorbidos mediante los poros del concreto por capilaridad. De acuerdo con lo anterior, los cloruros al penetrar al concreto atacan el acero de refuerzo, generando la desaparición de la capa de pasivación en pequeñas áreas de la superficie del acero, originando corrosión por picaduras en el refuerzo estructura.

La corrosión del acero se da por acción electroquímica, la cual se produce cuando dos metales distintos están en contacto eléctrico en presencia de humedad y oxígeno. Este proceso también ocurre en el acero que está solo, debido a diferencias en el potencial electroquímico de superficie, el cual forma zonas catódicas y anódicas, conectadas por electrólitos en forma de solución salina en el cemento hidratado. (A.M. Neville, 1998).

Los iones ferrosos con carga positiva Fe^{++} en el ánodo pasan a la solución, mientras que los electrones libres cargados negativamente pasan a lo largo del acero dentro de los cátodos

donde son absorbido por los componentes del electrólito y combinados con agua y oxígeno, para formar iones hidróxilo (OH^-), los cuales se combinan con los iones ferrosos para formar hidróxido férrico, que a su vez se convierte en herrumbre, Figura 8 (A.M. Neville, 1998).

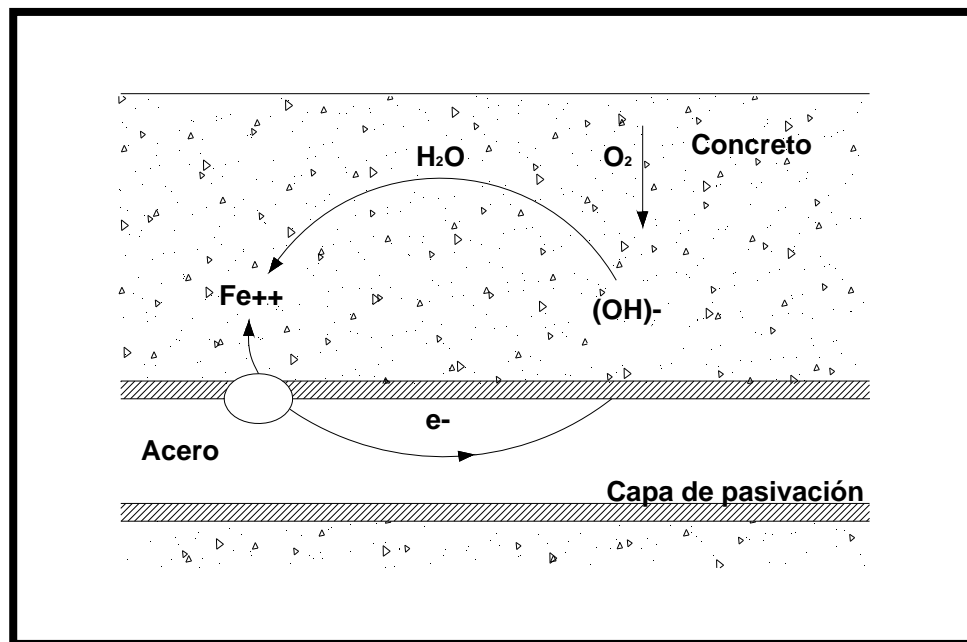
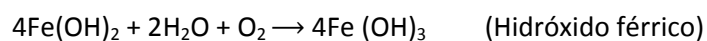


Figura 8. Representación esquemática del proceso de corrosión electroquímica. Tomado (A.M. Neville, 1998)

Este proceso se puede describir así:



En estas descripciones esquemáticas se observa que el oxígeno se consume, pero el agua se regenera y se necesita solamente para que el proceso continúe (A.M. Neville, 1998).

Como se dijo anteriormente los cloruros destruyen la capa de pasivación, generando que la superficie del acero se vuelva localmente activa para formar el ánodo y con la superficie pasiva se forma el cátodo, lo que produce una corrosión por picaduras localizadas, tal y como se muestra en la Figura 9.

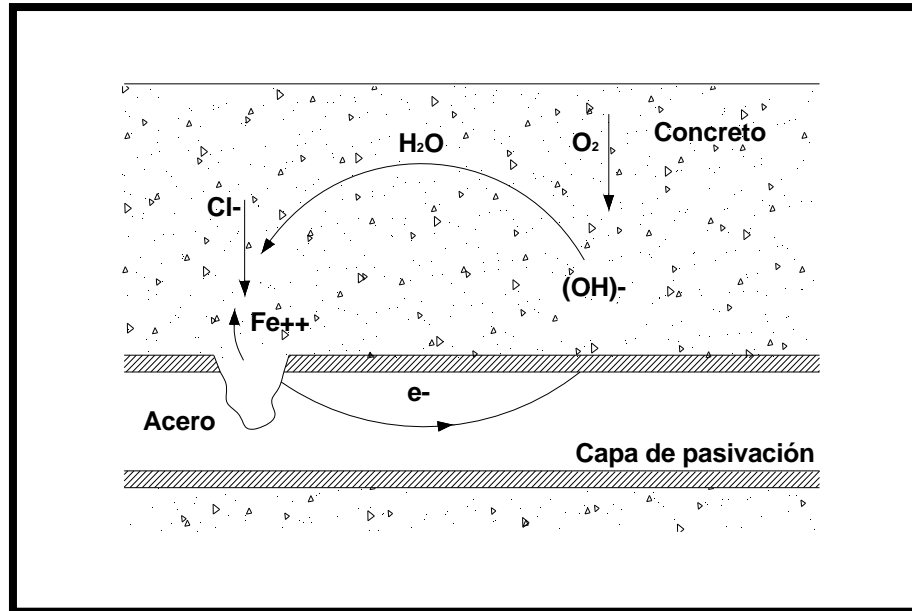
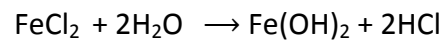


Figura 9. Esquema de corrosión electroquímica en presencia de cloruros. Tomado (A.M. Neville, 1998).

Las reacciones esquemáticas son las siguientes:



El acero al oxidarse aumenta su sección transversal y traslada el problema al concreto fisurandolo de manera paralela al hierro, hasta llegar al descascaramiento del hormigón como muestra la Figura 10 Neville(1998).

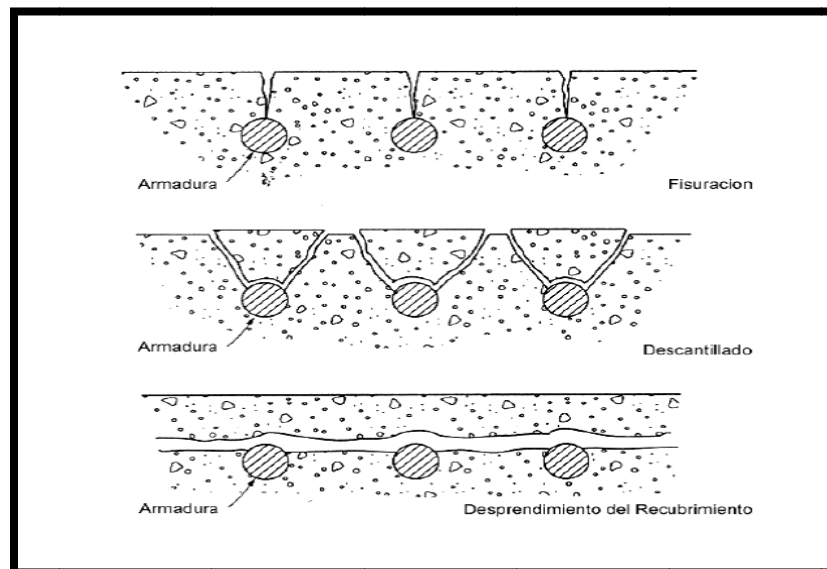


Figura 10. Problema generado por la corrosión al concreto. Tomado (Neville, 2002).

1.6 La durabilidad en el Concreto de Alto Desempeño (HPC).

El concreto de alta resistencia tiene una baja porosidad producto de tener una matriz cementicia mucho más compacta, en comparación con un concreto normal. En la Figura 11, se puede observar que en la relación A/C de 0.25, hay mucho menor cantidad de agua, esto equivale a que los granos de cemento están mucho más cercanos entre si, a diferencia de la relación A/C de 0.65, lo que produce en este tipo de pastas una mayor porosidad (Aitcin, 2003).

El CAR al tener una porosidad menor dificulta la penetración de agentes externos que originan el deterioro del concreto, adicionalmente, su alta impermeabilidad y el alto contenido de cemento suministra una protección adicional a las armaduras de refuerzo contenidas en concretos sometidos a ambientes agresivos.

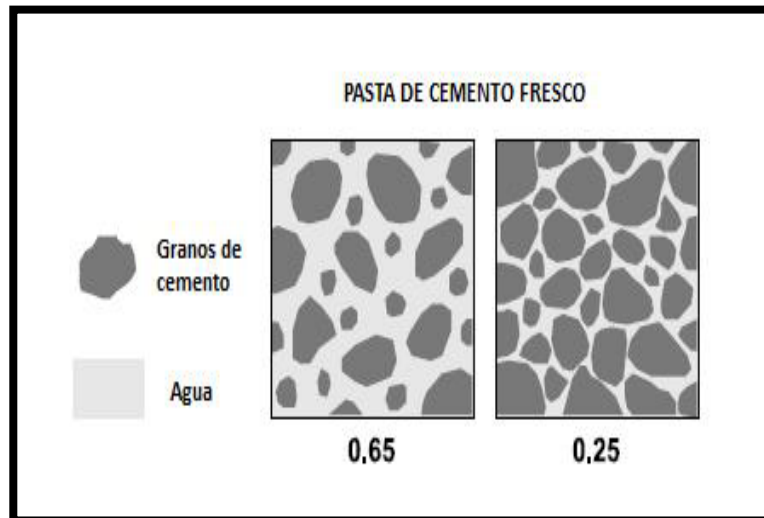
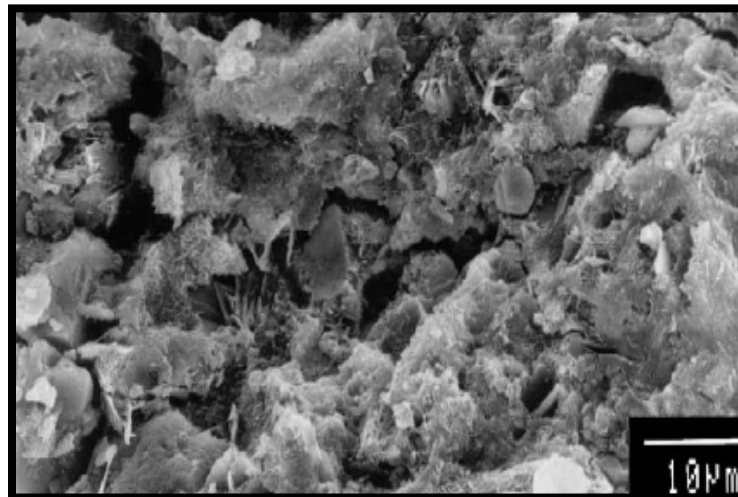
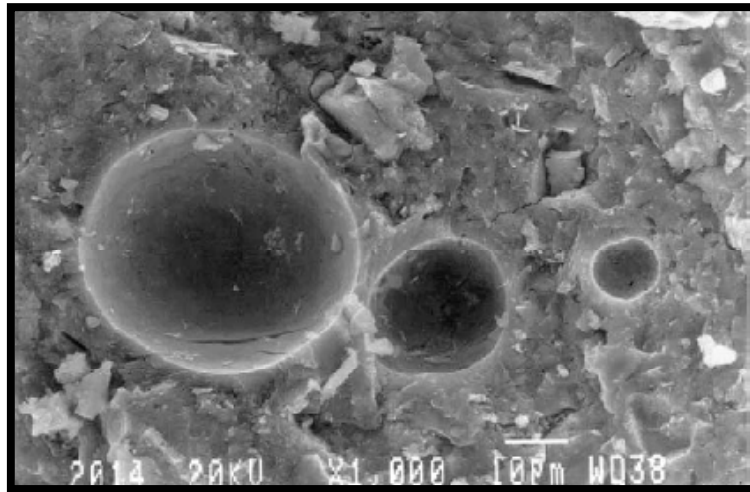


Figura 11. Representación de la microestructura de dos tipos de pasta cemento con diferentes relaciones A/C . Tomado (Aitcin, 2003).

Aitcin (2003), muestra la diferencia entre dos relaciones agua cemento diferentes por medio de la microestructura del concreto. Esto se puede evidenciar en la Fotografía 2 y Fotografía 3.



Fotografía 2. Microestructuras de altas relaciones A/C en el concreto. Tomado (Aitcin, 2003)



Fotografía 3. Microestructuras de bajas relaciones A/C en el concreto. Tomado (Aitcin, 2003).

En las fotografías anteriores, se puede observar que en los concretos con altas relaciones agua-cemento, la matriz cementicia, es altamente porosa y heterogénea, caso contrario, con los concretos de bajas relaciones agua – cemento, en donde se muestra una baja porosidad y una matriz cementicia homogénea, generándole a este tipo de concreto una alta durabilidad, ante los ataques exógenos ambientales (Aitcin, 2003).

CAPITULO II

2 Programa Experimental.

Con el objeto de determinar la influencia de la microsílíce en el concreto de altas prestaciones, para la presente investigación se plantearon dos fases que se desarrollaron como parte del presente proyecto. Inicialmente se planteó la determinación de la dosificación óptima de un concreto de altas prestaciones utilizando materiales pétreos de la zona de influencia de la ciudad de Bogotá. En una segunda etapa y ya determinada la dosificación óptima y seleccionadas los materiales a utilizar se evaluó el efecto de la adición en la penetración del ion cloruro

La primera fase consistió en fundir 30 probetas para cada tipo de agregado (Tunjuelo-Cundinamarca, Tabio – Cundinamarca, Chicoral – Tolima y Gurayuriba-Meta) estudiado, de cuales 10 muestras pertenecían a la relación A/C = 0.36, 10 a la relación A/C=0.32 y 10 a la relación A/C = 0.28. Teniendo en cuenta que se encontraron antecedentes acerca de la alta la calidad mecánica del agregado del rio Guayuriba, se procedió a fundir 18 probetas con este tipo de agregado, con una relación A/C = 0.28, con el fin de observar la evolución de resistencias a compresión y de módulos de elasticidad del HPC, a los 90 y 120 días.

A las 128 probetas fundidas se las sometió a curado por inmersión hasta 28, 90 y 120 días, tiempo en el cual se les realizó los ensayos de caracterización mecánica de resistencia a compresión y de módulo de elasticidad del HPC. Lo anterior se puede observar en la Figura 12. La cual muestra un esquema indicando los materiales utilizados, los ensayos realizados y los tiempos de ensayos.

INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE ADICIÓN DE LA MICROSILICE Y DEL TIPO DE CURADO EN LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO EN EL CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO

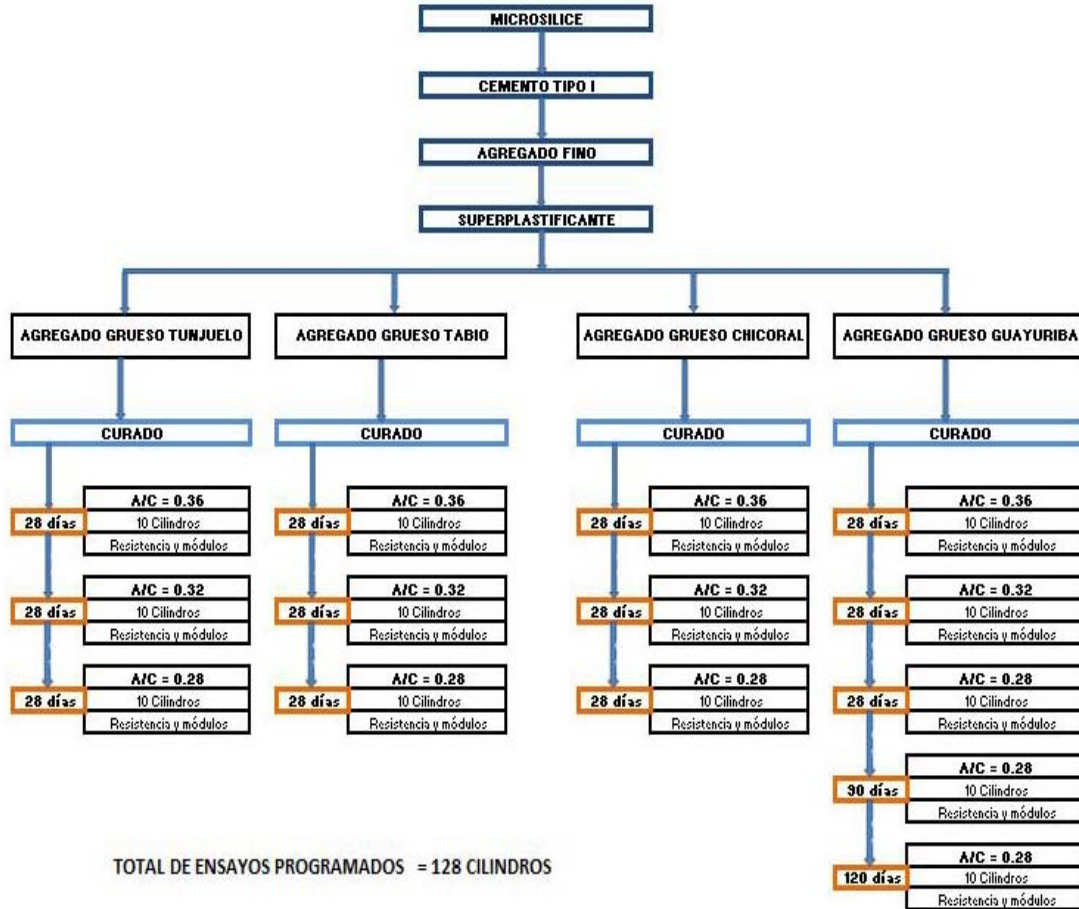
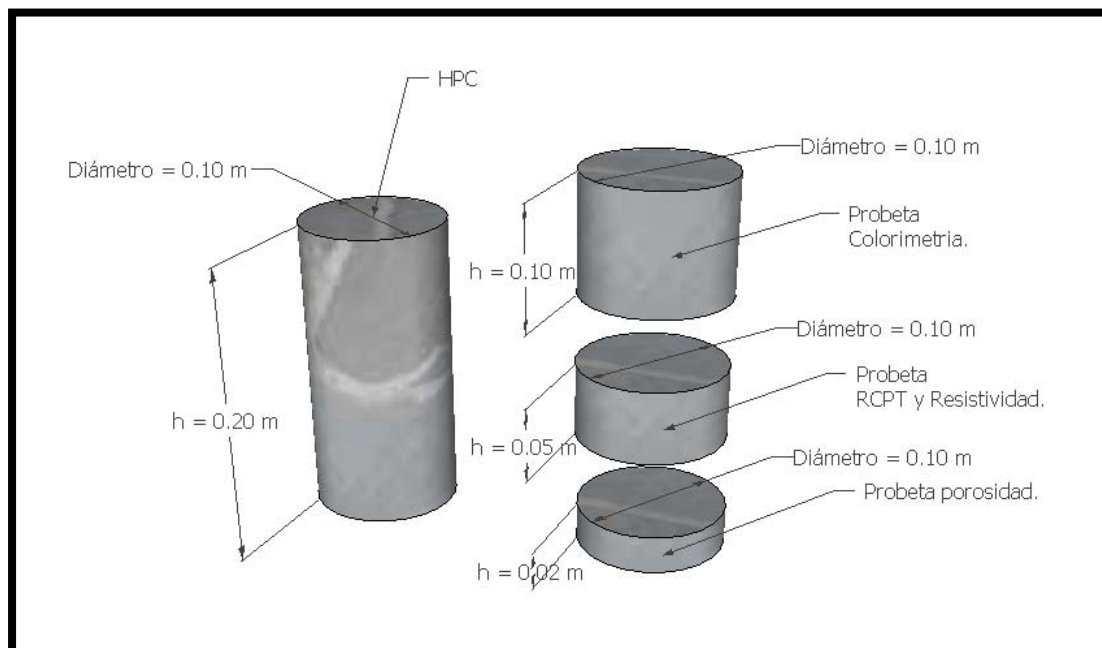


Figura 12. Matriz de ensayos primera fase.

Una vez obtenido el agregado de mejor comportamiento en la resistencia a compresión del HPC, se procedió a ejecutar la fase II, que consistió en determinar la durabilidad, de éste tipo de concreto ante la agresión del ion cloruro. Para esto se generaron dosificaciones de concreto para distintos porcentajes de microsilice, una vez obtenidas las dosificaciones para las mezclas de concreto, se procedió a fundir 30 cilindros dimensionados de 10 cm x 20 cm, para cada uno de los porcentajes de microsilice estudiados (0, 5, 10 y 15%). De las 30 probetas, 15 fueron sometidas a curado por inmersión y 15 a curado al aire; 3 de las 15 muestras, fueron ensayadas a los 7 días de edad y 3 a los 28 días sometiéndolas únicamente a ensayos de resistencia a compresión del concreto. A los 90 días de edad, se sometieron 3 muestras más, a pruebas de resistencia a compresión del concreto y de módulo de elasticidad. De igual forma a otras 3 muestras de las 15 iniciales, se les determinó a los 300 días de edad, las mismas propiedades mecánicas, de las probetas ensayadas a los 90 días. Las 3 últimas muestras de las 15 iniciales de cada porcentaje de microsilice, fueron sometidas a 56 días de curado, al cumplir dicha edad, cada una de las probetas se cortaron tal y como lo muestra la Figura 13, con el fin de obtener las probetas para los ensayos de colorimetría (probeta de 10 cm de diámetro por 10 cm de alto), RCPTy resistividad, (probeta de 10 cm de diámetro por 5 cm de alto) y de porosidad (probeta de 10 cm de diámetro por 2 cm de alto).



muestras para ensayos del HPC

En la Figura 14 se muestra el diagrama de flujo de los ensayos realizados en la fase II de esta tesis.

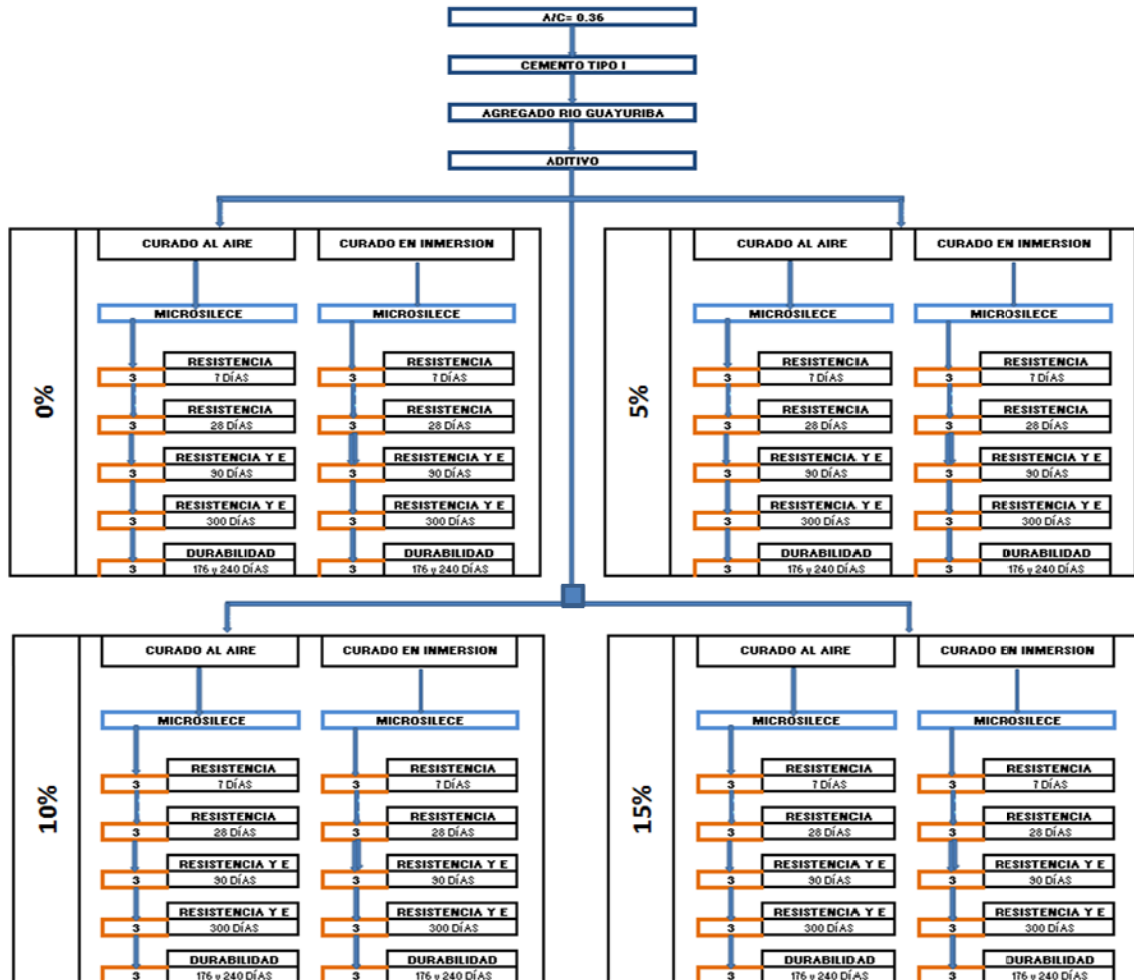


Figura 14. Diagrama de flujo de ensayos realizado

Las probetas de colorimetría, resistividad y RCPC, fueron impermeabilizadas en el contorno del cilindro, con el fin de garantizar el flujo axial de los cloruros. Una vez garantizado esto, las muestras del ensayo de colorimetría se sometieron después de 56 días de Curado inicial, (inmersión y aire) en una solución de cloruro de sodio a una profundidad no menor de 15 mm, durante 120 días.. Las muestras de resistividad, RCPT y porosidad, se conservaron durante 240 días en los dos tipos de curado (inmersión y aire) propuestos en esta tesis, tal y como se puede observar en la Fotografía 4.



Fotografía 4. Tipo de curados

Después de cumplidos los tiempos programados, se realizaron todos los ensayos correspondientes, para todas las muestras producidas. En las siguientes tablas se muestra un resumen de la cantidad de probetas para cada uno de los ensayos programados en esta tesis:

FASE I		
Tipo de ensayo	Mezcla	Numero de Probetas
Resistencia a compresión	Tunjuelo	30
Módulo de elasticidad	A/C= 0.36-0.32-0.28	
Resistencia a compresión	Tabio	30
Módulo de elasticidad	A/C= 0.36-0.32-0.28	
Resistencia a compresión	Chicoral	30
Módulo de elasticidad	A/C= 0.36-0.32-0.28	
Resistencia a compresión	Guayuriba	38
Módulo de elasticidad	A/C= 0.36-0.32-0.28	
Numero total de probetas		128

Tabla 1. Ensayos y número de probetas de la fase I.

FASE II				
Tipo de ensayo	%	Mezcla		Numero de Probetas
	Microsilice	Inmersión	Aire	
Resistencia a compresión	0%	7 y 28 Días	7 y 28 Días	12
Resistencia f'c y Módulo E		90 y 300 Días	90 y 300 Días	12
Resistencia a compresión	5%	7 y 28 Días	7 y 28 Días	12
Resistencia f'c y Módulo E		90 y 300 Días	90 y 300 Días	12
Resistencia a compresión	10%	7 y 28 Días	7 y 28 Días	12
Resistencia f'c y Módulo E		90 y 300 Días	90 y 300 Días	12
Resistencia a compresión	15%	7 y 28 Días	7 y 28 Días	12
Resistencia f'c y Módulo E		90 y 300 Días	90 y 300 Días	12
Ensayos de colorimetría	0%	176 Días	176 Días	6
Ensayos de colorimetría	5%	176 Días	176 Días	6
Ensayos de colorimetría	10%	176 Días	176 Días	6
Ensayos de colorimetría	15%	176 Días	176 Días	6
RCPT y Resistividad	0%	240 Días	240 Días	6
RCPT y Resistividad	5%	240 Días	240 Días	6
RCPT y Resistividad	10%	240 Días	240 Días	6
RCPT y Resistividad	15%	240 Días	240 Días	6
Porosidad	0%	240 Días	240 Días	6
Porosidad	5%	240 Días	240 Días	6
Porosidad	10%	240 Días	240 Días	6
Porosidad	15%	240 Días	240 Días	6
Numero Total de Probetas				168

Tabla 2. Ensayos y numero de probetas de la fase II

A continuación se explicará cómo se realizaron cada uno de los ensayos propuestos en esta tesis de maestría. Esto con el fin que el lector pueda visualizar las diferentes metodologías y procedimientos experimentales adoptados para medir tanto la penetración de cloruros, como sus variables relacionadas.

2.1 Resistencia a compresión en el HPC.

Esta propiedad del Concreto de Alto Desempeño se mide de igual manera que en el Concreto Convencional, utilizando la norma NCT 673 (ASTM C39). Esta norma describe el procedimiento de ensayo de cilindros sometidos a una carga axial inconfiada que al ser dividida entre el área bruta de la sección transversal del cilindro produce la resistencia a compresión del concreto. Este ensayo se puede realizar en cilindros de concreto de diferentes tamaños (7.5 cm x 15 cm, 10 cm x 20 cm y 15 cm x 30 cm), los cuales siempre deben cumplir una relación diámetro-alto de 1:2. Para el caso de este proyecto de investigación se usaron cilindros de 10 cm de diámetro x 20 cm de altura, los

cuales fueron sometidos a una fuerza axial aplicada por una máquina universal Forney con capacidad de 400.000 lbf. Para garantizar la correcta distribución de la carga por unidad de área se usaron almohadillas de neopreno para ensayos de compresión de concreto, dentro de un molde de acero tal y como se puede observar en la Fotografía 5.



Fotografía 5. Almohadillas de neopreno para el ensayo de resistencia a compresión del concreto.

La utilización del neopreno con respecto al método tradicional de capinado con azufre genera una diferencia mayor en la resistencia a compresión del 1% al 5% en la resistencia a compresión (Gesoglu et al., 2002).

El uso del neopreno en este proyecto se dio por políticas ambientales y de seguridad industrial por parte del laboratorio de estructuras de la Universidad Nacional de Colombia; adicionalmente el proceso de ensayo es mucho más rápido y las diferencias en los resultados finales no representan problemas respecto a lo requerido por los objetivos de esta investigación. La metodología de este ensayo consiste en someter el cilindro de concreto a una carga axial en una máquina universal como la mostrada en la Fotografía 6, y llevar la muestra de concreto hasta la falla.



Fotografía 6. Máquina Universal Forney

Por último se realizan los cálculos de resistencia compresión con la formula de esfuerzo, mostrada a continuación:

$$f'c = \frac{P_{max}}{A_{area\ cilindro}} \quad [MPa] \quad (12)$$

2.2 Modulo de elasticidad (E) en el concreto de alto desempeño.

El módulo de elasticidad estático en nuestro país se determina siguiendo los requerimientos de la Norma Técnica Colombiana NTC 4025 (ICONTEC4025, 2006). En esta se determina el módulo secante al 40 % de la carga última.

El ensayo consiste en ubicar un cilindro de concreto, dentro de dos anillos, separados por un pivote y un deformimetro mecánico, tal y como se observa en la Fotografía 7, dicha muestra es sometida en la maquina universal a tres ciclos de carga axial, con el fin de calibrar y de tomar promedio de desplazamientos en el caso de los dos últimos ciclos.



Fotografía 7. Cilindro de concreto con sus correspondientes anillos para medición de módulos

Con los datos medidos experimentalmente, que corresponden a parejas de carga y elongaciones y/o deformaciones hasta el 0.4f'c se construyen curvas de esfuerzo-deformación; el módulo de elasticidad se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{(\varepsilon_2 - 0.000050)} \quad (13)$$

Siendo:

E= Módulo de elasticidad secante, [MPa]

S₂ = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última, [MPa]

S₁ = Esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal ε_1 de las 50 Millonésimas, [MPa]

ε_1 = Deformación longitudinal producida por el esfuerzo S₂, [mm/mm]

Hay que tener en cuenta lo siguiente “si las distancias del vástago largo pivotado y del deformimetro al eje son iguales, la deformación del espécimen es igual a la mitad, la deformación del espécimen es igual a la mitad de la lectura del deformimetro. Si las distancias al eje no son iguales la deformación se debe calcular de la siguiente manera.” (ICONTEC4025, 2006).

$$d = \frac{ge_r}{e_r + e_g} \quad (14)$$

De donde

d = deformación total del espécimen a lo largo de la longitud efectiva del deformimetro, [mm]

g = lectura del deformimetro, [mm].

e_r= excentricidad del vástago largo pivotado, medida en milímetros con aproximación a 0,254 mm desde el eje del espécimen.

e_g= excentricidad del deformimetro, medida en milímetros con aproximación a 0,254 mm desde el eje del espécimen.

Los módulos de elasticidad obtenidos con el uso de almohadillas de neopreno para garantizar distribución de la fuerza al cilindro produce un resultado de módulo de elasticidad 5% mayor, que el obtenido capinando con azufre,(Gesoglu et al., 2002).

2.3 Velocidad de pulso ultrasónico en el concreto de alto desempeño.

Como se dijo en el capítulo anterior, el cálculo de la velocidad de pulso ultrasónico se basa en la ASTM C 597 y los datos obtenidos por este método se utilizan para estimar los módulos de elasticidad teniendo en cuenta el comportamiento elástico de las probetas de concreto.

Para obtener datos acordes en el método se debe garantizar que los dos palpadores o transductores estén enfrentados uno con el otro y que la superficie en donde se asientan sea plana para que no haya pérdidas de la onda emitida por el transductor hacia el medio de concreto. Una vez garantizado ese enfrentamiento y esa planicidad, se procede a aplicar grasa o cualquier otro material viscoso para evitar la pérdida de energía. Después de colocar la grasa se ubican los palpadores en la muestra y se emiten las ondas, de este ensayo se mide el tiempo que la onda dura en atravesar la muestra y se calcula la velocidad de ultrasonido como la relación entre la longitud de la probeta y el tiempo medido.

2.4 Métodos de medición de la valoración de los cloruros en el concreto.

Para la medición de los cloruros en el concreto se realizaron, varios ensayos de diferentes normativas los cuales se exponen a continuación.

2.4.1 Método de colorimetría en el concreto de alto desempeño.

Este método consiste en utilizar nitrato de plata al 0.1 M de AgNO_3 , y aplicar por medio de rociado una cantidad de este compuesto químico a muestras que previamente han sido sometidos a una concentración de cloruros, esto con el fin de observar el mapa de profundidad de penetración del ion cloruro de la muestra a analizar. Cuando el nitrato de plata entra en contacto con una solución de cloruros se precipita, formando unos productos “blancuzcos” que permiten diferenciar zonas en los que existe o no existe presencia de

estos iones. Se reporta que a partir de una concentración de 0.07 N de cloruros, el nitrato de plata comienza a precipitar, considerándose la anterior concentración la frontera.

Para medir la penetración de los cloruros en cada uno de los cilindros se siguió el procedimiento del Nordtest Method NT-Built 492 CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE MIGRATION EXPERIMENTS, el cual describe la forma de cómo medir la penetración de los cloruros después de haberse aplicado el nitrato de plata. El NT-Built, 492 describe que después de aplicar el AgNO_3 , se debe esperar 15 minutos para que aparezca el frente de penetración de cloruros, como se observa en la Fotografía 8.



Fotografía 8. Perfiles de penetración del ion cloruro del HPC con 0% de microsilíce.

Cilindros de concreto de 10cm de diámetro por 10 cm de altura, fueron impermeabilizados en su contorno, antes ser sometidas durante 4 meses a una solución de cloruro de sodio con una concentración de 0.08 N, tiempo durante el cual el cloruro, se difundió ascendiendo uniaxialmente a través de la probeta. La difusión del cloruro, estuvo dada por la condición de estado de difusión no uniforme (Non steady state diffusion test), la cual indica que a través del tiempo los cloruros, inician un proceso de penetración unidireccional en el concreto a través de los poros del mismo hasta donde la matriz cementicia permita el avance de dichos iones.

Una vez las probetas cilíndricas han sido sometidas a un tiempo razonable de exposición de cloruro de sodio, se retiran del ambiente de difusión y se parten transversalmente mediante un ensayo "Brasileño" y sobre la superficie "fresca" se aplica por rociado una cantidad suficiente de nitrato de plata. Pasados unos minutos aparecen sobre la muestra ensayada dos zonas, en donde se aprecia una frontera en la que se asume la concentración es 0.07 N Cl. Cuando ya se tiene el frente de penetración de los cloruros, se despreja un centímetro en los extremos de la probeta y se comienza a

medir cada 10 mm con el fin de obtener varias medidas de penetración a lo ancho de la probeta, estas medidas se promedian y se obtiene una medida promedio de penetración de cloruros en la muestra, este procedimiento se muestra en la Figura 15.

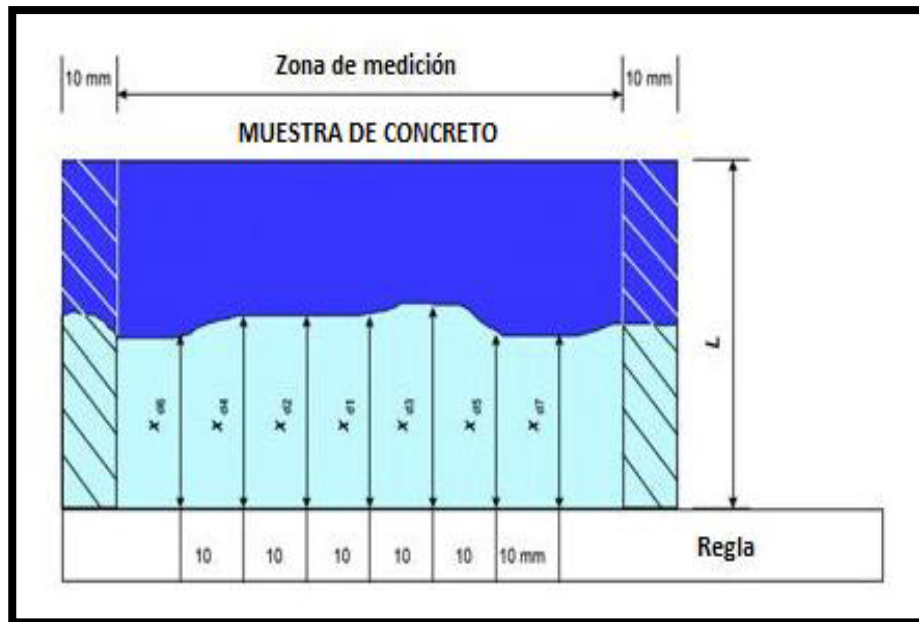


Figura 15. Profundidad de Penetración del ion cloruro en el concreto.

Una vez obtenida la profundidad promedio (X_d), es posible establecer una relación lineal entre la penetración (X_d) y la raíz cuadrada del tiempo. Teóricamente esto es válido para un proceso de difusión estándar en un medio espacio infinito (sin tiempo característico), sin tener en cuenta la naturaleza lineal o no de la ecuación de difusión. (Véronique B. B, 2007). A partir de esto se puede establecer que el coeficiente de penetrabilidad de difusión, es la relación entre la profundidad de penetración y la raíz del tiempo, es decir:

$$X_d = K \sqrt{t} \quad (15).$$

X_d = Profundidad promedio de penetración del ion cloruro [mm].

K = Coeficiente de penetrabilidad de difusión.

t = Edad de la muestra de concreto [días].

2.4.2 Ensayo Rápido de Permeabilidad de Cloruros ASTM 1202 en el concreto de alto desempeño.

Este método es usado para determinar la conductancia eléctrica del concreto, por medio de la cual se obtiene una indicación rápida de la resistencia del concreto ante la penetración del ion cloruro.

Como primer paso, la superficie curva del cilindro se recubre con una resina epóxica que evita que la muestra pierda su condición de saturación durante el ensayo. Con el fin de garantizar una adecuada electromigración de los cloruros, la muestra de concreto de 50 mm de espesor y 100 mm de diámetro, es previamente introducida en una bomba de vacío, con el fin de extraer el aire de los poros internos del concreto, saturándolos con agua destilada.

Una vez saturada la probeta, esta, es colocada entre dos celdas que sirven como reservorios, entre los cuales están inmersos electrodos metálicos, mediante los cuales se aplica una diferencia de potencial de 60V durante 6 horas. Una de las celdas se llena con una solución 0.3 N de NaOH, que sirve como ánodo mientras la otra celda se llena con una solución 3.0% de NaCl que sirve como cátodo. En la Figura 16, tomada de Lizarazo J.M.(2005) se muestra el proceso del ensayo ASTM C1202.

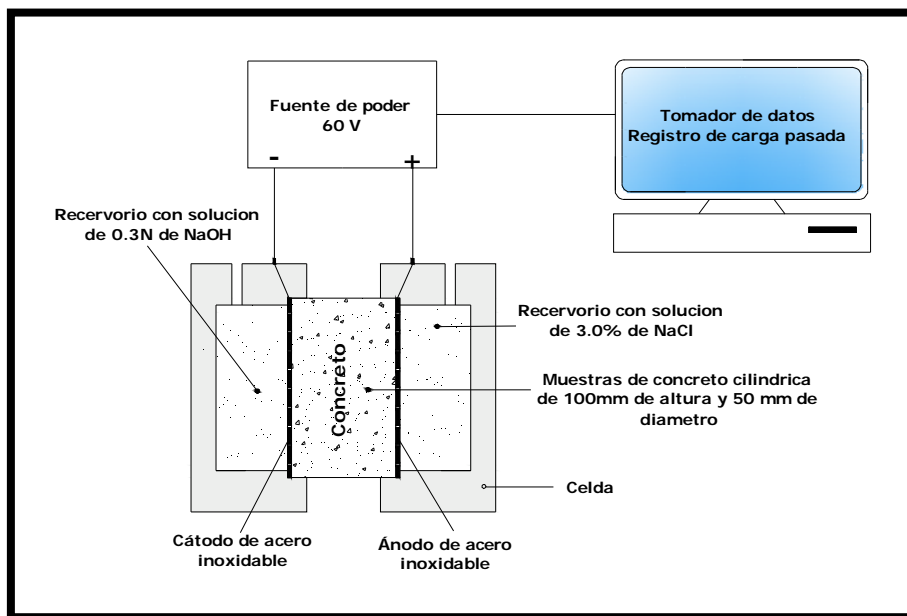


Figura 16. Esquema de ensayo RCPT

Una vez terminado ensayo, los datos obtenidos a través de las 6 horas, quedan registrados en un computador, de donde se puede extraer dichos datos con el fin de obtener la carga total en coulombs que paso por la muestra durante el tiempo de ensayo.

La carga total es determinada como el área bajo la curva de corriente versus tiempo, se utiliza para clasificar la penetrabilidad del ion cloruro en el concreto de acuerdo con la Tabla 3, tomada del ASTM C-1202(2005).

PENETRABILIDAD DEL ION CLORURO BASADA EN LA CARGA PASADA	
Carga pasada (coulombs)	Penetrabilidad del ion cloruro
> 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baja
100 - 1000	Muy Baja
< 100	Inelegible

Tabla 3. Penetrabilidad del ion cloruro basada en la carga pasada.

Desde su introducción en 1981 el ensayo ha sido usado como una medida indirecta para evaluar los parámetros de difusión del ion cloruro. Diferentes investigadores han determinado la relación del ensayo con otros métodos y experimentos, sin embargo, existen críticas, acerca de las deficiencias y limitaciones del ensayo. Básicamente dichas crítica se enmarcan en que la carga medida en el ensayo está relacionada con el movimiento de todos los iones a través de la solución contenida en los poros y que en concretos de baja calidad se presentan incrementos de temperatura debido al efecto Joule, el cual consiste en si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. (Lizarazo J.M., 2009).

En este ensayo rápido de permeabilidad de cloruros (RCPT) se uso un equipo Proove it de Germans Instruments. Ver Fotografía 9.



Fotografía 9. Equipo de ensayo RCPT – Universidad Nacional de Colombia.

2.4.3 Resistividad eléctrica del hormigón de alto desempeño.

Consiste en la medida de la resistencia eléctrica del hormigón endurecido, la cual se obtiene aplicando un campo eléctrico mediante dos electrodos externos a un cilindro de concreto, el cual previamente ha sido saturado. En el ensayo se aplica un voltaje igual a 5 voltios de corriente alterna AC con 500 Hz de frecuencia, por medio de un generador de señales, a un muestra de concreto de 10 cm de diámetro por 5 cm de altura, la cual se encuentra preinstalada en las celdas del ensayo de RCPT para así aprovechar el montaje de dicho ensayo. Una vez aplicada la diferencia de potencial, se mide la corriente que circula por el circuito mediante una resistencia conocida (463.3Ω). A partir de los valores conocidos de corriente medido y voltaje aplicado, se calcula la resistencia eléctrica del concreto y con esta a su vez se calcula la resistividad de la probeta.

En el montaje del ensayo reproducido en el laboratorio de la universidad nacional como parte de este proyecto de maestría, se uso una fuente Alemana Waldel & Golterman, una caja receptora a las cual se le instalo un resistencia y un multímetro, este ultimo usado con el fin de obtener la corriente en los tres puntos (A,B y C) de medición ubicados en la caja receptora. Dicho ensayo se representa en la

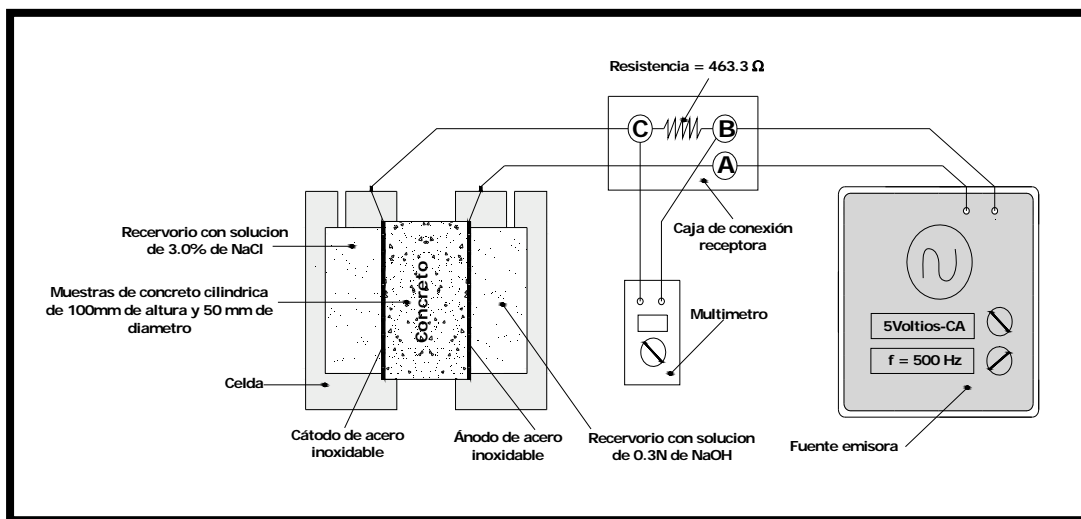


Figura 17. Esquema ensayo de resistividad eléctrica del concreto.

En la figura anterior se observa la secuencia del montaje, el cual comienza con la emisión deseñal, por parte de la fuente emisora a través de un cable, hasta la caja de conexión receptora; dicha caja receptora se conecta hasta la probeta de concreto, con el fin de transmitir corriente a la muestra, de donde sale otro cable, hasta la caja receptora, para finalizar el circuito llegando a la fuente.

Con el circuito en funcionamiento, se procede con el multímetro a tomar las medidas de diferencia de potencial entre los puntos AC, AB Y BC de la caja receptora. Se debe tener en cuenta que la sumatoria de los voltajes de los puntos AB y BC, debe ser más o menos igual al voltaje AC.

Al obtener los datos de las voltajes, se proceden a realizar los cálculos usando la ley de Ohm, fórmula 16.

$$R = \frac{V}{I} \quad (16)$$

De donde:

R= Resistencia eléctrica [Ω , Ohmios]

I= Intensidad eléctrica que pasa por el circuito [A, Amperios]

V= Diferencia de Potencial entre los electrodos [V, Voltios]

Conocida la resistencia eléctrica la resistividad del concreto se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Resistividad} = \frac{\text{Resistencia del concreto} \times \text{Area del muestra}}{\text{Profundidad de la muestra}} \quad (17)$$

2.5 Cálculo de la porosidad en el concreto de alto desempeño.

El cálculo de la porosidad en el HPC, se realizó saturando mecánicamente la muestra de concreto durante 3 horas en una cámara de vacío y dejándolas inmersas 24 horas antes del ensayo para garantizar que todos los poros estuvieran llenos de agua. Con las muestras en estas condiciones se procede a secar la muestra superficialmente y se toma el peso en la condición saturada y superficialmente seca, después de este paso, se procede a sumergir la muestra en una canasta para así tomar el peso de la muestra sumergida; por último, se introduce la muestra en el horno por 24 horas o hasta peso constante para finalmente tomar el último dato de peso seco de la muestra.

Al obtener los tres datos anteriores, se procede a determinar el porcentaje de porosidad mediante la siguiente formulación:

$$\% \text{ Porosidad} = \frac{W_{sss} - W_{seco}}{W_{sss} - W_{sumergido}} \quad (18)$$

% Porosidad = Porcentaje de porosidad del concreto saturado.

W_{sss} = Peso de la muestra superficialmente seca [gramos]

W_{seco} = Peso de la muestra seca [gramos]

$W_{sumergida}$ = Peso de la muestra totalmente sumergida [gramos]

CAPITULO III

3 Materiales

Para la realización de este proyecto de investigación se utilizaron materiales usualmente empleados en la industria de la construcción en el país. A continuación se da, una descripción de los materiales usados para producir el concreto de alto desempeño, al igual que los materiales usados en los ensayos de determinación de las diferentes propiedades mecánicas del concreto, penetración de cloruros y resistividad/conductividad eléctrica.

3.1 Agregados

De acuerdo con la teoría expuesta por varios autores, sobre la importancia de los agregados pétreos en las resistencias mecánicas del HPC, se concluye que la falla de una probeta de concreto sometido a compresión simple siempre se presenta en este material. Como investigación preliminar en esta tesis se realizó un estudio detallado a fin de encontrar el agregado más idóneo en el camino hacia la adecuada dosificación de un concreto con resistencias superiores a 41 MPa. Para este fin se escogieron 4 agregados de diferentes canteras aledañas a la ciudad de Bogotá (agregados del Tunjuelo en la ciudad de Bogotá D.C, de Tabio en la ciudad de Tabio Departamento de Cundinamarca, de Chicoral de la ciudad de Chicoral Departamento del Tolima y de Villavicencio Departamento del Meta). La génesis de los materiales pétreos usados se resume a continuación:

3.1.1 Agregados del Departamento de Cundinamarca (CT1 Y CT2).

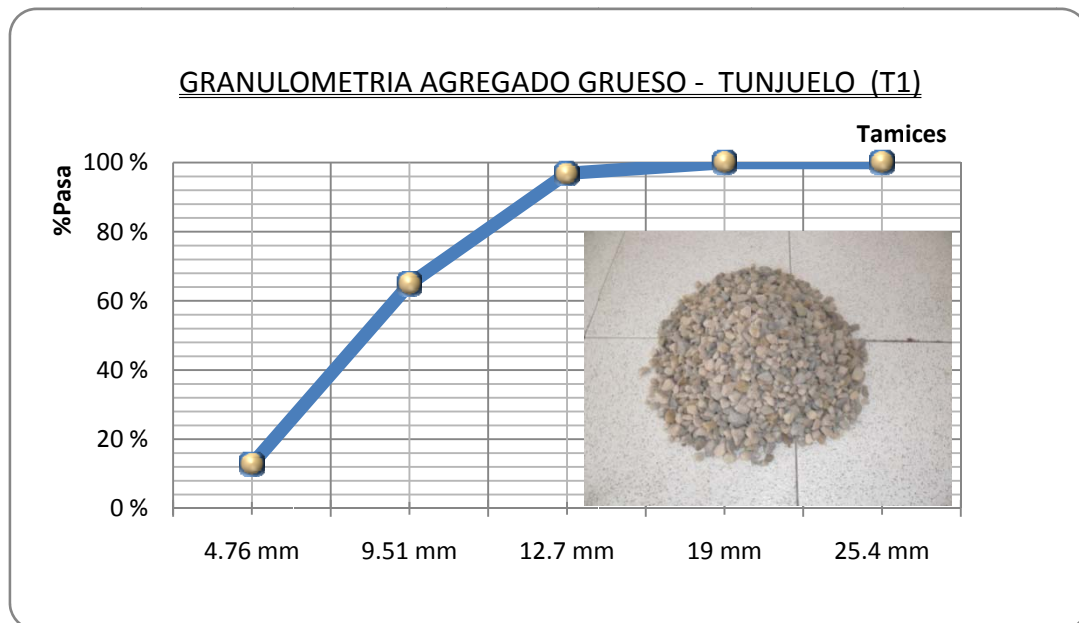
Los agregados obtenidos en el Departamento de Cundinamarca están constituidos geológicamente por formaciones sedimentarias de edades cretácicas, terciarias y cuaternarias. Las formaciones más antiguas que afloran se depositaron en ambientes marinos (cretácico superior), sobre los cuales reposan rocas procedentes de ambientes litorales, transicionales y continentales de edad terciaria. A finales del terciario (Plioceno), se inicio el levantamiento y formación de las cordilleras andinas de Colombia, entre ellas la cordillera Oriental, en cuya parte central se encuentra la Sabana de Bogotá. La sabana de Bogotá esta bordeada de cordones montañosos cuyas elevaciones han sido

erosionadas desde el Plioceno-Pleistoceno y los materiales detríticos se han desplazado hacia las áreas deprimidas. Los materiales más frágiles se han desmenuzado produciendo partículas de menor tamaño: arenas, limos y arcillas, que colmataron el antiguo lago Bogotá y que han migrado en ocasiones fuera de la cuenca de la Sabana de Bogotá. (Paez and Romero, 2004). Los agregados estudiados en este departamento son procedentes de minas localizadas sobre los ríos Tunjuelo (CT1) y Tabio (CT2), que como se explicó anteriormente tienen origen sedimentario.

Las propiedades físicas de los materiales de Cundinamarca se pueden observar en las Tabla 4 y Tabla 5, y en las Gráfica 1 y Gráfica 2.

Propiedades Físicas del agregado grueso CT1	
Densidad (g/cm ³)	2,47 kg/dm ³
Masa unitaria suelta (g/cm ³)	1540 kg/m ³
Masa unitaria apisonada (g/cm ³)	1571 kg/m ³
Absorción	1.66%
Tamaño máximo absoluto	19 mm
Tamaño máximo nominal	12.7 mm

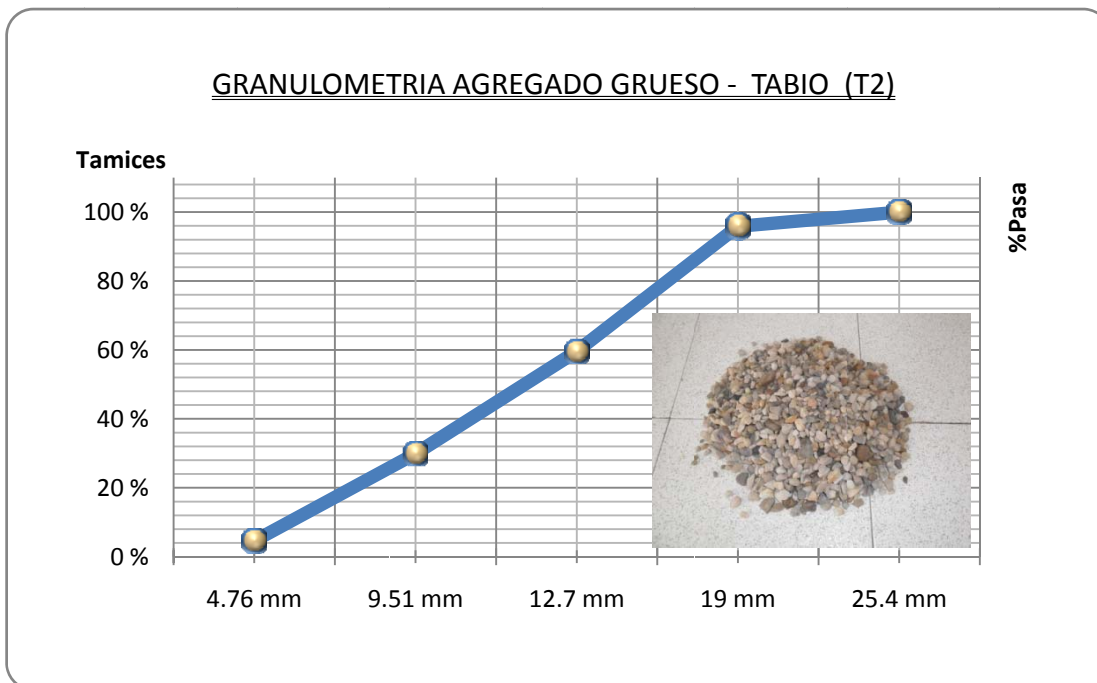
Tabla 4. Propiedades físicas del agregado grueso Cundinamarca - Tunjuelo



Gráfica 1. Granulometría del agregado grueso Cundinamarca - Tunjuelo

Propiedades Físicas del agregado grueso CT2	
Densidad (g/cm^3)	2,27 kg/dm^3
Masa unitaria suelta (g/cm^3)	1378 kg/m^3
Masa unitaria apisonada (g/cm^3)	1451 kg/m^3
Absorción	5,63 %
Tamaño máximo absoluto	19 mm
Tamaño máximo nominal	12.7 mm

Tabla 5. Propiedades físicas del agregado grueso Cundinamarca – Tabio.



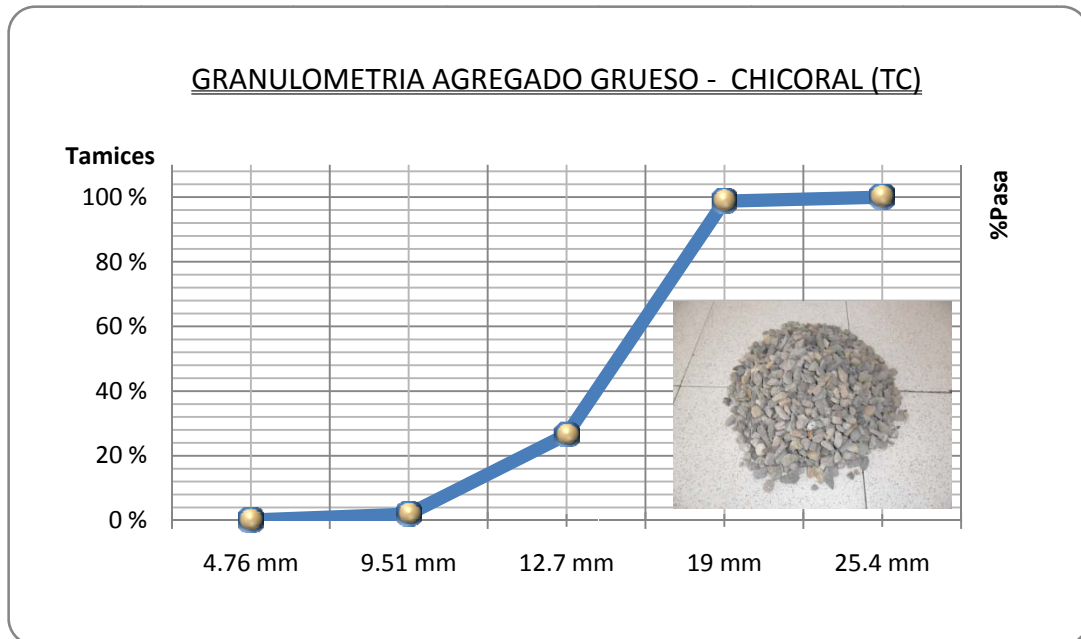
Gráfica 2. Granulometría del agregado grueso Cundinamarca – Tabio

3.1.2 Agregados del Departamento del Tolima (TC).

Los agregados obtenidos en el Departamento del Tolima (TC), son procedentes de minas localizadas sobre el río Coello en la ciudad de Chicoral. El material es de origen geológico ígneo con pequeñas betas de origen metamórfico, esto según estudios realizados por la empresa propietaria de la cantera de donde se extrae este material. Las propiedades físicas de los materiales del Departamento del Tolima se pueden observar en la Tabla 6y la 0.

Propiedades Físicas del agregado grueso TC	
Densidad (g/cm ³)	2,61 kg/dm ³
Masa unitaria suelta (g/cm ³)	1380 kg/m ³
Masa unitaria apisonada (g/cm ³)	1510 kg/m ³
Absorción	1,66 %
Tamaño máximo absoluto	19 mm
Tamaño máximo nominal	12.7 mm

Tabla 6. Propiedades físicas del agregado grueso Tolima - Chicoral



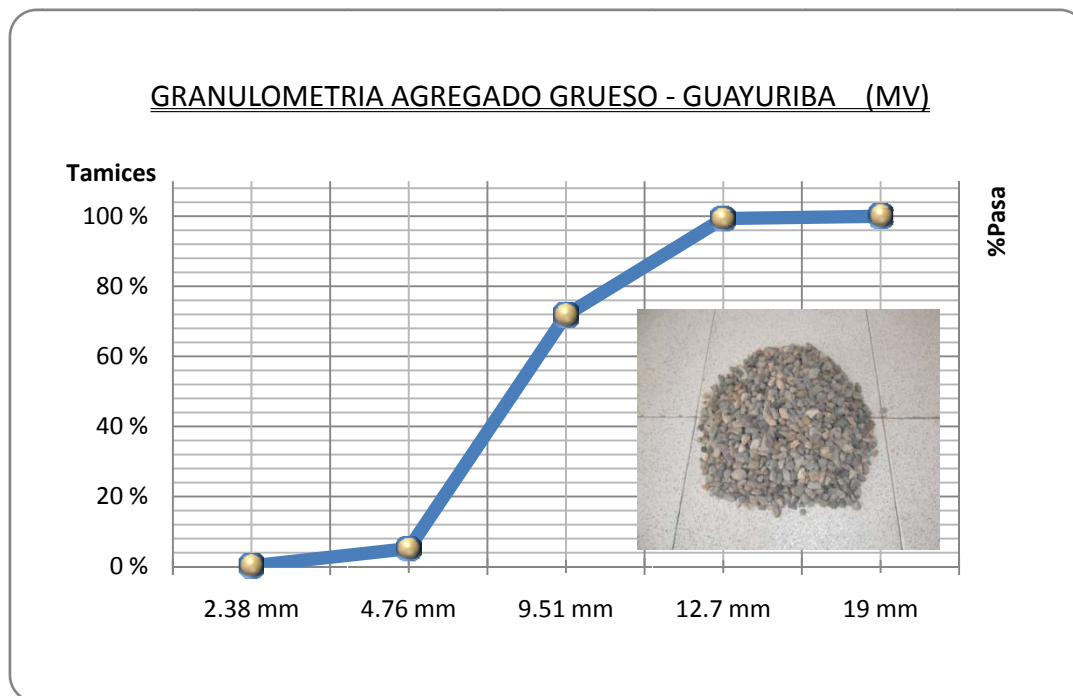
Granulometría del agregado grueso Tolima - Chicoral

3.1.3 Agregados del Departamento del Meta (MV).

Los agregados obtenidos en el Departamento del Meta (MV), corresponden a un material aluvial extraído del río Guayuriba, el cual es de origen metamórfico según estudios realizados por la empresa dueña de la cantera. En la siguiente Tabla 7, se muestran las propiedades físicas del material utilizado y en la Gráfica 3, la granulometría correspondiente.

Propiedades Físicas del agregado grueso MV	
Densidad (g/cm^3)	2,70 kg/dm^3
Masa unitaria suelta (g/cm^3)	1392 kg/dm^3
Masa unitaria apisonada (g/cm^3)	1522 kg/dm^3
Absorción	1,04 %
Tamaño máximo absoluto	19 mm
Tamaño máximo nominal	12.7 mm

Tabla 7. Propiedades físicas del agregado grueso Meta -Guayuriba



Gráfica 3. Granulometría del agregado grueso Meta -Guayuriba

3.1.4 Resumen de propiedades de los agregados gruesos usados.

A continuación se muestra en la siguiente tabla un resumen de las propiedades más representativas de los agregados usados en la presente tesis.

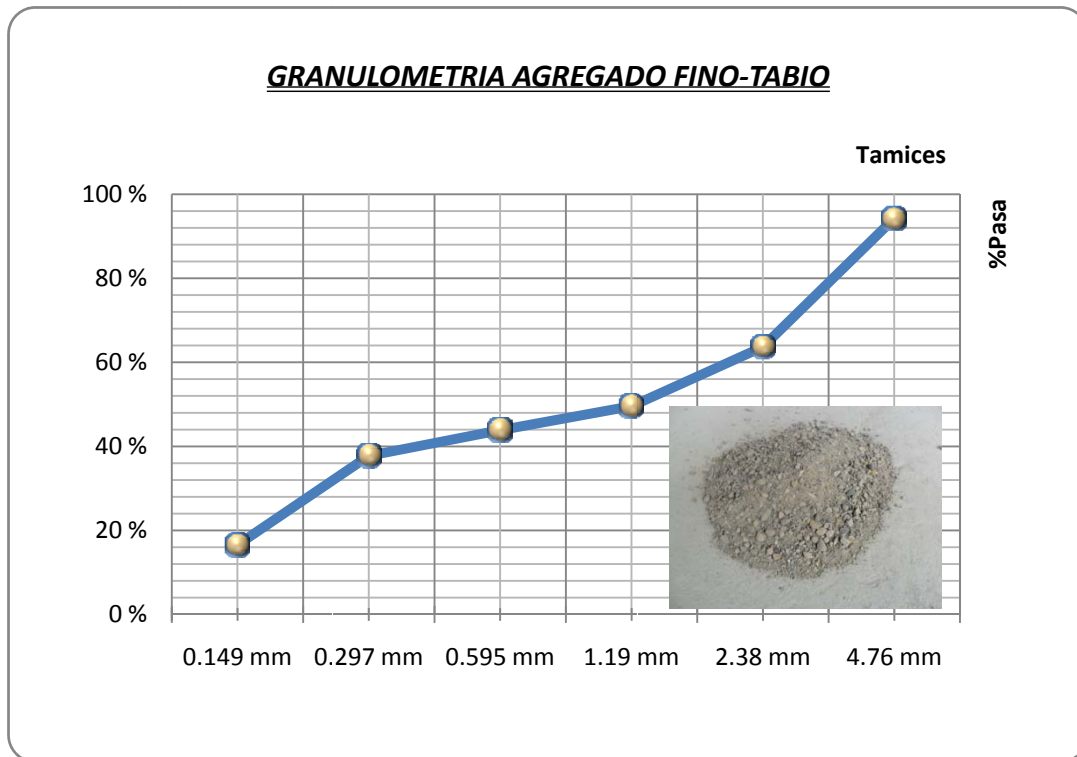
Nomenclatura	Origen (Genesis)	Fuente (Lugar)	Densidad	Adsorción
CT1	Sedimentario	Rio Tunjuelo - Cundinamarca	2.47 Kg/dm ³	1.66%
CT2	Sedimentario	Rio Tabio - Cundinamarca	2.27 Kg/dm ³	5.63%
CT	Metamorfico	Rio Cohello - Chicoral - Tolima	2.61 Kg/dm ³	1.66%
MV	Metamorfico	Rio Guayuriba - Meta	2.7 Kg/dm ³	1.04%

Tabla 8. Resumen de propiedades de los agregados.

Agregado fino del Departamento de Cundinamarca. El agregado fino utilizado en esta investigación proviene de las canteras de Tabio – Cundinamarca y sus características son mostradas en la Tabla 9 y en la Gráfica 4.

Propiedades Físicas del agregado Fino - Tabio - Cundinamarca	
Densidad (gr/cm ³)	2,60 kg/dm ³
Densidad aparente sss (gr/cm ³)	2,40 kg/dm ³
Masa unitaria suelta (gr/cm ³)	1750,42 kg/dm ³
Masa unitaria apisonada (gr/cm ³)	1854,10 kg/dm ³
Absorción	3,31 %
Módulo de finura	2,94
Materia Orgánica	2

Tabla 9. Propiedades físicas del agregado fino Tabio-Cundinamarca



Gráfica 4. Granulometría del agregado fino Tabio-Cundinamarca

3.2 Cemento.

Con el fin de utilizar los materiales de fácil consecución en el sector de la construcción, en este proyecto se escogió el cemento Argos tipo I de uso general, al cual se le realizaron el análisis de sus características físicas las cuales se describen a continuación en la Tabla 10 y Tabla 11.

Propiedades físicas del cemento	
Densidad (g/cm^3)	2.70 kg/dm^3
Finura	4414 cm^2/g
Consistencia	25.5%, 10.5mm
Fraguado Inicial (horas – minutos)	2h 45 min
Fraguado Final (horas – minutos)	4h 45min
Resistencia a compresión 3 días (MPa)	13 MPa
Resistencia a compresión 7 días (MPa)	20 MPa
Resistencia a compresión 28 días (MPa)	29 MPa

Tabla 10. Propiedades físicas del cemento de uso general.

Parámetros químicos cemento de uso general	
Óxido de magnesio, MgO	6.00
Trióxido de azufre, SO	3.50

Tabla 11. Parámetros químicos del cemento de uso general, suministrados por el fabricante

De igual forma en la Fotografía 10, se muestra, el cemento gris usado para producir Concreto de Alto Desempeño.



Fotografía 10. Cementos argos tipo I de uso normal

3.3 Microsilice.

La microsilice utilizada en este proyecto de investigación fue Eucon MSA 100P de la empresa Euclid Chemical Toxement, producto que es distribuido en todas las sucursales de la empresa en todo el país. Al realizar el análisis de densidad de la microsilice se obtuvo un valor igual a 2.11 gr/cm^3 . La apariencia del material se puede observar en la Fotografía 11.



Fotografía 11. Microsilice Eucon MSA 100P

La muestra de microsilice fue sometida a ensayos de difracción de rayos X (DFX), con el fin de conocer la composición química de l material usado en este proyecto.

Para realizar dicho análisis se suministro muestras solidas en polvo al Laboratorio de Flourescencia de rayos X del Centro de Equipos Interfacultades (CEIF), en donde las muestras fueron homogenizadas por agitación y se prepararon en forma de perla fundida con relación muestra: fundente, de 1:10. Como fundente se utilizó mezcla de tetraborato de litio y metaborato de litio; como antiadherente se añadió yoduro de litio. De este modo se obtuvieron dos discos de vidrio de 31mm de diámetro que posteriormente fueron medidos en las aplicaciones cuantitativas CEMENTPER-07 y SEDI-AI-2007 respectivamente. Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagisPro PW-2440 Philips, equipado con un tubo de rodio y potencia máxima de 4 kW. El equipo tiene una sensibilidad de 200 ppm (0.02%) en la detección de elementos pesados metálicos en análisis semicuantitativos. Los resultados obtenidos en forma de compuestos y de elementos, se muestran en la Tabla 12.

XRF DE LA MICROSILICE	
Compuesto y/o elemento	Porcentaje
Si ₂ O	84.288%
Na ₂ O	1.442%
CaO	1.195%
K ₂ O	0.658%
MgO	0.440%
Cl	0.413%
Al ₂ O ₃	0.188%
P ₂ O ₅	0.120%
Fe ₂ O ₃	0.111%
MnO	0.040%
TiO ₂	0.010%
Zn	556 ppm
S	233 ppm
Sr	60 ppm
Br	50 ppm
Ba	32 ppm
Ni	25 ppm
Cu	24 ppm
Pb	19 ppm
Rb	14 ppm

Tabla 12. Composición química de la microsilice por DFX.

3.4 Aditivos.

El aditivo químico utilizado fue *Plastol 6000* de la empresa *Euclid Chemical Toxement*, el cual presenta una densidad de 1.06 kg/l. Este es un reductor de agua de alto rango, de la más reciente tecnología a base de policarboxilatos, formulado específicamente para aumentar drásticamente la manejabilidad de un concreto. La Fotografía 12, muestra la apariencia del aditivo químico utilizado.

INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE ADICIÓN DE LA MICROSILICE Y DEL TIPO DE CURADO
EN LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO EN EL CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO



Fotografía 12. Aditivo Plastol 6000

3.5 Gel de transición de ondas de VPU.

Para garantizar el paso continuo de la onda ultrasónica entre los palpadores del equipo y la muestra de concreto se utilizó un gel para transmisión de la onda ultrasónica de la empresa Biogel. Ver Fotografía 13.



Fotografía 13. Gel para la realización del VPU.

3.6 Nitrato de plata (Ag NO_3), Cloruro de Sodio (NaCl) y Hidroxido de Sodio (NaOH).

Como materiales químicos se utilizaron elementos de calidad reactivo con un alto grado de pureza. Se utilizaron productos de la empresa Merck, los cuales se utilizaron para realizar los ensayos de CColorimetría, RCPT y Resistividad. En la Fotografía 14, se observa la presentación del nitrato de plata.



Fotografía 14. Productos químicos.

CAPITULO IV

4 Resultados y análisis de resultado.

En este capítulo se muestran los resultados de todos los ensayos ejecutados en esta investigación:

4.1 Desarrollo y optimización del Concreto de Alto Desempeño.

Con el fin de determinar la composición “óptima” de los materiales que deben constituir el HPC, se realizaron ensayos de resistencia a compresión y modulo de elasticidad a cilindros de concreto con diferentes tipos de agregados de distintas procedencias(Tunjuelo, Tabio, Chicoral y Guayuriba)A continuación se muestran los resultados de las dos características mecánicas más importantes del concreto, como material estructural (resistencia y módulo de Young).

4.1.1 Resistencia a compresión del Concreto de Alto Desempeño.

Los resultados de resistencia a compresión del HPC, fueron obtenidos a partir de ensayos de prueba y error, hasta conseguir el diseño “idóneo” para la resistencia a compresión del concreto requerida según los objetivos planteados por el autor. Para lograr esto se realizaron 16 mezclas de pruebas, con diferentes cantidades de superplastificante, contenidos de cementante y relacioness A/Cm, hasta que se encontraron las cantidades finales a utilizar, en cada uno materiales.; El proceso de consecución de las dosificaciones se inició con una relación agua/cementante de 0.38, con 400 kg/m³ de cemento, 10% del peso del cemento para la microsilice y 3% del peso del cemento para el superplastificante, obteniéndose una mezcla trabajable, pero poco resistente (35 MPa a los 28 días). A partir de esta dosificación se fue modificando la relación agua/cementante y la cantidad de cemento hasta llegar a utilizar en las siguientes mezclas, 500 kg/m³de cemento. Teniendo ya establecidas las cantidades de cemento y microsilice, se comenzó a determinar la cantidad de superplastificante a utilizarse, la cual comenzó con 3% , 1%, 0.8%, 1.6%, 1.2%, hasta llegar a 1.8%, cantidad que se escogió para realizar las dosificaciones de las mezclas finales utilizadas en este proyecto. Todos los cambios en el superplastificante se dieron debido a que se tenía una alta cantidad de microsilice, acompañada de bajas relaciones agua/cementante , lo queoriginaban una baja trabajabilidad de las mezclas. Los agregados siempre estuvieron en una relación entre el agregado grueso y agregado fino igual a 1.5.

Al final del proceso de pre-dosificación, se obtuvieron las dosificaciones finales para tres relaciones agua/cemento (0.36, 0.32 y 0.28) y para 4 tipos de agregado grueso diferentes (Cundinamarca-Tunjuelo, Cundinamarca-Tabio, Tolima- Chicoral y Meta-Villavicencio).

A continuación en la Tabla 13 se muestran de dosificaciones para cada uno de los agregados con sus diferentes componentes de mezcla.

DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS DE HPC FASE I												
Componentes	Relación A/C = 0.28				Relación A/C = 0.32				Relación A/C = 0.36			
	CT1	CT2	TC	MV	CT1	CT2	TC	MV	CT1	CT2	TC	MV
Agua	135 L	183 L	136 L	132 L	168 L	201 L	156 L	169 L	188 L	220 L	176 L	173 L
Cemento	500 Kg	500 Kg	500 Kg	500 Kg	500 Kg	500 Kg	500 Kg	500 Kg	500 Kg	500 Kg	500 Kg	500 Kg
Microsilice	50 Kg	50 Kg	50 Kg	50 Kg	50 Kg	50 Kg	50 Kg	50 Kg	50 Kg	50 Kg	50 Kg	50 Kg
Superplastificante	8 L	8 L	8 L	8 L	8 L	8 L	8 L	8 L	8 L	8 L	8 L	8 L
Aire atrapado	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Agregado grueso	903 Kg	830 Kg	955 Kg	966 Kg	874 Kg	803 Kg	923 Kg	934 Kg	844 Kg	776 Kg	892 Kg	902 Kg
Agregado fino	605 Kg	605 Kg	605 Kg	605 Kg	585 Kg	585 Kg	585 Kg	585 Kg	565 Kg	565 Kg	565 Kg	565 Kg

Tabla 13. Dosificación de mezclas iniciales del HPC.

Siendo CT1 el agregado de Tunjuelo, CT2 el agregado de Tabio, TC el agregado de Chicoral y MV el agregados de Guayuriba.

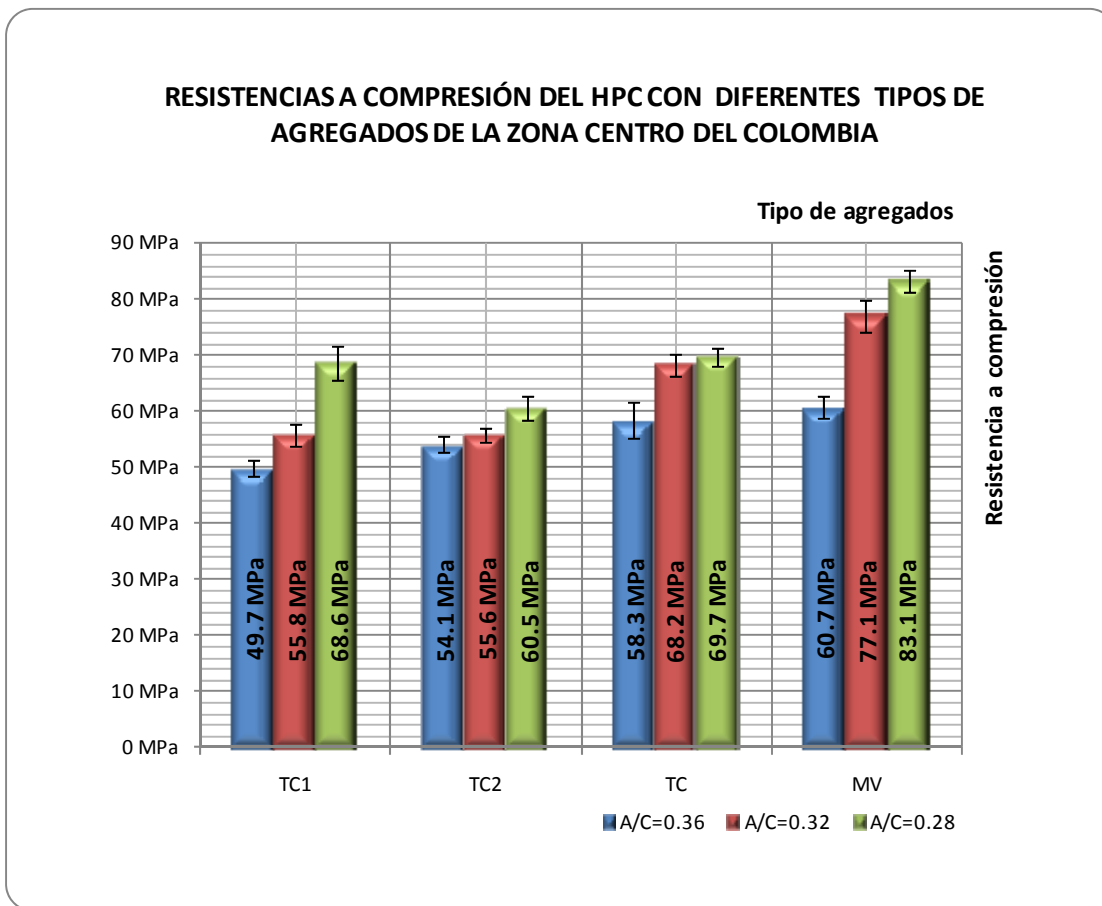
A partir de las proporciones dadas, se fundieron 128 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, a las cuales se les midió en estado fresco el asentamiento y en estado endurecido la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad. 24 horas después de fundidas, las probetas fueron desencofradas y curadas en agua durante 28 días, momento en el cual fueron ensayadas. Para cada mezcla se ensayaron 10 replicas y únicamente para ocho muestras de la dosificación con relación A/Cm = 0.28 y agregado MV se realizaron ensayos adicionales de resistencia a compresión y módulo de elasticidad a los 90 y 120 días de edad.

Los asentamientos promedios del concreto para cada una de los agregados, con cada una de las relaciones A/Cte, se muestran en la siguiente Tabla 14.

Asentamiento de mezclas HPC											
CT1			CT2			TC			MV		
0.36	0.32	0.28	0.36	0.32	0.28	0.36	0.32	0.28	0.36	0.32	0.28
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.27	0.22	0.15	0.22	0.2	0.05	0.19	0.15	0.05	0.27	0.22	0.19

Tabla 14. Asentamientos del HPC inicial.

A continuación, en la Gráfica 5, se muestran los resultados promedios de resistencia a compresión del HPC, a los 28 días de edad, obtenidos de 10 cilindros ensayados para cada uno de los agregados estudiados y para las tres relaciones A/C analizadas. De igual forma se muestra mediante barras de error la desviación estándar de los ensayos realizados.



Gráfica 5. Resistencia a compresión promedio del HPC con diferentes agregados.

En la grafica anterior, se puede observar la influencia del tipo de agregado en el concreto de alto desempeño, tal y como lo expresa la literatura al plantear que la resistencia del agregado, es un factor importante en la resistencia final del Concreto de Alto Desempeño. Esto , debido a que en este tipo de concretos la falla se presenta en este componente, por la gran resistencia y densidad de la matriz cementicia.

Lo anterior se puede observar con la Fotografía 15, en la cual es visible que la fisura atraviesa totalmente el agregado grueso, indicando esto el lugar por donde generalmente se presenta la falla en el HPC.

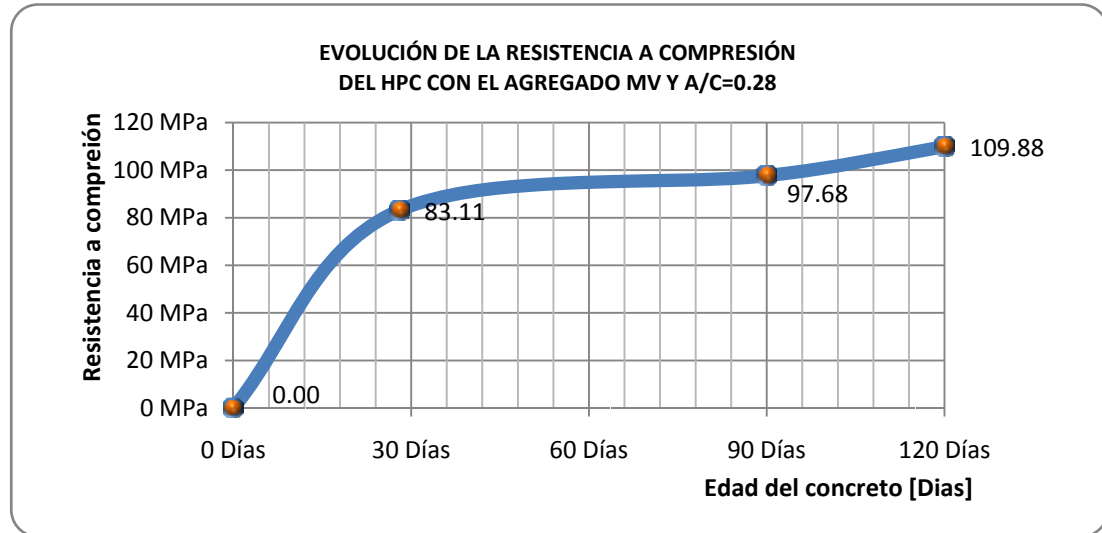


Fotografía 15. Fisura del concreto de alto desempeño

La relación A/C en todos los tipos de concretos analizados influyó en las resistencias a compresión, cumpliendo la premisa fundamental de la tecnología del concreto que plantea la disminución de la resistencia a compresión, al generar un aumento de la relación A/C. En la Gráfica 5, se puede observar, que en todos los tipos de agregados existe una clara diferencia entre las relaciones A/C = 0.28 y A/C=0.36 indicando reducciones del 28%, 11%, 16% y 27% para los agregados CT1, CT2, TC y MV respectivamente.

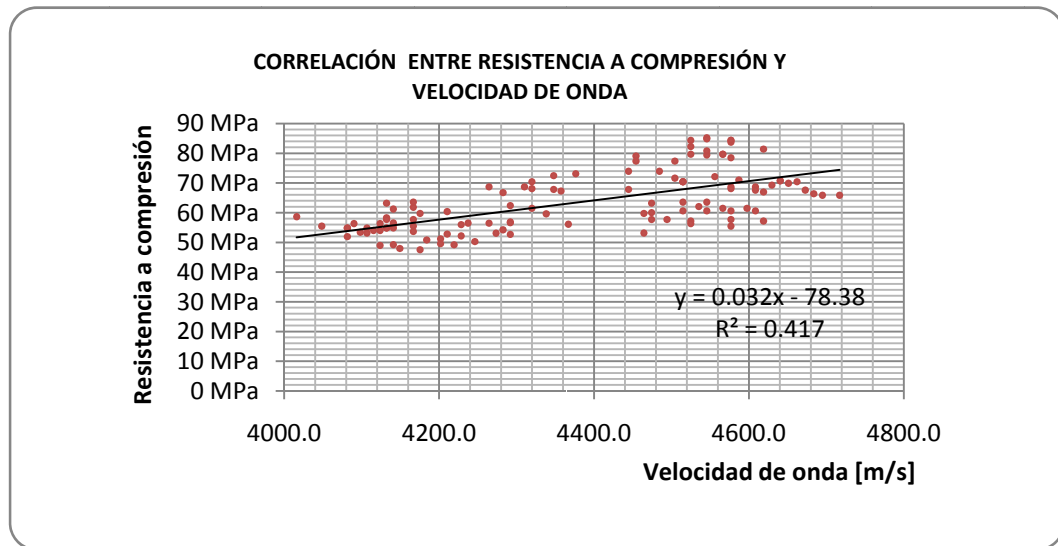
La Gráfica 5, mostró de igual forma, que el agregado de mejor comportamiento en resistencia a compresión, es el agregado procedente del Departamento del Meta del río Guayuriba, de acuerdo con esto se decidió estudiar con más detalle el comportamiento del HPC con este tipo de agregado y relación A/C=0.28 a 90 días y 120 días, con el fin de establecer la evolución de las resistencias a edades tardías. Este comportamiento se puede observar en la Gráfica 6, la cual muestra que hubo un aumento del 18% entre la edad de 28 días y los 90 días y del 12% entre 90 y 120 días de edad y

una evolución entre 28 días y 120 días del 32%. Lo anterior se genera por la hidratación tardía de la microsilice a edades avanzadas del concreto en concretos curados.



Gráfica 6. Evolución de la resistencia a compresión del Concreto de Alto Desempeño.

A partir de los cilindros elaborados para cada uno de los materiales y diferentes relaciones A/C estudiadas, se planteó el estudio de la correlación de la resistencia a la compresión vs a velocidad de pulso obtenida según los lineamientos del ASTM C597-97. Los resultados obtenidos se muestran en la Gráfica 7.

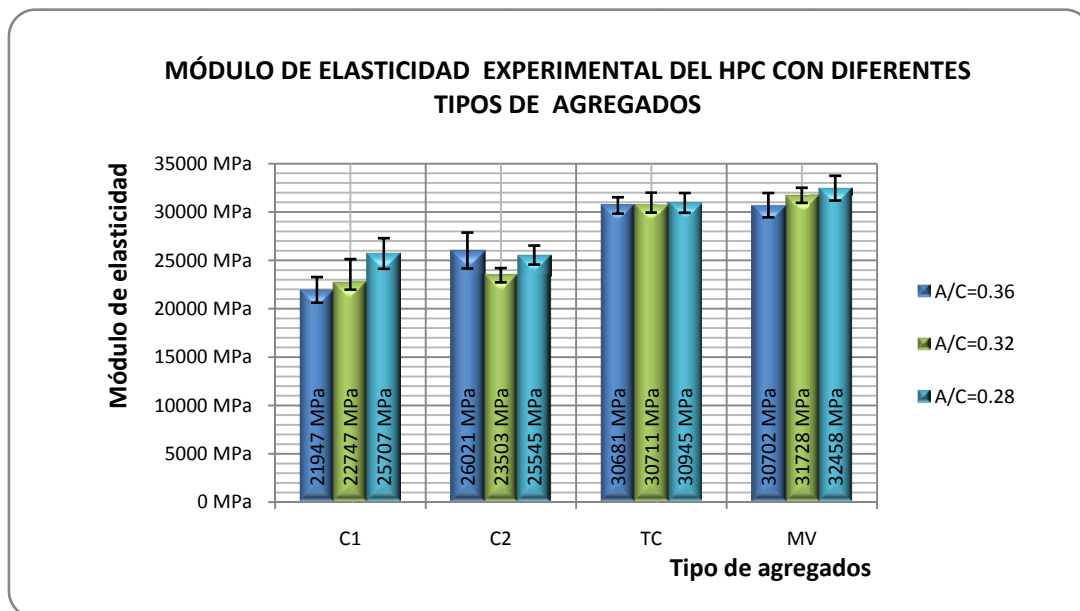


Gráfica 7. Correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad de onda.

La grafica anterior muestra una baja correlación entre la resistencia a compresión de los concretos de alto desempeño y la velocidad de pulso (V), la cual se explica por la alta variabilidad que tiene el ensayo en el momento de su aplicación, es decir, factores como la posición de los palpadores, la diferencia entre los tipos de agregados y la diferencia entre las relaciones A/C, puede explicar esta baja correlación entre estos dos factores. De igual forma se puede afirmar que si bien es cierto existe una tendencia entre dichas variables, la correlación entre ellas no es clara y por lo tanto no se puede establecer la velocidad de pulso como un índice para encontrar la resistencia a la compresión.

4.1.2 Módulo de elasticidad del Concreto de Alto Desempeño.

A continuación en la Gráfica 8, se muestran los resultados promedios, de 10 ensayos de módulos de elasticidad realizados a los cuatro tipos de agregados estudiados, con las tres relaciones A/C propuestas. Igualmente se muestra mediante barras de error la desviación estándar de los ensayos realizados.



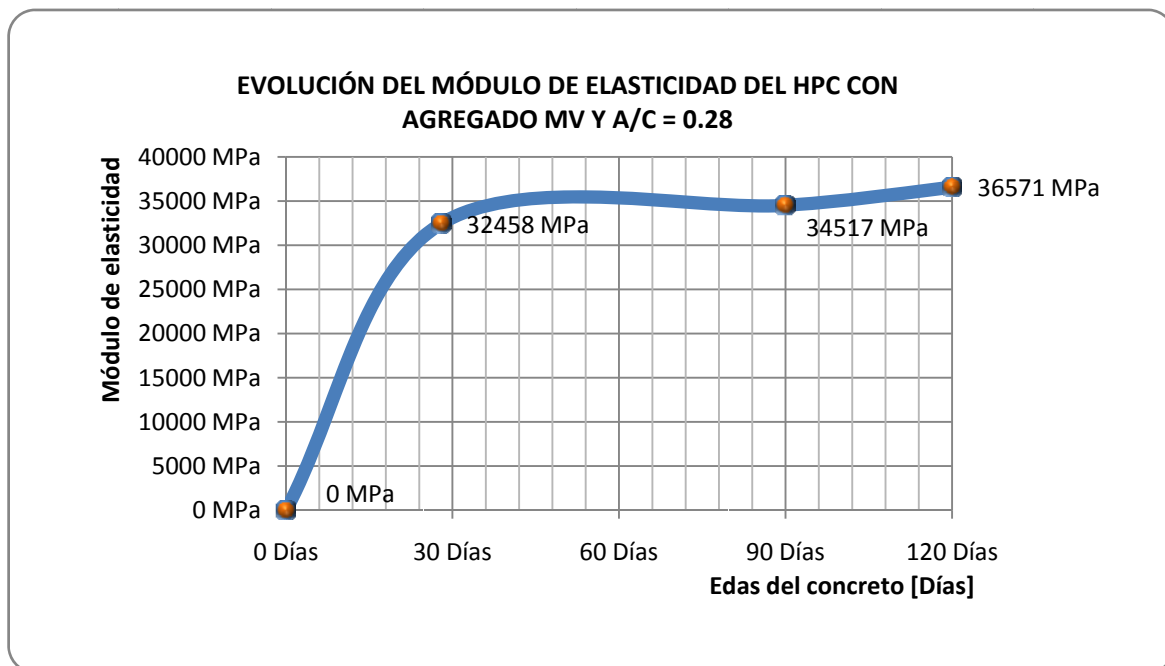
Gráfica 8. Módulo de elasticidad del HPC con diferentes agregados y distintas relaciones A/C.

La grafica anterior evidencia la influencia del tipo de agregado en el módulo de elasticidad del HPC. Se observa que los agregados de origen sedimentario (CT1 y CT2) muestran menor módulo de elasticidad del concreto en comparación a los agregados metamórficos e ígneos (TC y MV), esto se

explica por un posible menor módulo de elasticidad de los agregados sedimentarios con respecto a los módulos de elasticidad de los agregados metamórficos y ígneos.

De igual manera, es evidente, que el módulo aumenta a medida que la relación A/C disminuye, esto se debe, a la alta densidad y resistencia de la matriz cementicia, lo que produce una baja porosidad en el concreto, originando de esta manera mayor módulo de elasticidad de la pasta, reduciendo así la diferencia entre este módulo y el del agregado, generando una comportamiento monolítico del hormigón.(Neville, 1997). Esto no se cumple en el agregado de Tabio CT2; sin embargo no se presentó mayor diferencia en el módulo al compararlo con el agregado CT1 procedente del Tunjuelo.

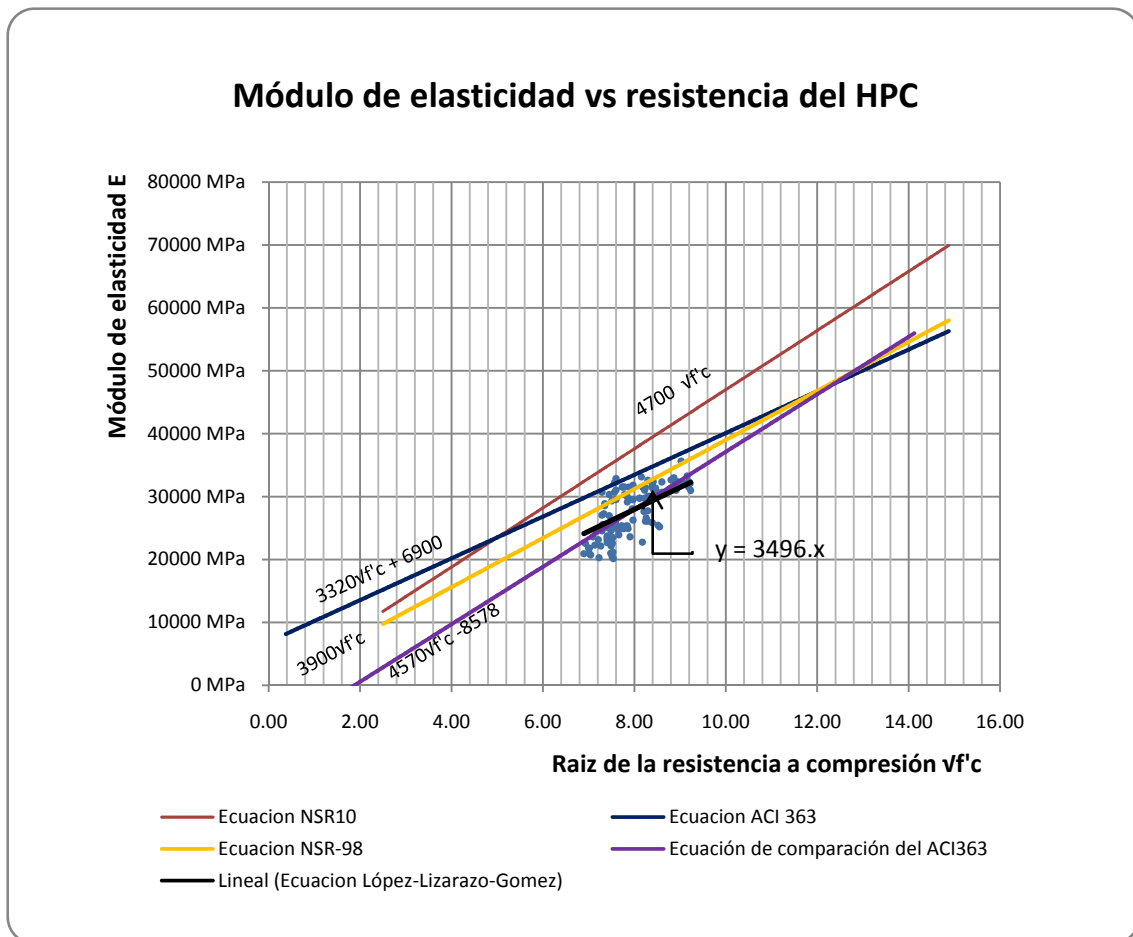
Al escoger el concreto generado con agregado del Meta por las altas resistencia obtenidas, se decidió evaluar la evolución del modulo hasta los 90 y 120 días obteniéndose la Gráfica 9.



Gráfica 9. Evolución del modulo de elasticidad a edades tardías.

En la gráfica anterior se puede observar un aumento del 6% en el módulo de elasticidad de 28 días a 90 días y del 6 % de 90 días a 120 días de edad, siguiendo la misma tendencia de los resultados de resistencia a compresión, los cuales mostraron la misma evolución positiva del módulo de elasticidad debido al aumento de la resistencia por la continua hidratación de la microsilice.

Al estudiar la gran cantidad de datos experimentales obtenidos de módulo de elasticidad, se planteó la Gráfica 10, la cual muestra la diferencia entre las ecuaciones suministradas por las distintas normativas para determinar el módulo de elasticidad con fines de análisis y diseño de estructuras.



Gráfica 10. Correlación entre el módulo de elasticidad y la raíz de la resistencia a compresión.

En la gráfica anterior se plantean las ecuaciones de la Reglamento Colombiano de Construcción sismo resistente NSR-98 y NSR-10, para determinar el módulo de elasticidad del concreto de peso normal, la cuales tienen las siguientes expresiones $E_c = 3900\sqrt{f}'c$ y $E_c = 4700\sqrt{f}'c$ respectivamente; de igual manera se exponen la ecuación planteada por el comité ACI 363R que expresa la forma para determinar el módulo de elasticidad con la siguiente ecuación $E = 3320\sqrt{f}'c + 6900$.

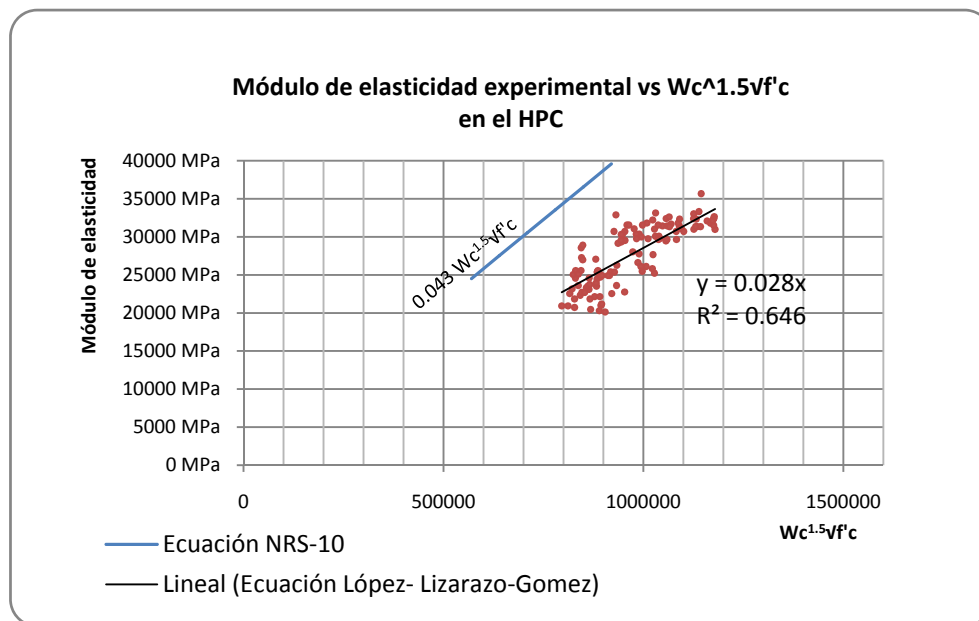
A partir de las ecuaciones anteriores se plantean las diferencias entre las ecuaciones normativas y las ecuaciones obtenidas en este estudio. Como resultado de esta investigación, se proponen las siguientes expresiones:

$$E_c = 4570\sqrt{f'_c} - 8578 \text{ con } r^2 = 0.502 \quad (19)$$

$$E_c = 3496\sqrt{f'_c} \text{ con } r^2 = 0.474 \quad (20)$$

Cabe anotar que la ecuaciones planteadas por esta investigación fueron realizadas con materiales propios de nuestro país, lo que genera diferencias con respecto a las ecuaciones de las normativas actuales, las cuales se generaron con materiales de mejor comportamiento mecánico, como es el caso de las normativas Norteamericanas (ACI 318-08 = NSR-10 y ACI 363R) y con materiales y procesos para concretos convencionales si se habla de la normativa nacional (NSR-98).

La NSR-10 plantea una ecuación en función del peso unitario del concreto y de la resistencia a compresión, esta expresión es planteada de la siguiente manera $E_c = 0.043W_c^{1.5}\sqrt{f'_c}$ y se ve representada en la siguiente Gráfica 11.



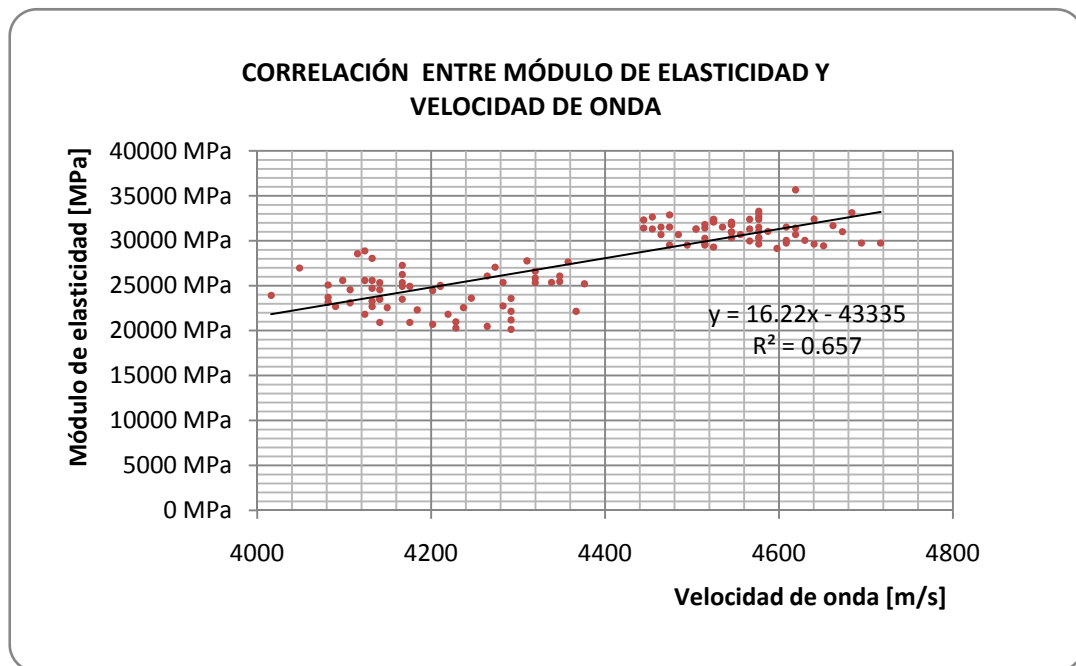
Gráfica 11. Correlación entre el E y $W_c^{1.5}\sqrt{f'_c}$ en el HPC.

De igual manera en la gráfica anterior se observa la ecuación obtenida en esta investigación, la cual obedece a la siguiente expresión $E_c = 0.028W_c^{1.5}\sqrt{f'_c}$, con $r^2 = 0.64$.

En la Gráfica 11, se observa un clara diferencia entre la normativa (ACI318-08 = NSR-10) y la formulación de esta investigación, esto debido a la gran diferencia entre los componentes y procesos, con los cuales se produjeron las ecuaciones de las normativas, y las de nuestro estudio. Es decir que los agregados y las resistencias obtenidas en los estudios que generaron las ecuaciones

de las normativas, son muy diferentes a los agregados y los resultados finales de resistencia que se obtienen en nuestro país para hormigones como el HPC.

Además de haberse realizado la comparación entre las distintas ecuaciones de módulo de elasticidad, también se produjo, un análisis de la correlación entre el módulo de elasticidad y la velocidad de pulso tal y como se muestra en la Gráfica 12.



Gráfica 12. Correlación entre módulo de elasticidad y velocidad de onda.

En la gráfica anterior, se evidencia una correlación entre el módulo de elasticidad y la velocidad de pulso $r^2 = 0.657$, esta correlación reafirma una posible tendencia al uso de la velocidad de pulso en el cálculo del módulo de elasticidad del concreto.

4.2 Propiedades mecánicas del HPC optimizado.

Teniendo en cuenta los resultados de la caracterización inicial del HPC de la fase I, se decidió escoger el agregado del río Guayuriba y la relación A/C = 0.32, para continuar con la evaluación de la durabilidad de este tipo de concreto ante el ion cloruro, objeto principal de este estudio.

A partir de la decisión tomada acerca del agregado y la relación agua cemento, se siguió utilizando la misma marca de cemento y microsilice, generándose un cambio en el plastificante (Sikaviscocrete a Plastol 6000). A continuación, en la siguiente tabla se muestra la dosificación de mezclas para cada uno de los porcentajes de microsilice investigados en esta tesis.

DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS HPC FASE II				
Componentes	Mezcla por porcentaje de adición de microsilice			
	CT1	CT2	TC	MV
Agua	175 L	183 L	190 L	176 L
Cemento	500 Kg	500 Kg	500 Kg	500 Kg
Microsilice	0 Kg	25 Kg	50 Kg	100 Kg
Superplastificante	6 L	6 L	6 L	6 L
Aire atrapado	50	50	50	50
Agregado grueso	970 Kg	939 Kg	908 Kg	892 Kg
Agregado fino	590 Kg	571 Kg	552 Kg	543 Kg

Tabla 15. Dosificación de mezclas del HPC, para cada uno de los porcentajes estudiados.

4.2.1 Resistencia a compresión del HPC con diferentes porcentajes de microsilíce.

Con el fin de conocer cuál es la influencia de la microsilice como adición en el Concreto de Alto Desempeño ante el ataque exógeno de los cloruros, se establecieron porcentajes de adición de 0%, 5%, 10% y 15% de microsilice, para establecer el comportamiento a diferentes edades (7, 28, 90 y 300 días) del hormigón con dos diferentes métodos de curado (Curado por Inmersión y Curado al Aire).

En las Gráfica 13, Gráfica 14, Gráfica 15 y Gráfica 16, mostradas a continuación se puede observar la evolución de las resistencias obtenidas a diferentes edades y con diferentes tipos de curados. Como se puede observar en la Gráfica 13, para los cilindros a los cuales no se les adicionó microsilice 0% de microsilice-curado y 0% de microsilice - no curado el comportamiento a edades tardías no muestra variaciones importantes en cuanto a la evolución de la resistencia, pero si hay variaciones de resistencias en los dos tipos de curados estudiados.

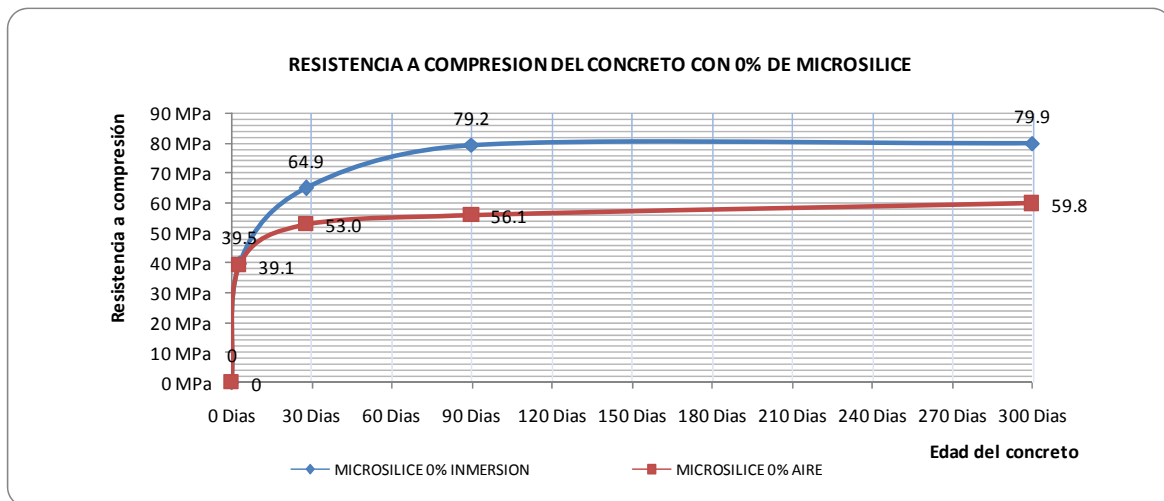
En los cilindros no curados la evolución de resistencias de 7 a 28 días, fue del 35%, de 28 a 90 días de 5.8% y de 90 a 300 días fue del 6.6%; en los cilindros curados con inmersión se dio la siguiente evolución de porcentajes de 7 a 28 días el aumento de resistencia estuvo en el 64%, de 28 a 90 días del 5.8% y de 90 a 300 días del 0.1%.

La diferencia de resistencias entre curados y no curados a los 7 días fue del 1%, estas diferencias de resistencias, se ve aumentada a los 28 días de edad en un 22% entre los dos tipos de curado, el

incremento de la diferencia entre resistencias a los 90 días es del 41% entre los dos tipos de curado y a los 300 días el resultado de resistencias entre los dos tipos de curado fue del 34%.

En la Gráfica 13, se puede observar la diferencia clara entre las resistencias a diferentes días de edad del concreto por el tipo de curado usado, esto se explica porque este tipo de curado necesita un curado riguroso por el alto contenido de cemento lo que genera calores de hidratación altos, produciendo una pérdida acelerada del agua superficial, la cual si no es restituida con celeridad puede ocasionar una reducción en el procesos de evolución de las resistencias finales.

Cabe anotar que en ninguno de los tipos de curado presentado en la gráfica anterior se observa un cambio importante en la evolución de las resistencias a edades tardías.



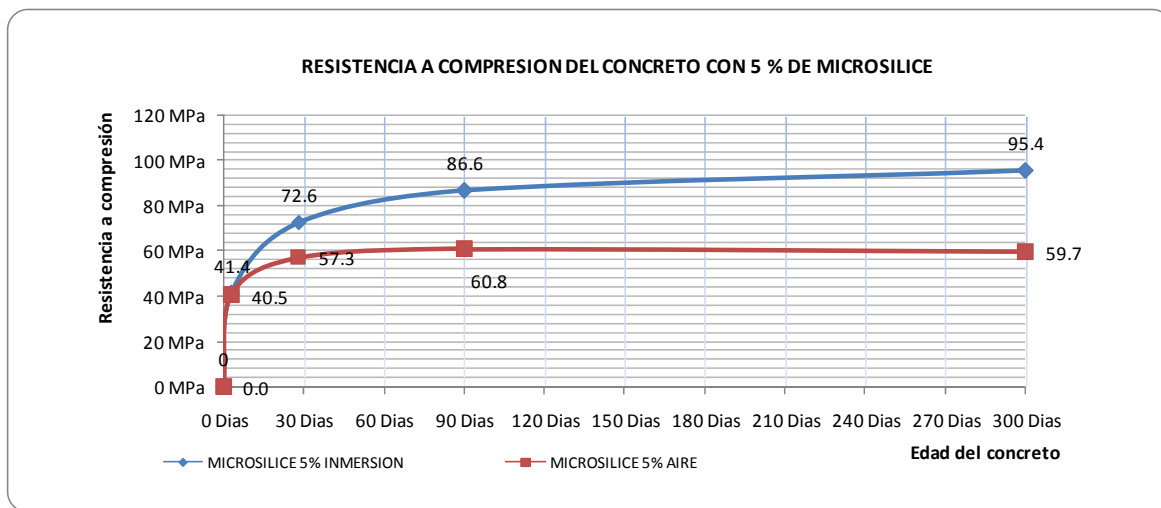
Gráfica 13. Resistencia a compresión a edades tardías con 0% de microsilice.

En la Gráfica 14 se muestran los resultados de compresión para las mezclas con un 5% de adición con respecto al peso del cemento, en dicha grafica son notables las diferencias en las resistencias entre los dos tipos de curado, es claro que a medida que se aumentan la edad del concreto, las diferencias en resistencia entre los no curados y los curados se ve incrementada en los siguientes porcentajes 1%, 28%, 42% y 60% , para cilindros de 7, 28, 90 y 300 días de edad respectivamente.

La evolución de resistencias a compresión para los cilindros curados es del 75% de incremento de f'_c para edades que están entre 7 y 28 días de edad, del 19% de aumento de resistencia para edades entre 28 y 90 días y en edades que están entre 90 y 300 días la evolución de resistencias es del 10%.

En los cilindros no curados, se puede observar que entre las edades de 7 a 28 días, 28 a 90 días y 90 a 300 días, existe una evolución del 41%, 6% y 1% respectivamente. Es claro que en los concretos sin

curar, no evidencian ninguna evolución desde los 90 días hasta edades tardías, caso contrario al concreto curado con contenido de microsilice, la cual al seguir siendo hidratada hasta estas edades tiene la posibilidad de generar pequeños aumentos de resistencia a compresión a edades tardías.

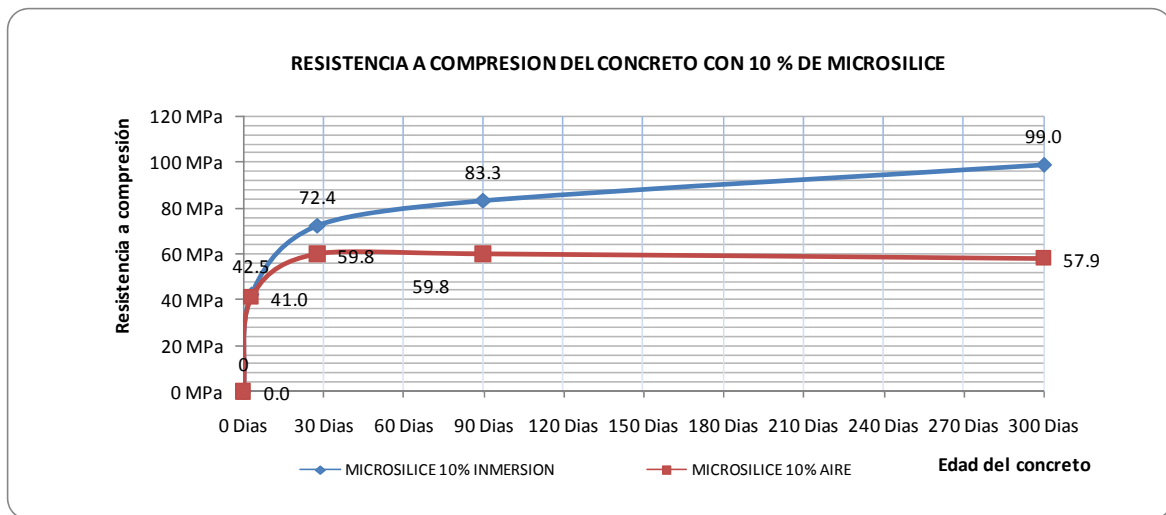


Gráfica 14. Resistencia a compresión a edades tardías con 5% de microsilice.

La Gráfica 15 muestran los resultados de compresión para las mezclas con un 10% de adición con respecto al peso del cemento. En esta gráfica se muestra que en los cilindros no curados la evolución de resistencias de 7 a 28 días, fue del 46%, de 28 a 90 días de 0% y de 90 a 300 días fue del -3 %; en los cilindros curados con inmersión se dio la siguiente evolución de porcentajes de 7 a 28 días el aumento de resistencia estuvo en el 70%, de 28 a 90 días del 15% y de 90 a 300 días del 18%.

La diferencia de resistencias entre curados y no curados a los 7 días fue del 3%, estas diferencias de resistencias, se ve aumentada a los 28 días de edad en un 21% entre los dos tipos de curado. El incremento de la diferencia entre resistencias a los 90 días es del 39% entre los dos tipos de curado y a los 300 días el resultado de resistencias entre los dos tipos de curado fue del 71%.

En la grafica anterior, se puede observar también, que a medida que se aumenta la cantidad de microsilice la diferencia entre los dos tipos de curado es más evidente a edades tardías, esto se debe que este tipo de concreto tiene mayor cantidad de microsilice la cual ha tenido mayor tiempo de hidratación en el casos de las muestras curados, caso contrario se produce en la no curadas la cuales a partir de su proceso de producción no tuvo la restitución adecuada del agua perdida por el calor de hidratación y la acción del ambiente lo que no le permitió una evolución adecuada de las resistencias tardías con respecto a las muestras curadas.



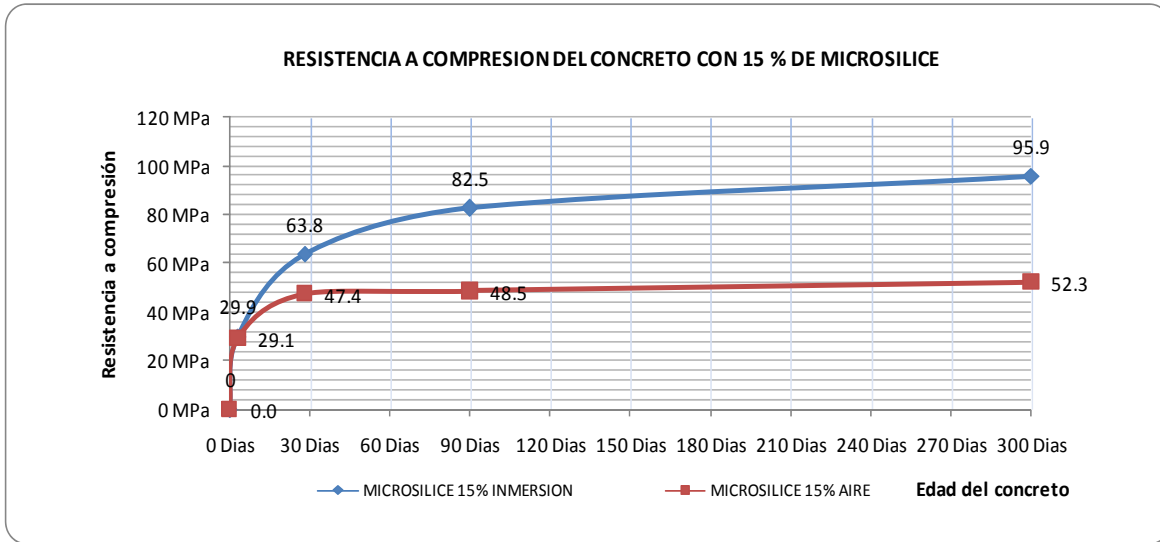
Gráfica 15. Resistencia a compresión a edades tardías con 10% de microsilice.

En la Gráfica 16 se muestran los resultados de compresión para las mezclas con un 15% de adición con respecto al peso del cemento. se observan las diferencias en las resistencias a compresión entre las probetas curadas por inmersión y al aire las diferencias entre la muestras no curadas y las curadas tiene los siguientes porcentajes del 1%, 35%, 70% y 83% para cilindros que está entre 7 y 28 días, 28 y 90 días, 90 y 300 días de edad respectivamente.

La evolución de resistencias a compresión para los cilindros curados es del 113% de incremento de $f'c$ para edades que están entre 7 y 28 días de edad, del 29% de aumento de resistencia para edades entre 28 y 90 días y en edades que están entre 90 y 300 días la evolución de resistencias es del 16%.

En los cilindros no curados, se puede observar que entre las edades de 7 a 28 días, 28 a 90 días y 90 a 300 días, existe una evolución del 63%, 2% y 7% respectivamente.

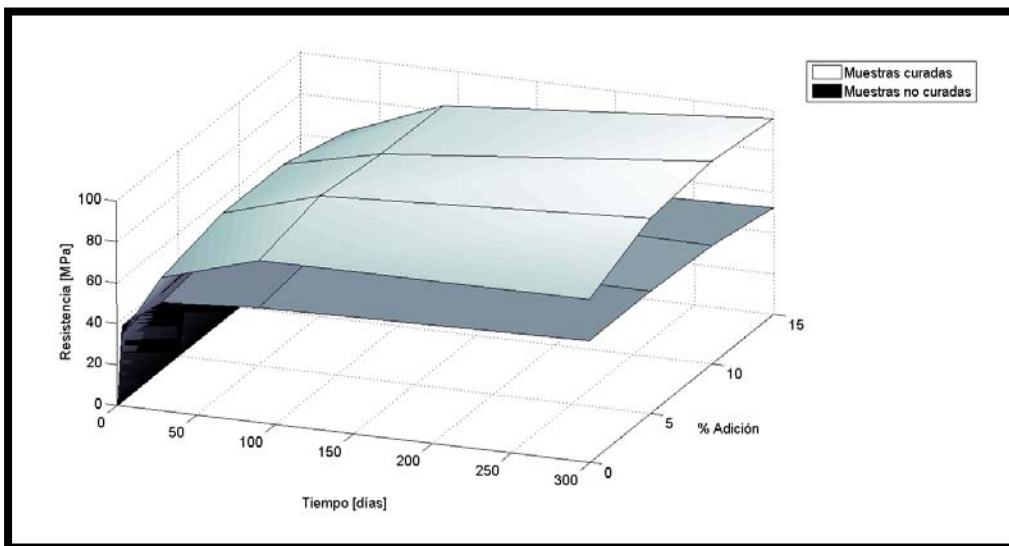
Lo anterior se explica debido a que un aumento de 10% a 15% de la microsilice requiere mayor cuidado en todos los aspectos de producción y pos-producción del concreto, es posible que el alto calor de hidratación expedido por los altos contenidos de cementante pudieran haber producido problemas en el curado.



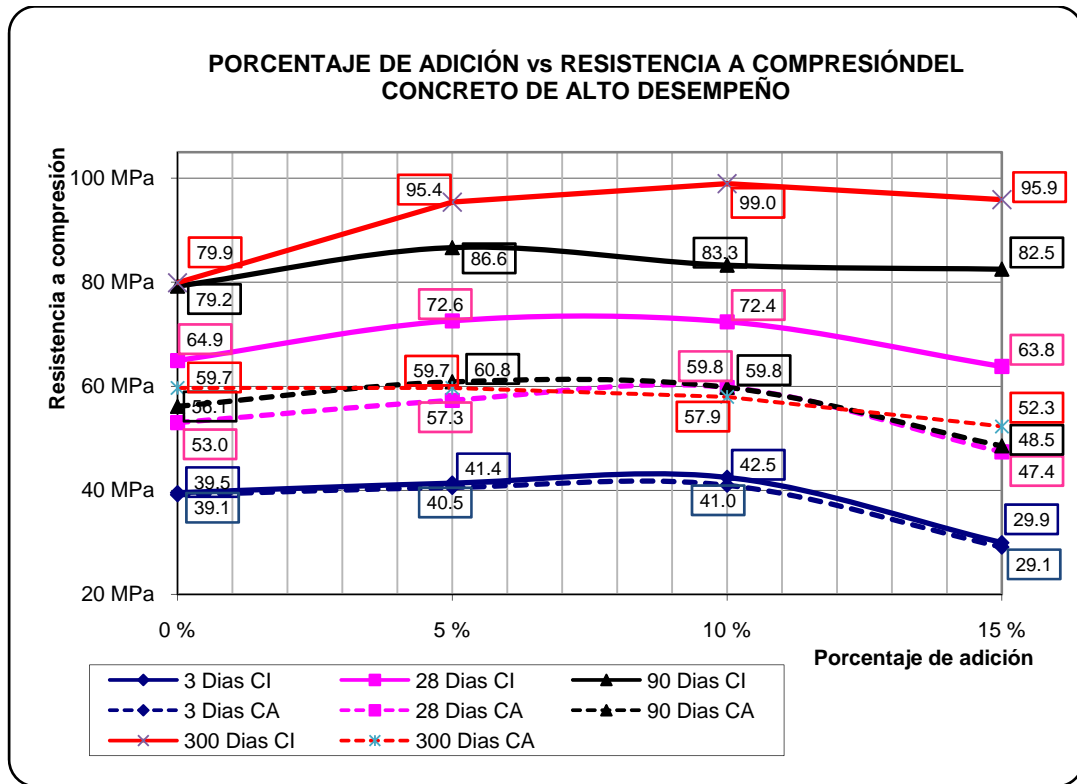
Gráfica 16. Resistencia a compresión a edades tardías con 15% de microsilice.

4.2.2 Influencia del porcentaje de adición de microsilice y del tipo de curado en la resistencia a compresión.

A continuación en la Gráfica 17 y Gráfica 18, se muestra las curvas de resistencias a compresión del HPC, con las diferentes edades estudiadas, los tipos de curado y los diferentes porcentajes de microsilice analizados.



Gráfica 17. Grafica en 3D de resistencia, % de adición y edad del HPC.

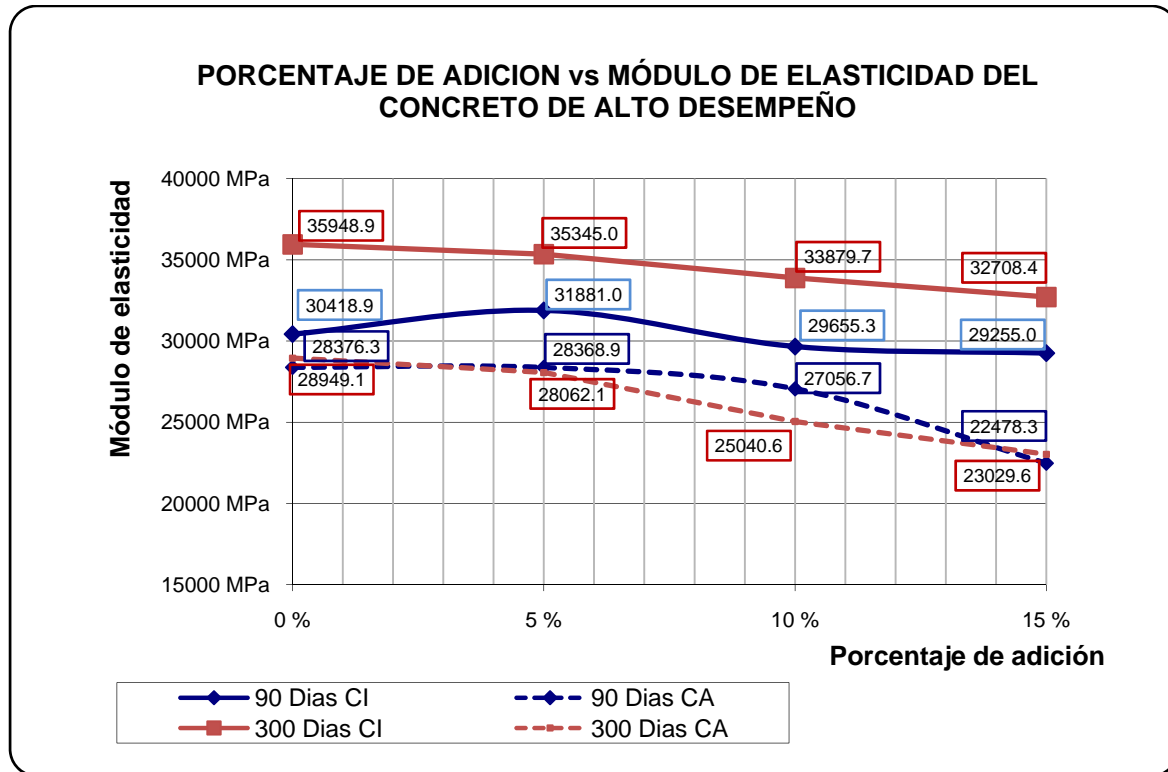


Gráfica 18. Influencia del tipo de curado y del porcentaje de microsilice, en la edad del HPC.

En la grafica anterior se puede observar que las muestras curadas por inmersión (CI) tiene una clara evolución de la resistencia a compresión en todas las muestras con diferentes porcentajes de adición de microsilice, caso contrario a las muestras curadas al aire (CA), las cuales muestra que la falta de un curado adecuado en el HPC afecta las resistencia en todos los casos de porcentajes adición de microsilice.

4.2.3 Influencia del porcentaje de adición de microsilice y del tipo de curado en el módulo de elasticidad.

La evolución del módulo de elasticidad a edades tardías, la influencia de los diferentes porcentajes de microsilice y la influencia de los tipos de curado en los módulos de elasticidad puede ser observada en la Gráfica 19.



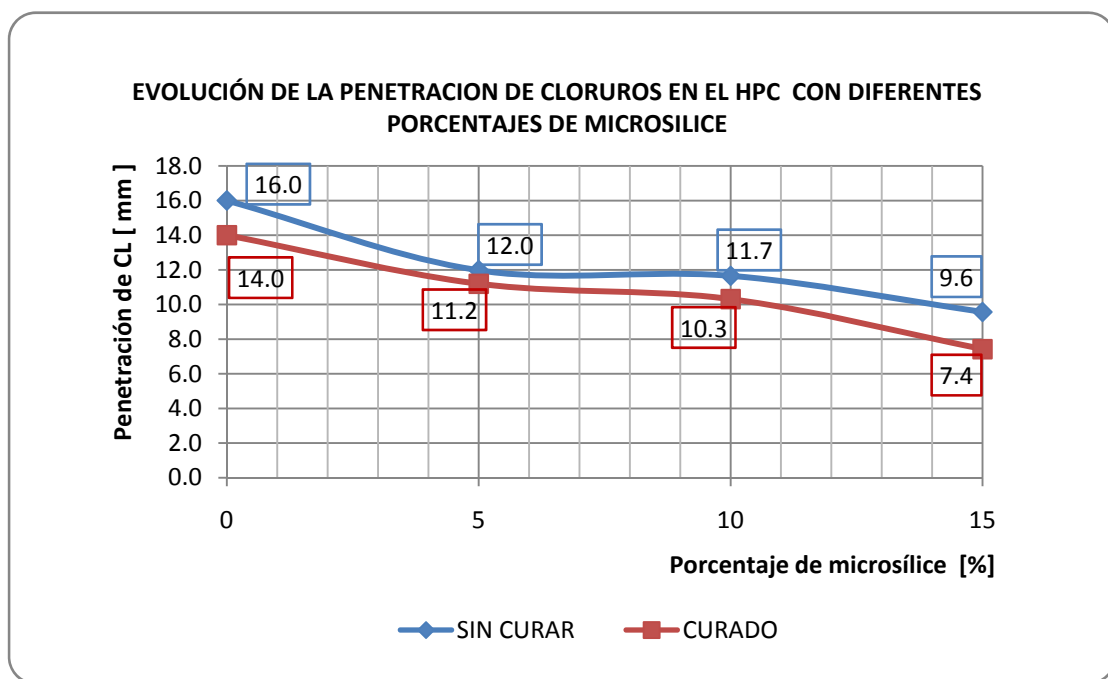
Gráfica 19. Influencia del porcentaje de microsilice y del tipo de curado en la edad del E, para Concretos de Alto Desempeño.

En la Gráfica 19, se puede observar que a medida que avance el tiempo servicio del Concreto de Alto Desempeño, su módulo a edades tardías tiende a aumentar en los cilindros curados por inmersión (CI), para todas las probetas adicionadas con microsilice. Caso contrario ocurre en los cilindros no curados (CA), donde el aumento del módulo de 90 días a 300 días no es muy claro e incluso para diferentes porcentajes de adición no se observa evolución del módulo de elasticidad con el tiempo. De igual manera, la gráfica anterior muestra una tendencia a la reducción del módulo de elasticidad a medida que se aumenta el porcentaje del microsilice en el HPC a partir del 5% de remplazo, esto para los casos de cilindros curados al aire y curados por inmersión.

4.3 Resultados de durabilidad del HPC ante el ion cloruro.

4.3.1 Penetración del ion cloruro en el HPC con diferentes tipos de curado y diferentes porcentajes de microsilíce.

A continuación se mostrarán los perfiles de penetración de cloruros en el Concreto de Alto Desempeño, el cual fue obtenido al aplicar una solución de nitrato de plata al 0.1 N, a especímenes que previamente fueron sometidos en una solución de 8% de cloruro de sodio durante 4 meses.



Gráfica 20. Influencia del porcentaje de microsilíce y del tipo de curado en la penetración del ion cloruros

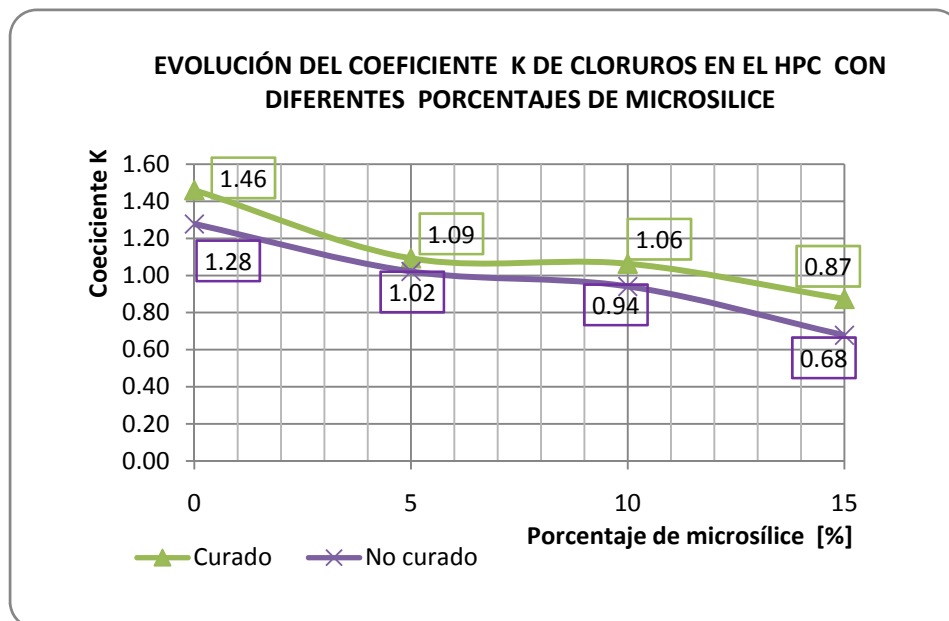
La Gráfica 20, muestra que a medida de que se aumenta el porcentaje de microsilíce, se presenta una disminución de la penetración del ion cloruro en el HPC. Esto posiblemente debido a una mayor densidad de la matriz del concreto, pero sobre todo a la capacidad de fijación u adsorción de cloruros de la microsilíce

También es claro que el curado del concreto de alto desempeño incide de manera muy importante en la penetración final del ion cloruro, Las diferencias de incremento de penetración de cloruros, entre el concreto curado y sin curar son del 14%, 6%, 12% y 23% para los porcentajes de 0%, 5%, 10% y 15% respectivamente. A diferencia de los resultados mecánicos (resistencia a compresión y módulos de Young) en los que se encontró un valor óptimo de adición alrededor del 10%, para la

penetración de cloruros los resultados muestran que en la medida que se use mas adición, mas “impermeable” se vuelve el material frente a los cloruros. Lo anterior demuestra parcialmente que en los procesos de difusión influyen adicionalmente a los parámetros físico, parámetros químicos como son la adsorción y fijación.

4.3.2 Influencia del % de adición de microsilíce y del tipo de curado en el coeficiente de penetrabilidad del HPC.

En la siguiente gráfica se presenta los coeficientes de penetrabilidad teóricos obtenidos a partir de la ecuación Penetración $(X_d) = K \sqrt{t}^c$, cuyos resultados se muestran a continuación en función de los porcentajes de adición de microsilíce.

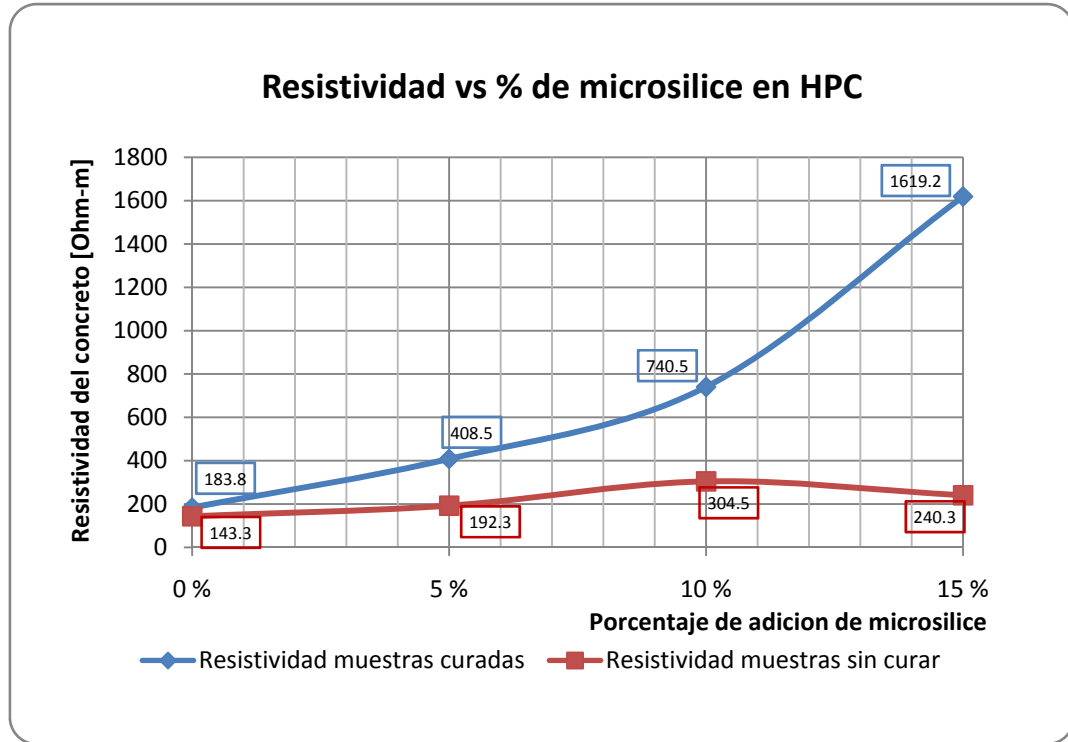


Gráfica 21. Coeficientes de penetrabilidad en el HPC con diferentes porcentajes de microsilíce y diferentes tipos de curados.

Los coeficientes K obtenidos a partir de la penetración y la raíz del tiempo se comportan de manera similar que la penetración de cloruros. Es apreciable que el tipo de curado influye de manera significativa en las tendencias de los coeficientes K, pudiéndose observar en la gráfica mayores coeficientes en los curados que en los no curados.

4.3.3 Influencia del porcentajes de microsilíce y del tipo de curado en la resistividad del concreto.

En la Gráfica 22, se puede observar la influencia del porcentaje de microsilíce y del tipo de curado, en la resistividad del concreto de alto desempeño.



Gráfica 22. Influencia del tipo de curado y del porcentaje de microsilice en la resistividad del Concreto de Alto Desempeño.

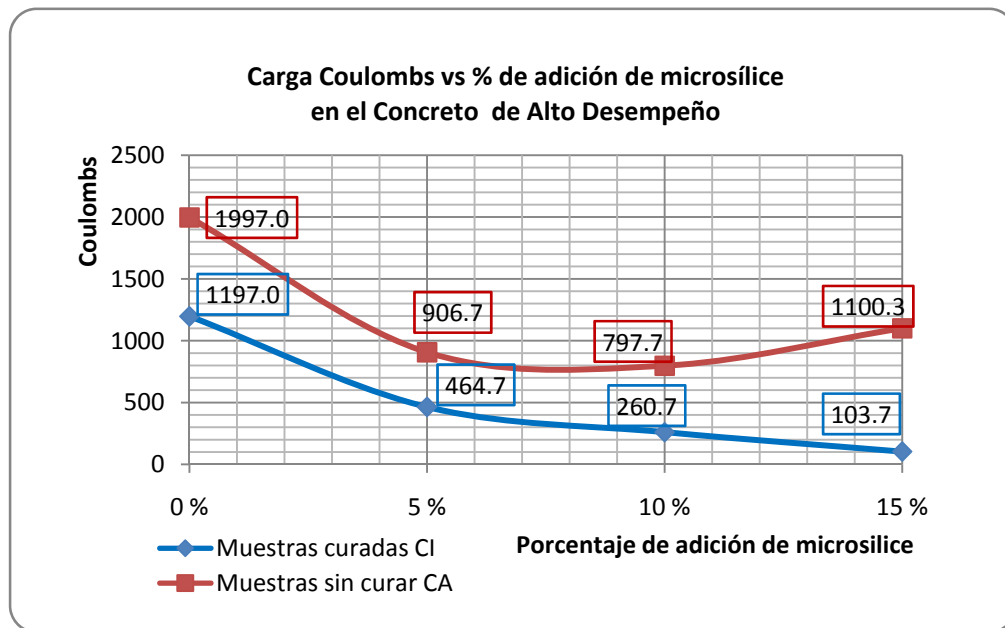
Es evidente que la propiedad del concreto llamada resistividad, es afectada por el porcentaje de adición de microsilice de la mezcla, cuando el concreto es debidamente curado. En este tipo de curado el hormigón genera una evolución del 122% entre el 0% de adición y el 5 %, del 81% de adición entre el 5% y 10% y del 119% en las mezclas de concreto que estaban entre el 10% y 15% de adición de microsilice. Revisar los porcentajes

En las muestras no curadas la evolución de esta propiedad no fue representativa, pudiéndose observar los siguientes porcentajes de incremento de resistividad, 34%, 58% y una disminución del 28% para las mezclas entre 0% y 5%, 5% y 10% y 10% y 15% respectivamente. El aumento de la resistividad entre el concreto no curado y el curado fue del 28%, 112%, 117% y 574% para 0%, 5%, 10% y 15% de adición de microsilice respectivamente.

De lo anteriormente expuesto es claro que el uso de microsilice en altos porcentajes en concreto curados mejora sustancialmente la resistividad. Esto se debe principalmente a que la resistividad del concreto es función de la resistividad de la solución de poros del material. En muestras con porcentajes altos de adición, la resistividad de la solución de poros tiende a ser baja debido a la disminución de iones hidróxido debido en parte a su consumo durante las diferentes reacciones puzolánicas.

4.3.4 Influencia del porcentaje de microsilice y del tipo de curado en la carga en Coulombs del HPC.

La siguiente gráfica muestra la influencia del porcentaje de adición de microsilice, respecto a la carga en Coulombs obtenida a partir del ensayo de RCPT, en cilindros curados y no curados.



Gráfica 23. Influencia del porcentaje de microsilice y del tipo de curado en la carga en Coulombs, en el HPC.

En la Gráfica 23, se puede observar la influencia de la microsilice en el ensayo de RCPT, en dicha gráfica se evidencia una disminución de la carga en coulombs en los cilindros curados del 62 % entre el 0% y 5% de microsilice, del 44% entre 5% y 10% , y entre el 10% y el 15% del 62%. Lo que muestra que entre mayor se la cantidad de adición de microsilice mejor comportamiento ante cloruros tendrá la muestra curada.

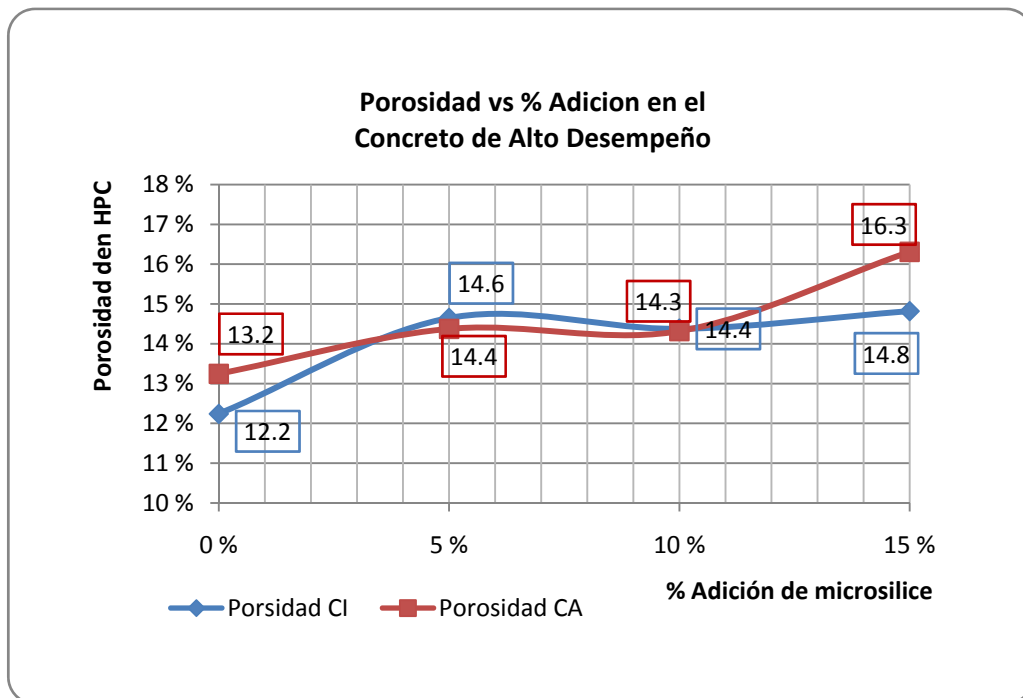
Los cilindros no curados tuvieron una disminución del 55%, 12% y un aumento del 38% entre 0% - 5%, 5% - 10% y 10% - 15% de microsilice adicionada respectivamente.

Entre los dos tipos de curado la diferencia fue del orden del 67%, 95%, 205% y del 961 % de incremento de carga entre el curado y el no curado definiendo así que el tipo de curado permite

mayor carga en los cilindros, lo que significa mayor penetrabilidad de los cloruros en cada uno de los porcentajes de microsilice analizados.

4.3.5 Influencia del porcentaje de microsilice y del tipo de curado en la porosidad del HPC.

A continuación se mostrará los resultados de porcentaje de porosidad del HPC, la cual fue obtenida, por medio de diferencias pesos de la probeta.



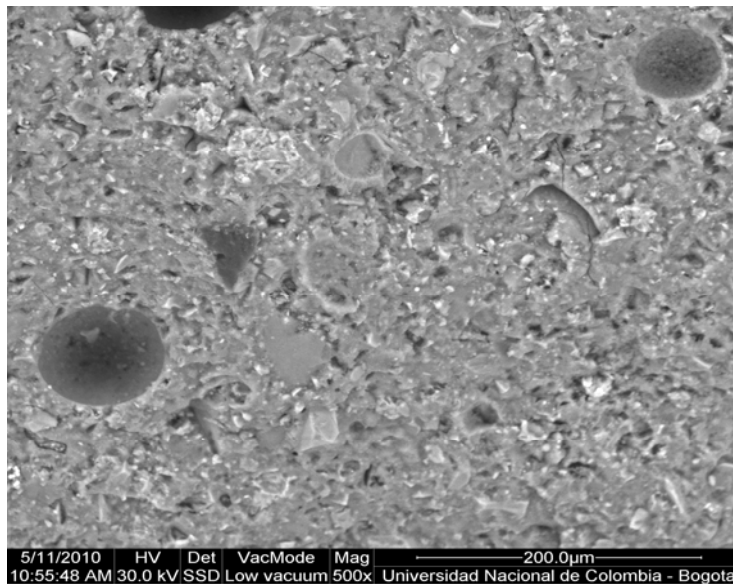
Gráfica 24. Influencia del porcentaje de microsilice y del tipo de curado en la porosidad abierta.

En la gráfica anterior se observa que no existe una tendencia clara y definida acerca de la influencia de la microsilice en los poros en el HPC, por el contrario, se observa una ligera tendencia a aumentar la porosidad en la medida que se aumenta el porcentaje de adición. Se cree que esta aparente contradicción en los resultados se debe a que el ensayo propuesto permite evaluar únicamente la porosidad abierta (poros saturables) y teniendo en cuenta que la microsilice entrega importantes mejoras en la porción de la microestructura que incluye los poros más pequeños, los cuales no se pueden evaluar mediante el ensayo realizado. Es necesario utilizar técnicas robustas como son la intrusión de mercurio para evaluar la porosidad real de las muestras.

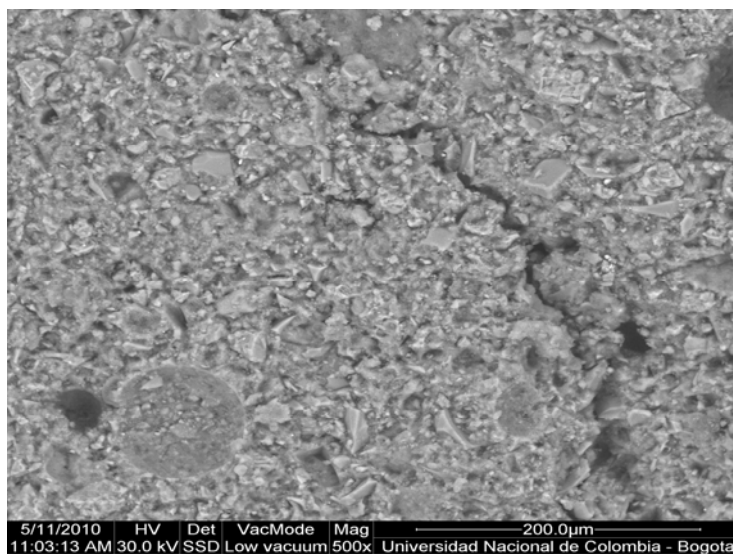
Respecto al curado se observa que las muestras curadas tienen una menor porosidad, excepto para las muestras en el rango de 5 y 10%, específicamente donde se supone existe una mayor densidad, y

en la que predomina un refinamiento de la estructura en los poros mas pequeños, en los que el ensayo no es representativo.

En la Fotografía 16 y Fotografía 17, se observan matrices cementicias para muestras de pasta de cemento hidratadas a los 28 días curadas y no curadas con el 10% de microsilice. Se observa que las microestructuras es aparentemente similar, aunque al observar en detalle las muestras no curadas se detectaron algunas microfisuras que afectan el comportamiento durable de estas probetas.



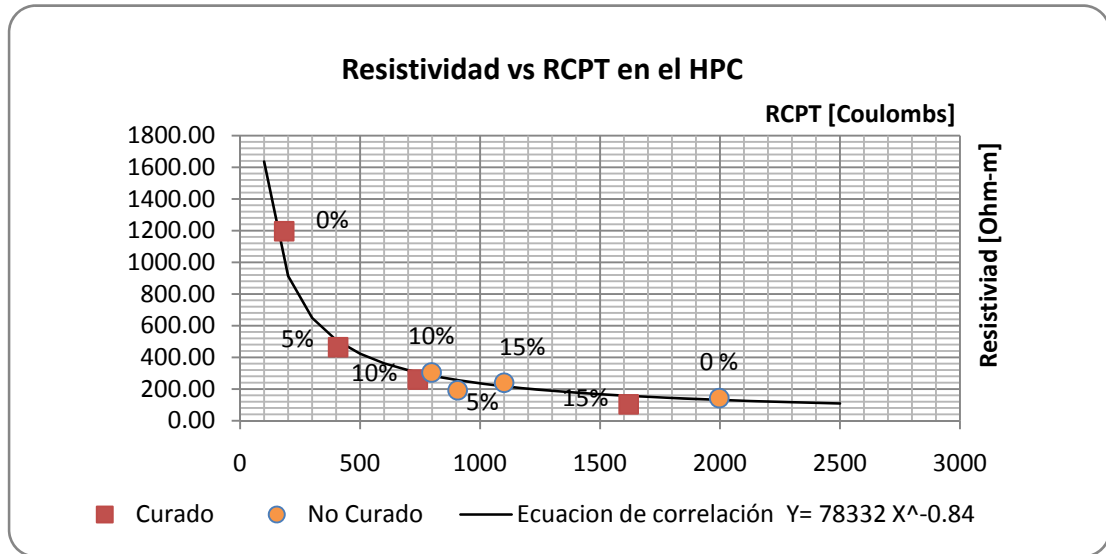
Fotografía 16. Nivel de porosidad superficial, en una muestra curada con el 10% de microsilice.



Fotografía 17. Nivel de porosidad superficial, en una muestra no curado con el 10% de microsilice.

4.3.6 Correlación entre la resistividad y el RCPT del HPC.

En la siguiente 0, se muestra la correlación entre la prueba de resistividad y el ensayo del RCPT.



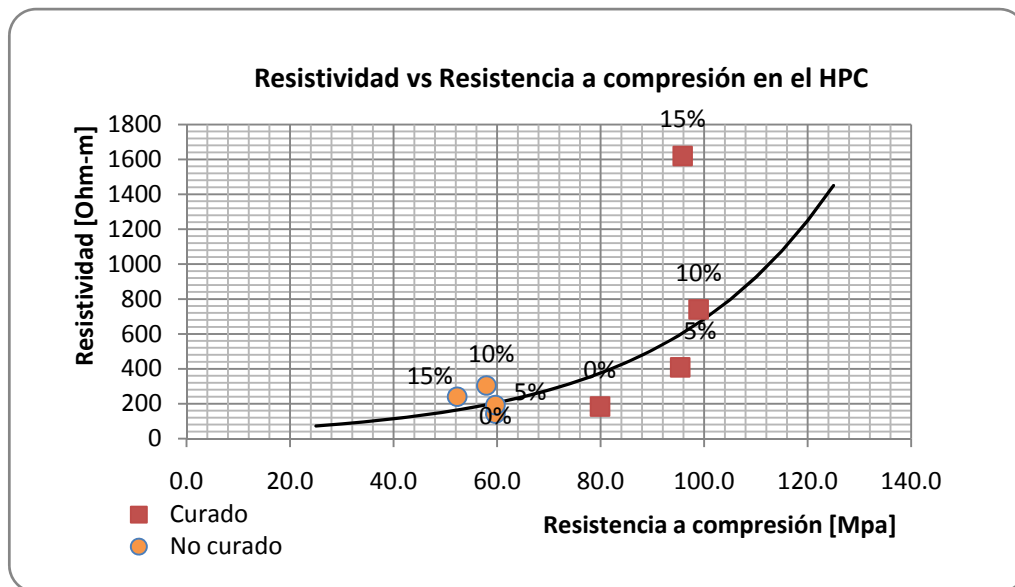
Gráfica 25. Resistividad vs RCPT en el HPC.

En la grafica anterior se muestra que existe una clara correlación no lineal entre los dos métodos para los cilindros curados y no curados. La correlación obtenida es $r^2 = 0.974$.

De igual manera se puede observar que entre mayor sea la resistividad menor es la carga en coulomb medida con la prueba de RCPT.

4.3.7 Correlación entre resistividad y la resistencia a compresión del HPC.

La siguiente gráfica muestra la correlación entre la resistividad y la resistencia a compresión del concreto.



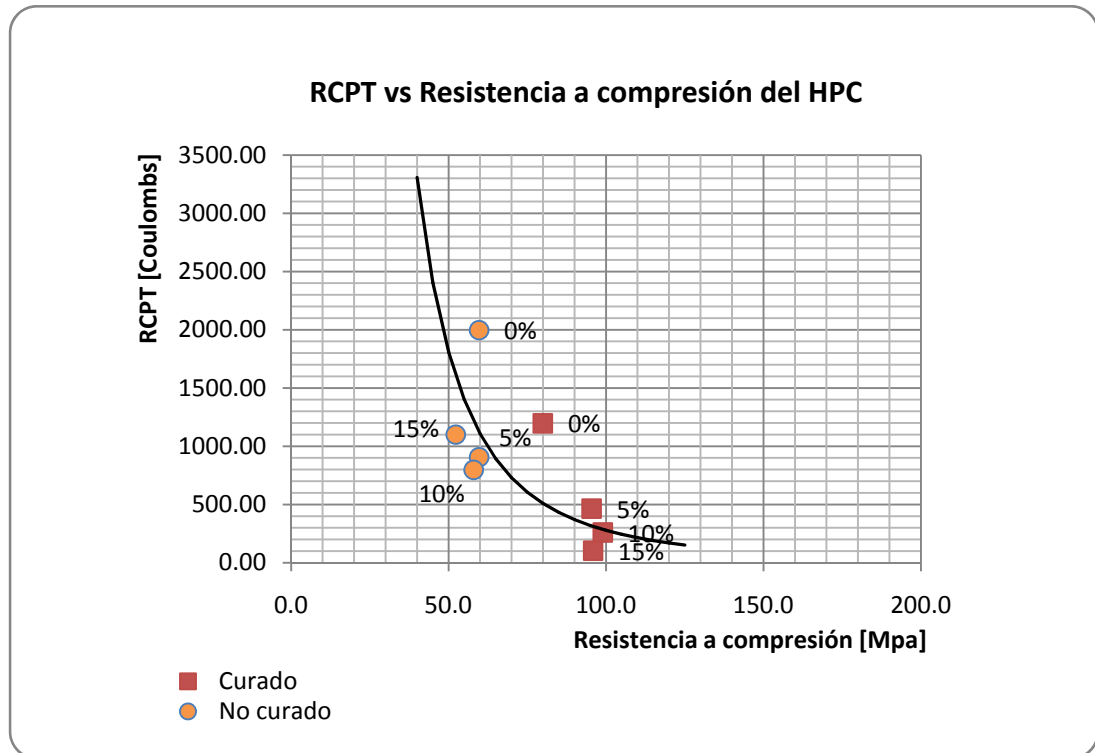
Gráfica 26. Resistividad vs Resistencia a compresión del HPC.

La grafica anterior muestra una correlación entre los resultados de los cilindros curados y no curados de $r^2= 0.55$. Los resultados evidencian una correlación de $r^2= 0.62$ para los cilindros curados, indicando esto, que estas propiedades del concreto pueden ser correlacionadas si se tiene un buen sistema de curado. En los cilindros no curados la correlación es de $r^2= 0.22$ Indicando esto que el tipo de curado incide drásticamente en estas dos propiedades.

De igual manera, la gráfica muestra que la relación entre la resistividad y la resistencia a compresión son proporcionales, a mayor es la resistencia a compresión mayor resistividad.

4.3.8 Correlación entre el RCPT y la resistencia a compresión del HPC.

La Gráfica 27, muestra los resultados de la correlación entre el RCPT y la resistencia a compresión.



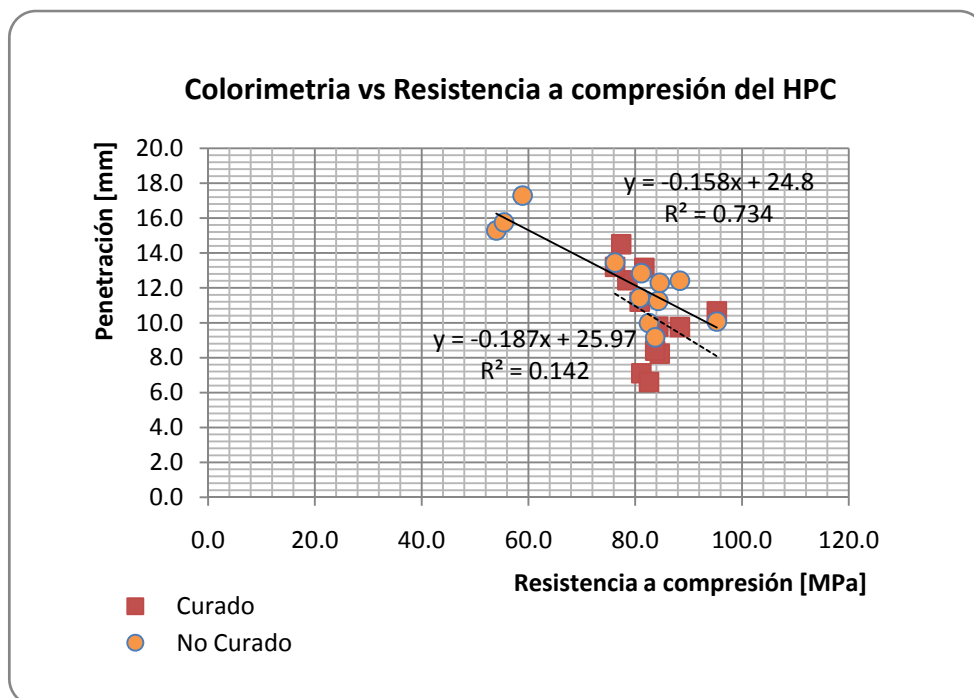
Gráfica 27. RCPT vs Resistencia a compresión del HPC.

En grafica Gráfica 27, se puede observar que entre la resistencia a compresión es directamente proporcional a los resultados de durabilidad del ensayo de RCPT, es decir a mayor resistencia, menor carga en coulombs lo que se traduce en una mejor durabilidad ante los cloruros.

La correlación entre esta dos propiedades es de $r^2 = 0.56$, para los cilindros curado y no curados, pero si se realiza una diferencia entre los dos tipos de curados, se puede decir que los cilindros curados tienen una correlación de $r^2 = 0.90$ en comparación con $r^2 = 0.01$ de los no curados, lo que ratifica la importancia del curado para las comparaciones de estas dos propiedades del concreto.

4.3.9 Correlación entre el método de colorimetría y la resistencia a compresión del HPC.

En la siguiente grafica se mostrar la correlación entre el método de colorimetría y la resistencia a compresión del concreto.



Gráfica 28. Colorimetria vs resistencia a compresión del HPC.

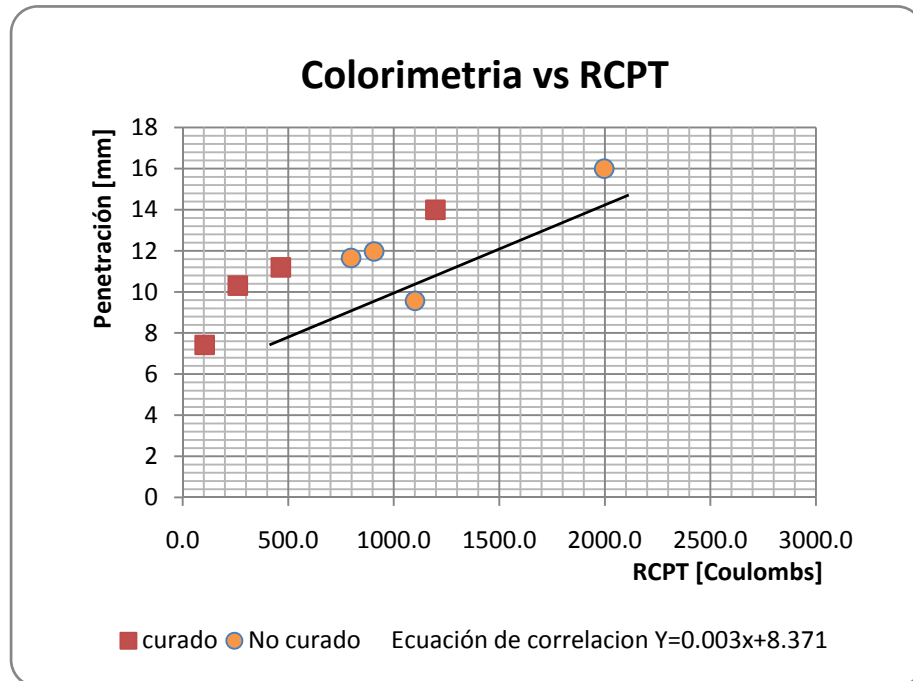
En la grafica anterior se puede observar que existe una correlación adecuada, entre los cilindros curados de $r^2 = 0.63$ caso contrario a los cilindros no curado cuya correlación es de $r^2 = 0.14$, demostrando igual que con los ensayos anteriores que solo se puede establecer correlaciones entre las propiedades de mediciones de cloruros y las resistencias a compresión, en cilindros curado.

En cilindros no curados los porcentajes de correlación son muy bajos en todas las propiedades de medición de cloruros.

La grafica Gráfica 27, muestra también, la relación entre penetración de cloruros y resistencia a compresión es proporcional, es decir entre mayor resistencia a compresión, menor penetración de cloruros.

4.3.10 Correlación entre el método de colorimetría y el ensayo de RCPT en el HPC.

En la siguiente grafica se muestra la correlación entre la penetración de cloruros (colorimetría) y la prueba de RCPT.



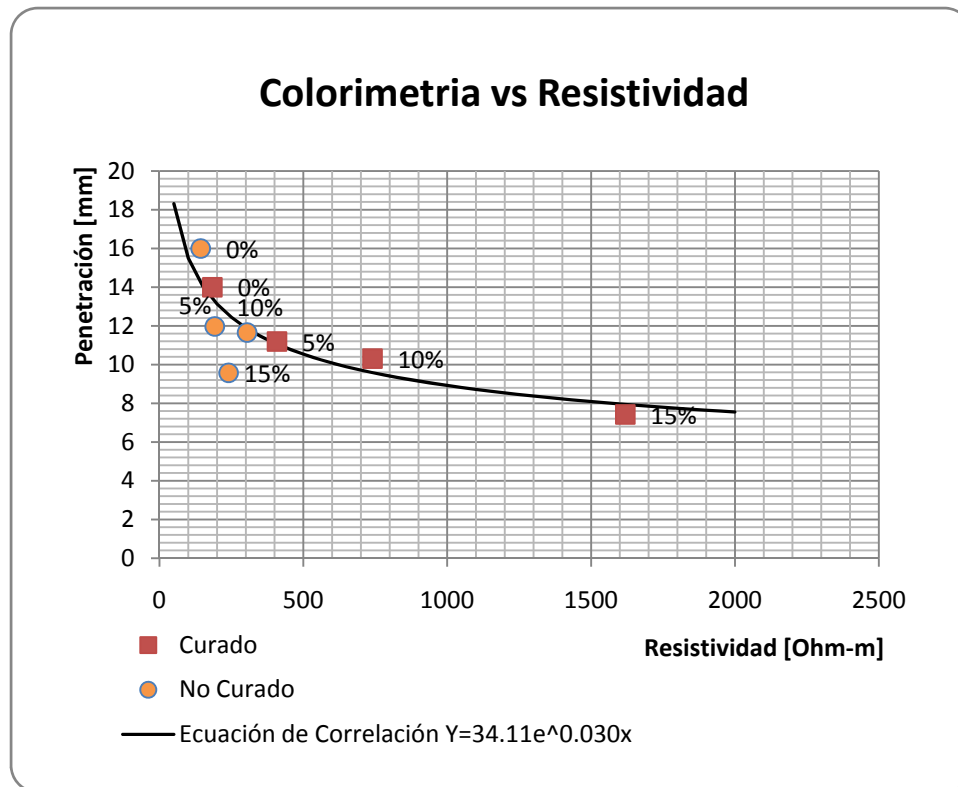
Gráfica 29. Colorimetria vs RCPT.

La grafica anterior muestra un correlación entre los cilindros curados y no curados de $r^2= 0.714$, pero si se determina la correlación colorimetría vs RCPT de los cilindros curados, dicha correlación esta en $r^2= 0.874$ y las de los no curados esta en el $r^2= 0.66$; lo anteriormente expuesto indica el papel fundamental del curado en las muestras de HPC.

De igual forma la grafica también indica que la penetración es directamente proporcional a la carga en coulombs determinada mediante la prueba del RCPT, indicando esto que a menor carga, menor penetración del ion cloruro.

4.3.11 Correlación entre el método de colorimetría y la resistividad.

La siguiente grafica muestra la correlación entre colorimetría y resistividad.



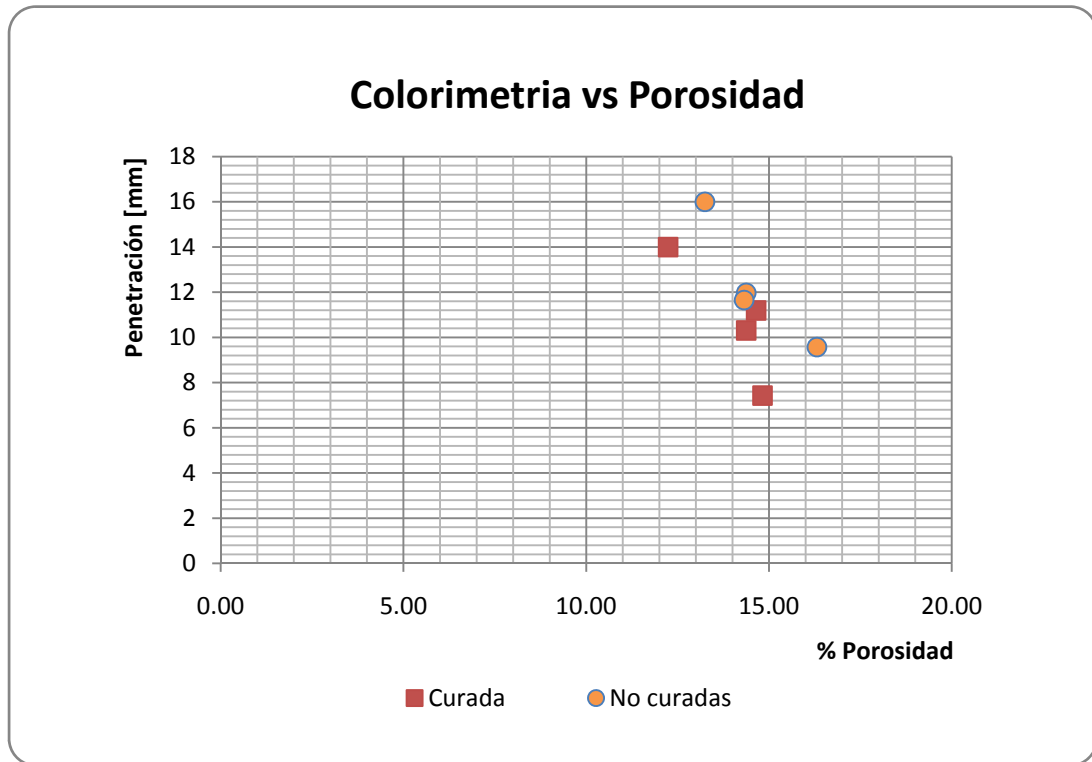
Gráfica 30. Colorimetria vs resistividad en el HPC

La grafica anterior muestra una relación inversamente proporcional entre corriente de la resistividad y la penetración del ion cloruros, se puede observar que entre mayor carga en Ohm-m, menor penetración de ion cloruro en milímetros.

La correlación entre el método de colorimetría y la resistividad es $r^2= 0.73$ pero igual que con las graficas anterior las muestras curadas muestra una mejor correlación entre estos dos ensayos, dicha correlaciones del 0.96 en muestras curadas, caso contrario la muestras no curadas muestran una correlación del 0.44.

4.3.12 Correlación entre el método de colorimetría y la porosidad en el HPC.

En la siguiente grafica se trato de encontrar una correlación entre los ensayos propuesto mostrando los siguientes resultados.



Gráfica 31. Colorimetria vs porosidad en el HPC.

La grafica anterior no mostro correlación adecuada entre estos dos ensayos, esto se genero por lo explicado anteriormente acerca de la alta densidad de la matriz del concreto lo cual genero la imposibilidad de medir el porcentaje de poros por medio del ensayo de porosidad por pesos.

Conclusiones y recomendaciones.

- ✚ Se determinó que el origen de los agregados gruesos influye directamente en las resistencia a compresión y en el modulo de elasticidad del Concreto de Alto Desempeño, generándose mejores resistencias en los agregados de origen metamórfico-igneo, que en agregados de origen sedimentario, esto debido al mecanismo de falla del HPC el cual se produce por el agregado.
- ✚ El módulo de elasticidad del concreto de alto desempeño calculado con el reglamento NSR10, tiene grandes diferencias con el modulo calculado experimentalmente posiblemente debido a que la formulación expuesta en la norma sismo resistente, es deducida para concretos convencionales, además de eso, dicha formulación no tiene en cuenta la calidad de los materiales presentes en nuestro país.
- ✚ La correlación entre la resistencia a compresión del HPC y la velocidad de pulso ultrasónico, no evidencia resultados adecuados para el uso de esta metodología como medio de predecir la resistencia a compresión por este método, caso contrario con el módulo de elasticidad en donde la correlación entre estos dos ensayos evidencia mayor confiabilidad para el uso de esta metodología en el cálculo de esta propiedad del concreto.
- ✚ El tipo de curado influye directamente en las resistencias finales del Concreto de Alto Desempeño, es decir la evolución de la resistencia es mayor en los cilindros curados que en los no curados, de igual manera el aumento de las resistencia a edades tardías esta relacionado con el tipo de curado, los cilindros curados, tienen la posibilidad de obtener mayores resistencias a edades de 300 días, que los cilindros no curados, muestras cuya resistencia no se incrementa después de los 28 días de edad.
- ✚ Para concretos generados con los materiales de las zona centro del país, se puede ratificar que el porcentaje optimo de microsilice es del 10%, el uso de porcentajes mayores puede generar problemas con calidades de curados más exigentes, lo que a la larga puede representar menor durabilidad y menores resistencias, si no se tiene el debido cuidado en el proceso de curado en el concreto.
- ✚ El módulo de elasticidad a edades tardías tiende a aumentar, en los cilindros curados.
- ✚ En el método de colorimetría se evidenció que el curado influye en los resultados finales, en el caso de los concretos curados por inmersión se observo menor penetración promedio final del ion cloruro en comparación con las muestras no curadas.

- ✚ La medida de resistividad del concreto no es confiable cuando se aplica en concretos no curados. De igual forma, en concretos curados a medida de que se aumente el porcentaje de microsilice, la resistividad tendrá un crecimiento exponencial con respecto a los no curados.
- ✚ Los ensayos de RCPT muestran que el incremento de los porcentajes de adición de microsilice, permiten el mejoramiento del concreto ante el ion cloruro en el caso de los concretos curados, dicho mejoramiento es exponencial respecto a los porcentajes de adición. Los concretos curados tiene mejor comportamiento, que los concretos no curados en cuanto a la medida de carga obtenida mediante la prueba.
- ✚ No es posible la medición del porcentaje de porosidad del HPC, por medio de la prueba de diferencia de peso, debido a que los resultados son poco acertados por que el esta prueba se realizando a los poros superficiales, debido a que es poco probable que el agua pueda llegar a los poros internos del HPC por su gran densidad en la matriz cementicia.
- ✚ Los concretos curados muestran correlaciones adecuadas entre los ensayos de colorimetría – resistencia a compresión, resistividad – resistencia a compresión y rcpt resistencia a compresión, lo que puede producir datos valederos en cuanto a este tipo de mediciones, caso contrario se genera en los concretos no curados, los cuales muestran correlaciones bajas.
- ✚ Las correlaciones en concretos curados para resistividad-RCPT, colorimetría-resistividad y colorimetría – RCPT muestra valores de validación adecuados para ser usados en la industria. Caso contrario a los concretos no curados, en donde dichas correlación no pueden ser usas por los bajos resultados obtenidos.
- ✚ Se recomienda realizar estudios con otras adiciones, con el fin de observar las influencias de las nuevas adiciones en todas las propiedades analizadas en esta tesis.
- ✚ Se recomienda realizar ensayos de tracción indirecta y relación de poisson con el fin de obtener datos acerca de este tipo de concreto creados en nuestro país.

Referencias

- [1] SCIENCENEWSLETTER 1952. Concrete durability hurt by penetration of water. 61, 150.
- [2] ARANGO, O. J. 2003. *Valoración de la permeabilidad al agua en concretos con diferentes características* Maestría en Ingeniería - Estructuras Universidad Nacional de Colombia.
- [3] TORRES, N. 2005. *Valoración del paso de cloruro en concretos con diferentes características*. Maestría en Ingeniería Civil - Estructuras, Universidad Nacional de Colombia.
- [4] A.M. NEVILLE, J. J. B. 1998. Tecnología del concreto. Mexico: Trillas.
- ACICOMMITTEE201 2001. Guide to Durable Concrete *Manual Concrete Practice 2006*. American Concrete Institute.
- ACICOMMITTEE363 1992. State of the art report on high strength concrete. *Manual Concrete Practice 2006*. American Concrete Institute.
- AIS 2010. Reglamento Colombiano de Contrucción Sismo Resistente NSR-10. Bogota D. C.: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- AITCIN, P. C. 2003. The durability characteristics of high performance concrete: a review. 25, 409-420.
- ARANGO, O. J. 2003. *Valoración de la permeabilidad al agua en concretos con diferentes características* Maestría en Ingeniería - Estructuras Universidad Nacional de Colombia.
- ASTM-C597 1997. Standard test method pulse velocity through concrete.
- ASTM-C1202 2005. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- BERNAT, M. 2004. *Recomendaciones para el proyecto de estructuras de hormigón de alta resistencia*, Madrid, Asociación científico-técnica del hormigón estructural ACHE.
- CIVILENGINEERING 1977. The Story of Cement, Concrete and Reinforced Concrete. 47, 63-65.
- CLAISSE, P. 2005. Transport properties of concrete. 43-48.
- COLLEPARDI, M. 1995. Quick Method to Determine Free and Bound Chlorides in Concrete - RILEM International Workshop on Chloride Penetration into Concrete. 10-16.
- GESOGLU, M., GUNEYISI, E. & OZTURAN, T. 2002. Effects of end condition on compressive strength and static elastic modulus of very high strength concrete. 32, 1545-1550.
- GOMEZ, J. G. 2001. Materiales para construcción en Ingeniería Civil.
- GUZMAN, D. S. D. 2003. *Durabilidad y patología del concreto*, Bogotá.
- ICONTEC4025 2006. Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de poisson en concreto a compresión Icontec.
- ICONTEC5551 2007. Durabilidad de estructuras de concreto. Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- IRAVANI, S. 1996. Mechanical Properties of High-Performance Concrete. 93, 416-425.

- ISABEL, G. G. 1993. *Hormigón de alta resistencia*, Madrid, Intemac.
- J.P. OLESON, C. B., S. M. CRAMER, R. CUCITORE, E. GOTTI Y R.L. HOHLFELDER 2004. The Romacons Project: A contributions to the historical and engineering análisis of hydraulic concrete in Roman Maritime Structures. 33, 199-229.
- JERES, S. R. 2002. *Efectos del Sulfato de Magnesio Sobre la Durabilidad en Concretos de Alto Desempeño*. Maestria en Ingenieria Civil - Estructuras, Univesidad Nacional de Colombia.
- JOVANE, M. A. 2009. *Comparación de permeabilidad en el concreto mediante ensayos de sortividad y permeabilidad superficial inicial*. Maestria en Ingenieria Civil - Estructuras, Universidad Nacional de Colombia.
- LIZARAZO J.M. 2005. Ensayos tipicos en la determinación de la durabilidad del concreto.
- LIZARAZO J.M., C. P. 2009. Optimización de las propiedades de transporte ionico del concreto y simulacion del ensayo ASTM C1202. 76, 185-194.
- MEHTA, P. K. & BURROWS, R. W. 2001. Building durable structures in the 21st century. 23, 57-63.
- NEVILLE, A. M. 1997. Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete. 94, 71-74.
- NEVILLE, A. M. 2002. *Properties of concrete*, Pearson Prentice Hall.
- PAEZ, N. & ROMERO, N. 2004. *Caracterización petrográfica de mortero concretos y ladrillos mas utilizados en la construcción de viviendas en Bogotá D.C., para su aplicación en geología forense*
Pregrado, Universidad Nacional de Colombia.
- PERSSON, B. 1999. Poisson's ratio of high-performance concrete. 29, 1647-1653.
- RIVVA-LÓPEZ, E. 2002. *Concreto de Alta Resistencia*, Lima-Peru, Instituto de la construccion y gerencia.
- RODRIGUEZ, F. G. 2002. *Evaluación de estructuras técnicas y materiales para su reparación*, Mexico D.F., IMCYC.
- SCIENCENEWSLETTER 1952. Concrete durability hurt by penetration of water. 61, 150.
- SERWAY 1997. *Física*, Mc Graw Hill.
- TANG, L. 1999. Concentration dependence of diffusion and migration of chloride ions. Part 1 Theoretical considerations. 1463-1468.
- TORRES, N. 2005. *Valoración del paso de cloruro en concretos con diferentes características*. Maestria en Ingenieria Civil - Estructuras, Univesidad Nacional de Colombia.
- TUUTTI, K. 1982. The corrosion of steel in concrete.
- VALDERRAMA, C. P. 2009. *Evaluación del desempeño durable de concretos adicionados con cenizas volantes*. Maestria en Ingenieria Civil - Estructuras, Univesidad Nacional de Colombia.
- VÉRONIQUE B. B, P. B., MATTHIAS MAULTZCH, DOMINIQUE HENRY 2007. AgNO3 spray test: advantages, wealnesses, and various applications to quantifu chloride ingress into concrete. Part1: Non steady state diffusion test and exposure to natural conditions.

ANEXO A MATERIALES

1. CEMENTOS

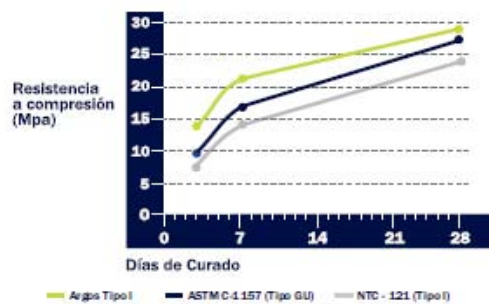
Especificaciones Técnicas

PARÁMETROS QUÍMICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 321 Tipo 1	ASTM C-1157 Tipo GU
Óxido de magnesio, MgO, máximo (%)	6.00	7.00	–
Tióxido de azufre, SO ₂ , máximo (%)	3.50	3.50	–

PARÁMETROS QUÍMICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 321 Tipo 1	ASTM C-1157 Tipo GU
Fraguado inicial ⁽¹⁾ , mínimo (minutos)	90	45	45
Fraguado final ⁽²⁾ , máximo (minutos)	320	480	420
Expansión autoclave, máximo (%)	0.80	0.80	0.80
Expansión en agua ⁽²⁾ , máximo (%)	0.02	–	0.02
Resistencia a 3 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	13.8	8.0	10.0
Resistencia a 7 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	20.7	15.0	17.0
Resistencia a 28 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	29.0	24.0	28.0

Gráficas de Resistencia

- (1) Ensayo con aguja de Vicat según NTC 118
 (2) Ensayo en barras de mortero a 14 días
 (3) Ensayo a compresión sobre cubos de mortero con arena normalizada



Las especificaciones del Cemento Gris de Uso General producido por Cementos Argos S.A. cumplen con los valores de la norma colombiana NTC 121 y 321 y de la norma americana ASTM C-1157 (tipo GU). El uso y aplicación de nuestros cementos se debe hacer bajo los lineamientos de las normas técnicas de construcción. Adicionalmente, en la elaboración de concretos se recomienda la revisión y aplicación de la NTC 3318 y NSR-10, requisitos de producción, calidad y durabilidad.

Cementos Argos S.A. no se hace responsable por los perjuicios que se pueden ocasionar por el mal uso de sus productos o sin cumplir las normas aplicables, o cuando dichos productos se utilicen para usos diferentes a los mencionados en la presente Ficha Técnica.

www.argos.com.co
 Celular #250
 01 8000 5 ARGOS
 2014



2. MICROSILICE



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.
E-mail: atencioncliente@toxement.com.co
www.toxement.com.co

EUCON MSA 100 P

Humo de sílice con aditivo plastificante para concreto de alto desempeño

TX40T158

DESCRIPCION

EUCON MSA 100 P es un aditivo en polvo, color gris, con base en microsilica y superplastificante, diseñado para mejorar las características del concreto en estado fresco y endurecido.

La microsilica reacciona con el Hidróxido de Calcio en la pasta de cemento, produciendo mayor cantidad de gel de silicato de calcio, incrementando la resistencia y durabilidad. Las partículas muy finas de microsilica llenan los pequeños espacios entre las partículas de cemento, creando un concreto más denso, menos permeable y con mayor durabilidad.

INFORMACION TECNICA

EUCON MSA 100 P es un compuesto que contiene humo de sílice y un aditivo superplastificante; la microsilica contenida cumple con los requerimientos de la norma ASTM C-1240 y las siguientes características:

Color : Gris claro
Contenido de SiO₂ : 77% - 84%

USOS

EUCON MSA 100 P está recomendado para usar en concretos o morteros bombeados en donde se requiera alta resistencia y durabilidad en:

- Puentes
- Estructuras de parqueaderos
- Ambientes marinos
- Estructuras de alto requerimiento.
- Plantas de tratamiento de agua.

EUCON MSA 100 P es ideal para concretos que van a estar bajo tierra, en contacto con suelos con alto contenido de sulfatos o con ataque químico severo.

VENTAJAS

El uso de **EUCON MSA 100 P** aporta muchas ventajas al concreto tanto en estado fresco como endurecido.

- CONCRETO EN ESTADO FRESCO**
- Mejora las características de terminado
 - Aumenta la cohesión y compactación.

- Mejora la estabilidad del concreto, evita segregación.
- Reduce el rebote de concretos o morteros lanzados.
- Aumenta la adherencia del concreto al acero.
- Aumenta la densidad de la mezcla haciendo el concreto más impermeable y con mayor durabilidad.

CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

- Aumenta las resistencias químicas y mecánicas al concreto
- Reduce la permeabilidad
- Aumenta la durabilidad
- No contiene cloruros.

RENDIMIENTO

La dosificación de **EUCON MSA 100 P** oscila entre 5% y 10% del peso del cemento, dependiendo de las resistencias requeridas y del diseño de la mezcla.

Se recomienda hacer pruebas en obra para determinar el diseño de mezcla apropiado a los requerimientos.

APLICACION

EUCON MSA 100 P viene listo para su uso, una buena distribución de la mezcla se logra dosificándola directamente en la mezcladora cuando la mezcla de concreto se encuentra aún seca y a continuación se adiciona el agua de amasado.

RECOMENDACIONES ESPECIALES

- Por su presentación en polvo utilice los elementos de seguridad como caretas y gafas para su manipulación.
- El comportamiento del producto puede variar de acuerdo a las características de calidad de los demás componentes del concreto por lo que se recomienda la realización de ensayos representativos previos a su utilización.
- El concreto preparado con **EUCON MSA 100 P** debe ser curado ya que este es un factor crítico para obtener altas resistencias y durabilidad; el curado debe realizarse inmediatamente después del proceso de terminado.
- Cure con agua, **CURASEAL PF** o **CURASEAL** de **EUCLID - TOXEMENT**.



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.
E-mail: atencioncliente@toxement.com.co
www.toxement.com.co

MANEJO Y ALMACENAMIENTO

EUCON MSA 100 P debe almacenarse en su envase original, herméticamente cerrado, bajo techo y sobre estibas. En ambiente fresco y seco.

Vida útil de almacenamiento: 1 año.

PRESENTACION

Bolsa: 15 kg

Las Hojas Técnicas de los productos EUCLID - TOXEMENT pueden ser modificadas sin previo aviso. Visite nuestra página Web www.toxement.com.co para consultar la última versión.

Los resultados que se obtengan con nuestros productos pueden variar a causa de las diferencias en la composición de los sustratos sobre los que se aplica o por efectos de la variación de la temperatura y otros factores. Por ello recomendamos hacer pruebas representativas previo a su empleo en gran escala.

EUCLID - TOXEMENT se esfuerza por mantener la alta calidad de sus productos, pero no asume responsabilidad alguna por los resultados que se obtengan como consecuencia de su empleo incorrecto o en condiciones que no estén bajo su control directo.

Junio 22 de 2010

3. ENSAYOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X – MICROSILICE.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
VICERRECTORÍA ACADÉMICA
CENTRO DE EQUIPOS INTERFACULTADES - CEIF
LABORATORIO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

XRF-064-10
Bogotá D.C., abril 13 de 2010

Profesor
JUAN MANUEL LIZARAZO M.
Departamento ing civil y agrícola
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Colombia
Tel. 3165000 ext. 13313
Sede Bogotá
Correo: jnmlizarazom@unal.edu.co

Respetado Profesor:

Me permito reportar el resultado cuantitativo destructivo de dos (2) muestras solidas en polvo remitidas por usted, las cuales fueron codificadas por este laboratorio como:

- XRF-1634 M1 Escoria –Lizarazo-
- XRF-1635 M2 Silice –Lizarazo-

Las muestras fueron homogenizadas por agitación y se prepararon en forma de perla fundida con relación Muestra:Fundente, de 1:10. Como fundente se utilizó una mezcla de Tetraborato de Litio y Metaborato de Litio; como antiadherente se añadió Yoduro de Litio. De este modo se obtuvieron dos discos de vidrio de 37 mm de diámetro que posteriormente fueron medidos en las aplicaciones cuantitativas **CEMENTPER-07** y **SEDI-AI-2007** respectivamente.

Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW-2440 Philips equipado con un tubo de Rodio y potencia máxima de 4 KW. El equipo tiene una sensibilidad de 200ppm (0.02%) en la detección de elementos pesados metálicos en análisis semicuantitativos.

La estabilidad del equipo es controlada diariamente mediante la medición de una muestra patrón.

200 COLOMBIA
AÑOS DE IDENTIDAD -1810-2010-

Carrera 30 No. 45 - 03 EDIFICIO MANUEL ANCÍZAR, Piso 1º, Oficina 114
Teléfono: Conmutador; (57-1) 316 5000 Ext. 16594 Fax: 16596
Correo electrónico: labfux_ceifbog@unal.edu.co / www.ceif.unal.edu.co / Bogotá, Colombia, Sur América
ciencia y tecnología para el país

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA VICERRECTORÍA ACADÉMICA CENTRO DE EQUIPOS 2/2
 INTERFACULTADES - CEIF, LABORATORIO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X, INFORME No. XRF-064-10.

Los resultados obtenidos en forma de compuestos y de elementos, se transcriben a continuación.

Compuesto y/o Elemento	XRF-1634 M1 Escoria -Lizarazo-
CaO	45,450%
Fe ₂ O ₃	23,970%
P ₂ O ₅	9,760%
Si ₂ O	7,210%
MgO	2,060%
Mn ₂ O ₃	1,660%
Al ₂ O ₃	1,110%
V	0,294%
Cr ₂ O ₃	0,197%
TiO ₂	0,170%
SO ₃	0,109%
K ₂ O	0,050%
SrO	0,011%
ZnO	0,009%
Nb	0,006%
Zr	0,004%

Compuesto y/o Elemento	XRF-1635 M2 Silice -Lizarazo-
Si ₂ O	84,288 %
Na ₂ O	1,442 %
CaO	1,195 %
K ₂ O	0,658 %
MgO	0,440 %
Cl	0,413 %
Al ₂ O ₃	0,188 %
P ₂ O ₅	0,120 %
Fe ₂ O ₃	0,111 %
MnO	0,040 %
TiO ₂	0,010 %
Zn	556 ppm
S	233 ppm
Sr	60 ppm
Br	50 ppm
Ba	32 ppm
Ni	25 ppm
Cu	24 ppm
Pb	19 ppm
Rb	14 ppm

Cordialmente,



ANA ELENA CONCHA PERDOMO.
 Coordinadora

200 COLOMBIA
 AÑOS DE IDENTIDAD -1810-2010-

Carrera 30 No. 45 - 03 EDIFICIO MANUEL ANCÍZAR, Piso 1º, Oficina 114
 Teléfono: Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 16594 Fax: 16596
 Correo electrónico: labfurx_ceifbog@unal.edu.co / www.ceif.unal.edu.co / Bogotá, Colombia, Sur América
 ciencia y tecnología para el país

4. HIPERPLATIFICANTE PLASTOL 6000



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.
E-mail: atencioncliente@toxement.com.co
www.toxement.com.co

PLASTOL 6000

Aditivo hiperplastificante para concretos especiales

TX40T236

DESCRIPCION

PLASTOL 6000 es un aditivo reductor de agua de alto rango, de la más reciente tecnología a base de polycarboxilatos, formulado específicamente para aumentar drásticamente la manejabilidad de un concreto, siendo capaz de llevar una mezcla de cero asentamiento a un estado plástico de alta manejabilidad con dosis bajas. Cumple con la norma ASTM C-494 Tipo A, como reductor de agua y Tipo F como reductor de agua de alto rango y la AASHTO M-194.

INFORMACION TECNICA

Apariencia : Líquido de baja viscosidad
Color : Verde oliva
Contenido de Cloruros : Ninguno
Densidad : 1.06 kg/l +/- 0.03 kg/l

USOS

PLASTOL 6000 es especialmente recomendado cuando se requiere:

- Concreto de alta fluidez
- Concretos prefabricados
- Concretos de altas resistencias iniciales
- Concretos preesforzados
- Concretos bombeados
- Concretos autonivelantes
- Como reductor de agua, para incremento considerable de resistencias.
- Para disminuir la segregación y aumentar la cohesividad del concreto fluido.
- Para concretos de retracción controlada.
- Sistemas industrializados
- Concretos Fast – Track
- Concretos autonivelantes.

VENTAJAS

- En concretos fluidos no presenta sangrado.
- Permite colocar fácilmente concretos de alta resistencia y baja relación agua/cemento.
- Permite un desencofrado rápido.
- Incrementa las resistencias a compresión a edades iniciales y finales.
- Incrementa la durabilidad

- Mantiene o excede las resistencias a compresión originales aplicado en consistencia fluida.
- Reduce los tiempos de producción por una rápida colocación.
- Permite dar mejor acabado al concreto.
- Diseños de mezcla más económicos.
- Permite reducción de agua de amasado entre el 30% y el 50%.
- No tiene cloruros ni agentes corrosivos.
- Recomendado para concretos autocompactantes.

DOSIFICACION

Cuando se usa como reductor de agua la dosis recomendada de **PLASTOL 6000** es de 0.5% (4.7 cc/kg de cemento) - 1% (10 cc/kg de cemento).

Cuando se usa como superplastificante o autocompactante la dosis recomendada de **PLASTOL 6000** es de 0.3% (3 cc/kg de cemento) - 0.6% (6 cc/kg de cemento).

Cuando se adiciona en la planta, éste debe ser colocado con el agua de amasado. Cuando se adiciona en obra se debe mezclar el concreto durante 5 minutos a alta velocidad en el trompo.

Las dosis de **PLASTOL 6000** se ven afectadas por los materiales utilizados, condiciones de trabajo, temperatura, etc., se pueden requerir dosificaciones diferentes a las especificadas en esta ficha.

COMPATIBILIDAD

PLASTOL 6000 es compatible con otros aditivos. Se recomienda hacer pruebas previas para determinar el comportamiento de los aditivos cuando se usan juntos. Cuando se dosifica mas de un aditivo a la mezcla, éstos deben adicionarse separados.

APLICACION

PLASTOL 6000 puede ser adicionado con el agua inicial de diseño o cuando la mezcla de concreto se encuentra completamente húmeda. No adicionar el aditivo directamente al cemento seco.



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4
 PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.
 E-mail: atencioncliente@toxement.com.co
www.toxement.com.co

COMO FLUIDIFICANTE:

PLASTOL 6000 adicionado a una mezcla de consistencia normal, fluidifica el concreto haciéndolo óptimo para el bombeo.

COMO REDUCTOR DE AGUA:

PLASTOL 6000 permite obtener reducciones en el agua de amasado entre 30% y 50%, incrementando las resistencias mecánicas iniciales y finales. Reduce la permeabilidad del concreto y acelera las resistencias del diseño.

EUCLID - TOXEMENT se esfuerza por mantener la alta calidad de sus productos, pero no asume responsabilidad alguna por los resultados que se obtengan como consecuencia de su empleo incorrecto o en condiciones que no estén bajo su control directo.

Junio 22 de 2010

RECOMENDACIONES ESPECIALES

- Determine la dosis adecuada mediante ensayos previos
- En concretos fluidos se debe ajustar el diseño para mantener la homogeneidad de la mezcla.
- La granulometría de los agregados debe ser continua.
- No debe adicionarse a la mezcla, ni al cemento secos.
- No usar aire comprimido para su agitación.
- Mezclas con **PLASTOL 6000** pueden incluir aire hasta en un 7% sin afectar resistencias finales.
- No mezclar por tiempo mayor a 5 minutos.
- En concretos autocompactantes se recomienda manejar la proporción de grava - arena: 48% - 52%.
- Tamaño máximo del agregado grueso: 12.5 mm.
- Arenas con módulo de finura entre 1.5 - 2.5.

ALMACENAMIENTO

PLASTOL 6000 debe almacenarse a temperaturas por encima de 0°C. **PLASTOL 6000** no es un material peligroso pero se recomienda emplear elementos de seguridad para su manipulación.

Vida útil de almacenamiento: 6 meses a granel y 1 año en tambor

PRESENTACION

Garrafa:	20 kg
Tambor plástico:	220 kg
Granel	

Las Hojas Técnicas de los productos EUCLID - TOXEMENT pueden ser modificadas sin previo aviso. Visite nuestra página Web www.toxement.com.co para consultar la última versión.

Los resultados que se obtengan con nuestros productos pueden variar a causa de las diferencias en la composición de los substratos sobre los que se aplica o por efectos de la variación de la temperatura y otros factores. Por ello recomendamos hacer pruebas representativas previo a su empleo en gran escala.

Plastol 6000

Página 2

5. CLORURO DE SODIO – MERCK



567440 Sodium Chloride

Calbiochem®

NaCl

Para preguntas en general por favor contacte a
nuestro Servicio de Atención al Cliente:

Merck KGaA
Frankfurter Str. 250
64293 Darmstadt
Germany
Teléfono: +49 6161 72-0
Fax: +49 6161 72 2000

13 diciembre 2010

Número de producto	Tamaño	Precio
567440-1KG	1 kg	Precio sobre pedido
567440-500GM	500 gm	Precio sobre pedido

Los precios están sujetos a cambios sin notificación.

ACS Reagent Grade.

Información sobre producto

Form	White solid
Purity	≥99% by titration
Contaminants	Insoluble material: ≤0.006%; heavy metals: ≤6 ppm (as Pb)
Fórmula química	NaCl
RTECS	VZ4726000
Número CAS	7647-14-5
Merck USA index	14, 8599

Almacenar y enviar información

Categoría de almacenamiento	+16°C to +30°C
Ship	Ambient Temperature Only Standard Handling

6. HIDROXIDO DE SODIO.



106482 Sodio hidróxido en lentejas

apto para uso como excipiente EMPROVE® exp Ph Eur,BP,FCC,JP,NF,E 624

Para preguntas en general por favor contacte a nuestro Servicio de Atención al Cliente:

Merck KGaA
Frankfurter Str. 260
64293 Darmstadt
Germany
Teléfono: +49 6161 72-0
Fax: +49 6161 72 2000

13 diciembre 2010

Número de producto	Embalaje	Tamaño	Precio
1064821000	Frasco, plástico	1 kg	Precio sobre pedido
1064826000	Frasco, plástico	5 kg	Precio sobre pedido
1064829025	Cartón ondulado	25 kg	Precio sobre pedido
1064829050	Cartón ondulado	60 kg	Precio sobre pedido

Los precios están sujetos a cambios sin notificación.

Información sobre producto


Grade	Ph Eur,BP,FCC,JP,NF,E 624
Sínonimos	Soda caustic
Fórmula empírica (según Hill)	HNaO
Fórmula química	NaOH
Número HS	2815 11 00
Número CE	215-186-5
Masa molar	40.00 g/mol
Número de índice CE	011-002-00-6
Número CAS	1310-73-2

Datos químicos y físicos


Solubilidad en agua	1090 g/l (20 °C)
Punto de fusión	323 °C
Masa molar	40.00 g/mol
Densidad	2.13 g/cm ³ (20 °C)
Valor de pH	14 (60 g/l, H ₂ O, 20 °C)
Punto de ebullición	1390 °C (1013 hPa)
Presión de vapor	(20 °C)

Información de seguridad de acuerdo a GHS

**INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE ADICIÓN DE LA MICROSILICE Y DEL TIPO DE CURADO
EN LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO EN EL CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO**

Hazard Statement(s)	H314: Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves. H290: Puede ser corrosivo para los metales.
Precautionary Statement(s)	P280: Llevar guantes/ prendas/ gafas/ máscara de protección. P301 + P330 + P331: EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagarse la boca. NO provocar el vómito. P306 + P351 + P338: EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.
Signal Word	Peligro
Hazard Pictogram(s)	
RTECS	WB4900000
Clase de almacenamiento	8 B No combustibles, sustancias corrosivas
WGK	WGK 1 contamina ligeramente el agua
Disposal	13 Las bases y alcoholatos, si es necesario, se diluyen introduciéndolas y agitando cuidadosamente en agua. Seguidamente se neutralizan con ácido clorhídrico (art. 100312) (guantes, campana extractora). Antes del vaciado en categoría D ó E, comprobar el valor del pH con tiras indicadoras universales (art. 109535).

Información de seguridad

Frase R	R 35 Provoca quemaduras graves.
Frase S	S 26-36/37/39-45 En caso de contacto con los ojos, lávense inmediata y abundantemente con agua y acúdase a un médico. Úsense indumentaria y guantes adecuados y protección para los ojos/la cara. En caso de accidente o malestar, acúdase inmediatamente al médico (si es posible, muéstresele la etiqueta).
Características de peligrosidad	corrosivo
Hazard Symbol	 Corrosive

Información de transporte

Clasificación (Transporte terrestre) ADR, RID	UN 1823 Natriumhydroxid, fest, 8, II
Clasificación (Transporte marítimo) IMDG-Code	UN 1823 SODIUM HYDROXIDE, SOLID, 8, II, Segregation Group: 18 (Alkalis)
Clasificación (Transporte aéreo) IATA-DGR	UN 1823 SODIUM HYDROXIDE, SOLID, 8, II

especificaciones

Asa y	
- acidimetric, NaOH	≥ 98.0 %
- total alkalinity calc. as NaOH	98.0 - 100.6 %
Identif y	passes test
Appearance of solution	passes test
Insoluble substances and organic matter	passes test
Carbonate (as Na ₂ CO ₃)	≤ 0.6 %
Chloride (Cl)	≤ 0.005 %
Phosphate (PO ₄)	≤ 0.002 %
Silicate (SiO ₂)	≤ 0.01 %

Sulphate (SO ₄)	≤ 0.003 %
Total nitrogen (N)	≤ 0.0006 %
Heavy metals (as Pb)	≤ 0.0006 %
Al (Aluminium)	≤ 0.001 %
As (Arsenic)	≤ 0.0003 %
Cu (Copper)	≤ 0.0006 %
Fe (Iron)	≤ 0.001 %
Hg (Mercury)	≤ 0.00001 %
K (Potassium)	≤ 0.1 %
Pb (Lead)	≤ 0.00006 %
Zn (Zinc)	≤ 0.0026 %
Residual solvents (Ph. Eur./USP/ICH)	excluded by manufacturing process

Conforms to the purity criteria on food additives according to the European Commission directive 96/77/EC. Residues of metal catalysts or metal reagents acc. to EMEA/CHMP/SWP/4446/2000 are not likely to be present.

© Merck KGaA, Darmstadt, Alemania, mcsa(at)merck.com.co, 2010

ANEXO B RESULTADOS

7.RESISTENCIAS A COMPRESIÓN, MODULOS Y PESOS UNITARIOS FASE I.

AGREGADO CUNDINAMARCA-TUNJUELO CT1 – 28 DÍAS				
a/c	Numero	Resistencia	Módulo E.	Peso Unitario
	Cilindro	(Mpa)	(Mpa)	(Kg/m3)
0.36	1	49.21	21829.7	2479.6
	2	52.16	20301.6	2476.4
	3	51.24	24459.8	2479.6
	4	50.85	22309.5	2406.4
	5	50.29	23606.5	2406.4
	6	47.56	20929.5	2370.8
	7	49.01	21829.7	2409.6
	8	47.98	22557.3	2403.2
	9	49.20	20929.5	2374.6
	10	49.59	20715.9	2400.1
0.32	1	59.59	25377.0	2417.88
	2	54.21	25377.0	2435.06
	3	56.10	22147.2	2419.15
	4	56.47	22557.3	2466.90
	5	56.01	21001.7	2425.52
	6	53.08	27068.8	2444.61
	7	56.85	20133.8	2431.88
	8	56.66	21184.3	2419.15
	9	52.74	22147.2	2444.61
	10	56.48	20472.2	2371.40
0.28	1	62.43	23592.1	2406.4
	2	66.79	22757.0	2387.3
	3	67.34	27650.9	2496.8
	4	73.13	25211.1	2435.1
	5	72.51	25460.8	2393.7
	6	70.46	25833.3	2457.3
	7	68.73	27757.0	2423.6
	8	68.73	26091.6	2452.3
	9	68.15	26624.1	2426.2
	10	67.86	26091.6	2442.1

AGREGADO CUNDINAMARCA-TABIO CT2 28 DÍAS				
a/c	Numero	Resistencia	Módulo E.	Peso Unitario
	Cilindro	(Mpa)	(Mpa)	(Kg/m3)
0.36	1	53.7	27285.4	2368.9
	2	55.4	26985.5	2350.4
	3	54.0	28554.4	2363.1
	4	53.4	25580.0	2370.8
	5	54.0	28890.4	2370.8
	6	56.3	25580.0	2305.8
	7	53.1	24556.8	2349.1
	8	52.8	25058.0	2342.8
	9	56.0	24556.8	2371.4
	10	52.0	23166.8	2350.4
0.32	1	56.6	23506.0	2396.9
	2	54.9	23296.1	2374.6
	3	56.3	22688.4	2333.2
	4	54.9	23089.9	2387.3
	5	54.9	23506.0	2384.1
	6	54.9	25088.1	2337.7
	7	55.4	23506.0	2374.6
	8	54.9	23719.7	2391.1
	9	58.6	23937.3	2367.6
	10	54.9	22688.4	2366.9
0.28	1	61.8	24924.1	2384.14
	2	58.3	24712.9	2389.87
	3	57.8	25357.6	2391.14
	4	61.5	25357.6	2333.84
	5	60.4	24924.1	2396.87
	6	59.8	24924.1	2377.77
	7	61.2	25357.6	2413.42
	8	57.8	25580.0	2387.32
	9	63.2	28039.6	2465.62
	10	63.5	26271.4	2393.68

AGREGADO TOLIMA-CHICORAL TC - 28 DÍAS				
a/c	Numero	Resistencia	Módulo E.	Peso Unitario
	Cilindro	(Mpa)	(Mpa)	(Kg/m3)
0.36	1	53.1	30696.0	2527.4
	2	57.2	32211.9	2635.6
	3	60.6	30339.1	2527.4
	4	57.2	30696.0	2514.6
	5	56.3	29316.4	2511.5
	6	55.4	30339.1	2530.6
	7	60.6	30339.1	2514.6
	8	57.8	31061.5	2546.5
	9	61.5	29990.4	2524.2
	10	63.5	31819.1	2521.0
0.32	1	69.9	29455.8	2518.5
	2	65.8	29756.4	2447.8
	3	70.5	31697.0	2531.8
	4	69.3	30063.1	2482.8
	5	70.7	32401.4	2508.3
	6	68.7	30063.1	2503.8
	7	67.6	31022.6	2500.0
	8	66.4	33137.8	2519.1
	9	67.6	29756.4	2521.6
	10	65.8	29756.4	2495.5
0.28	1	68.7	32614.5	2545.2
	2	67.0	31435.7	2539.5
	3	68.1	29649.6	2508.9
	4	70.7	29649.6	2549.7
	5	71.0	31061.5	2565.6
	6	72.2	30696.0	2531.2
	7	70.5	29649.6	2515.3
	8	70.5	31435.7	2563.7
	9	67.9	31435.7	2548.4
	10	70.5	31819.1	2559.2

AGREGADO GUAYURIBA-META MV				
a/c	Numero	Resistencia	Módulo E.	Peso Unitario
	Cilindro	(Mpa)	(Mpa)	(Kg/m3)
0.36	1	63.5	29515.4	2428.7
	2	63.2	29515.4	2428.7
	3	60.1	31537.0	2482.8
	4	61.5	29141.8	2425.5
	5	60.6	30292.1	2451.0
	6	57.8	32888.6	2466.9
	7	60.6	31537.0	2482.8
	8	59.8	31537.0	2619.7
	9	62.1	31537.0	2521.0
	10	57.8	29515.4	2489.2
0.32	1	73.9	32311.6	2524.2
	2	77.4	32655.4	2616.5
	3	79.4	31006.1	2517.8
	4	79.1	31322.5	2533.7
	5	73.9	30696.0	2540.1
	6	79.7	31322.5	2540.1
	7	78.5	33006.5	2527.4
	8	77.4	31322.5	2546.5
	9	71.6	31322.5	2511.5
	10	79.7	32311.6	2524.2
0.28	1	85.2	30965.3	2536.9
	2	82.3	32091.3	2536.9
	3	80.9	31802.2	2564.3
	4	81.4	35657.0	2524.2
	5	84.3	32385.7	2540.1
	6	84.3	31518.2	2540.1
	7	83.7	33302.3	2492.4
	8	84.3	32385.7	2540.1
	9	79.7	32385.7	2514.6
	10	84.9	32091.3	2530.6

AGREGADO GUAYURIBA-META MV - 90 Días

a/c	Numero	Resistencia	Módulo E.	Peso Unitario
	Cilindro	(Mpa)	(Mpa)	(Kg/m3)
0.28	1	97.3	33719.1	2536.9
	2	97.0	35046.6	2522.3
	3	99.0	33976.5	2561.8
	4	97.3	35324.8	2545.8

AGREGADO GUAYURIBA-META MV - 120 Días

a/c	Numero	Resistencia	Módulo E.	Peso Unitario
	Cilindro	(Mpa)	(Mpa)	(Kg/m3)
0.28	1	109.7	36437.7	2543.3
	2	108.6	36437.7	2519.7
	3	108.6	36969.7	2479.6
	4	112.6	36437.7	2540.7

8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADO FASE I

CUNDIN-TUNJUELO C1			
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.36	49.71	21946.90	2420.68
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)
	1.44	1328.86	42.08
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.32	55.82	22746.66	2427.62
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)
	2.01	2374.85	24.94
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.28	68.61	25706.96	2432.07
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)
	3.04	1585.23	32.64
CUNDIN-TABIO C1			
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.36	54.09	26021.42	2354.34
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)
	1.42	1853.85	20.18
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.32	55.62	23502.57	2371.40
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)
	1.24	690.31	21.36
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.28	60.53	25544.91	2393.37
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)
	2.11	983.55	32.59

TOLIMA-CHICORAL TC			
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.36	58.33	30680.86	2535.33
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)
	3.17	848.11	36.64
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.32	68.24	30710.98	2502.93
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)
	1.86	1289.48	24.09
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.28	69.71	30944.69	2542.65
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)
	1.66	1021.09	19.32
GUAYURIBA-META MV			
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.36	60.70	30701.68	2479.63
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)
	1.99	1264.75	58.25
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.32	77.07	31727.71	2538.20
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)
	2.90	776.00	29.56
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.28	83.11	32458.48	2532.02
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)

GUAYURIBA-META MV – 90 DÍAS			
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.28	97.68	34516.77	2541.70
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)
	0.92	787.78	16.52

GUAYURIBA-META MV – 120 DÍAS			
a/c	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)
0.28	109.88	36570.72	2520.85
	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)	Desviacion σ_{n-1} (Mpa)
	1.91	265.97	29.44

9. RESISTENCIA A COMPRESION FASE II.

0% ADICIÓN DE MICROSLICE					
CILINDROS CURADOS			CILINDROS NO CURADOS		
3 Dias	36.50 MPa	39.53 MPa	3 Dias	34.90 MPa	39.13 MPa
	39.20 MPa			43.10 MPa	
	42.90 MPa			39.40 MPa	
28 Dias	62.45 MPa	64.94 MPa	28 Dias	51.57 MPa	53.00 MPa
	66.75 MPa			53.28 MPa	
	65.60 MPa			54.14 MPa	
90 Dias	81.72 MPa	79.22 MPa	90 Dias	54.00 MPa	56.12 MPa
	78.55 MPa			58.91 MPa	
	77.39 MPa			55.44 MPa	
300 Dias	83.74 MPa	79.89 MPa	300 Dias	56.31 MPa	59.7 MPa
	78.83 MPa			71.04 MPa	
	77.10 MPa			51.98 MPa	
5% ADICIÓN DE MICROSLICE					
CILINDROS CURADOS			CILINDROS NO CURADOS		
3 Dias	38.99 MPa	41.37 MPa	3 Dias	37.54 MPa	40.54 MPa
	43.11 MPa			42.82 MPa	
	42.00 MPa			41.28 MPa	
28 Dias	73.34 MPa	72.57 MPa	28 Dias	57.87 MPa	57.30 MPa
	71.33 MPa			52.71 MPa	
	73.05 MPa			61.31 MPa	
90 Dias	76.24 MPa	86.63 MPa	90 Dias	64.11 MPa	60.83 MPa
	88.36 MPa			66.42 MPa	
	95.29 MPa			51.98 MPa	
300 Dias	99.91 MPa	95.39 MPa	300 Dias	56.31 MPa	59.68 MPa
	93.56 MPa			64.11 MPa	
	92.70 MPa			58.62 MPa	
10% ADICIÓN DE MICROSLICE					
CILINDROS CURADOS			CILINDROS NO CURADOS		
3 Dias	41.10 MPa	42.48 MPa	3 Dias	38.41 MPa	40.97 MPa
	43.67 MPa			41.60 MPa	
	42.65 MPa			42.91 MPa	
28 Dias	72.77 MPa	72.38 MPa	28 Dias	59.01 MPa	59.78 MPa
	71.62 MPa			58.44 MPa	
	72.77 MPa			61.88 MPa	
90 Dias	80.86 MPa	83.26 MPa	90 Dias	61.80 MPa	59.78 MPa
	84.32 MPa			56.31 MPa	
	84.61 MPa			61.22 MPa	
300 Dias	97.60 MPa	98.95 MPa	300 Dias	60.93 MPa	57.95 MPa
	105.11 MPa			62.66 MPa	
	94.14 MPa			50.25 MPa	
15% ADICIÓN DE MICROSLICE					
CILINDROS CURADOS			CILINDROS NO CURADOS		
3 Dias	30.56 MPa	29.92 MPa	3 Dias	29.92 MPa	29.07 MPa
	29.28 MPa			28.65 MPa	
	29.92 MPa			28.65 MPa	
28 Dias	64.17 MPa	63.79 MPa	28 Dias	50.42 MPa	47.36 MPa
	63.03 MPa			45.84 MPa	
	64.17 MPa			45.84 MPa	
90 Dias	81.14 MPa	82.49 MPa	90 Dias	52.56 MPa	48.51 MPa
	82.59 MPa			46.20 MPa	
	83.74 MPa			46.78 MPa	
300 Dias	94.14 MPa	95.87 MPa	300 Dias	55.16 MPa	52.27 MPa
	100.49 MPa			54.00 MPa	
	92.98 MPa			47.65 MPa	

10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO – FASE II.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO													
0% MICROSILICE			5% MICROSILICE			10% MICROSILICE			15% MICROSILICE				
Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)		
7 Dias	39.53	39.13	7 Dias	41.37	40.54	7 Dias	42.48	40.97	7 Dias	29.92	29.07		
	Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)		Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)		Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)		Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)
	3.21	4.11		2.14	2.72		1.30	2.31		0.64	0.74		
Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)		
28 Dias	64.94	53.00	28 Dias	72.57	57.30	28 Dias	72.38	59.78	28 Dias	63.79	47.36		
	Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)		Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)		Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)		Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)	
	2.23	1.31		1.08	4.33		0.66	1.84		0.66	2.65		
Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)		
90 Dias	79.22	56.12	90 Dias	86.63	60.83	90 Dias	83.26	59.78	90 Dias	82.49	48.51		
	Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)		Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)		Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)		Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)	
	2.24	2.52		9.65	7.76		2.09	3.01		1.30	3.51		
Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)	Días	Media X (Mpa)	Media X (Mpa)		
300 Dias	79.89	59.78	300 Dias	95.39	59.68	300 Dias	98.95	57.95	300 Dias	95.87	52.27		
	Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)		Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)		Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)		Desviación σ_{n-1} (Mpa)	Desviación σ_{n-1} (Mpa)		
	3.45	9.99		3.94	4.00		5.61	6.72		4.04	4.04		

%	Módulo E.	
	Curado	No curado
Microsilice	90	
0	30418.9	28376.3
5	31881.0	28368.9
10	29655.3	27056.7
15	29255.0	22478.3
%	Módulo E.	
	Curado	No curado
Microsilice	300	
0	35948.9	28949.1
5	35345.0	28062.1
10	33879.7	25040.6
15	32708.4	23029.6

11. RESULTADO COLORIMETRIA DEL HPC.

PERFILES DE PENETRACIÓN			
NO CURADO			
0%	5%	10%	15%
15.3 mm	13.6 mm	11.4 mm	12.6 mm
17.3 mm	12.4 mm	11.3 mm	10.3 mm
14.4 mm	13.3 mm	12.3 mm	9.4 mm
17.1 mm	12.4 mm	0.0 mm	8.9 mm
0.0 mm	10.1 mm	0.0 mm	9.7 mm
0.0 mm	10.0 mm	0.0 mm	13.1 mm
CURADO			
0%	5%	10%	15%
13.1 mm	14.3 mm	11.6 mm	7.0 mm
12.4 mm	9.4 mm	9.8 mm	7.2 mm
14.7 mm	12.1 mm	8.2 mm	6.8 mm
14.0 mm	10.6 mm	11.1 mm	6.4 mm
0.0 mm	10.1 mm	10.9 mm	8.3 mm
0.0 mm	10.7 mm	0.0 mm	8.9 mm

0% MICROSILICE			5% MICROSILICE		
Porc.	No Curado	Curado	Porc.	No Curado	Curado
	Media	Media		Media	Media
	X (Mpa)	X (Mpa)		X (Mpa)	X (Mpa)
0%	16.04	13.57	5%	11.97	11.20
	Desviacion	Desviacion		Desviacion	Desviacion
	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)		σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)
	1.41	1.00		1.55	1.75
10% MICROSILICE			15% MICROSILICE		
Porc.	No Curado	Curado	Porc.	No Curado	Curado
	Media	Media		Media	Media
	X (Mpa)	X (Mpa)		X (Mpa)	X (Mpa)
10%	11.65	10.31	15%	10.66	7.43
	Desviacion	Desviacion		Desviacion	Desviacion
	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)		σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)
	0.55	1.34		1.75	0.93

12. RESULTADOS RCPT DEL HPC.

RCPT		
Porcentaje	Curado Inmersión	Curado Aire
0%	1406	1858
	907	2001
	1278	2132
5%	511	931
	427	1109
	456	680
10%	249	643
	276	777
	257	973
15%	104	1201
	103	1203
	104	897

ANALISIS ESTADISTICO RCPT			
NO CURADO			
0	5	10	15
Media	Media	Media	Media
X (Mpa)	X (Mpa)	X (Mpa)	X (Mpa)
1197.00	464.67	260.67	103.67
Desviacion	Desviacion	Desviacion	Desviacion
σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)
259.17	42.67	13.87	0.58
CURADOS			
Media	Media	Media	Media
X (Mpa)	X (Mpa)	X (Mpa)	X (Mpa)
1997.00	906.67	797.67	1100.33
Desviacion	Desviacion	Desviacion	Desviacion
σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)
137.04	215.53	165.97	176.09

13. RESULTADOS DE RESISTIVIDAD DEL HPC.

RESISTIVIDAD DEL CONCRETO EN Ohm-m		
Porcentaje	Curado Inmersión	Curado Aire
0%	179.5	130.4
	188.2	155.1
	0	144.4
5%	429.6	176.7
	416.0	200.9
	379.7	199.2
10%	773.8	276.0
	679.4	306.3
	768.4	331.3
15%	1607.5	234.4
	1627.5	218.3
	1622.7	268.2

ANALISIS ESTADISTICO RESISTIVIDAD			
CURADOS			
0	5	10	15
Media	Media	Media	Media
X (Mpa)	X (Mpa)	X (Mpa)	X (Mpa)
183.84	408.45	740.53	1619.23
Desviacion	Desviacion	Desviacion	Desviacion
σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)
6.14	25.77	53.02	10.42
NO CURADOS			
0	5	10	15
Media	Media	Media	Media
X (Mpa)	X (Mpa)	X (Mpa)	X (Mpa)
143.31	192.27	304.51	240.32
Desviacion	Desviacion	Desviacion	Desviacion
σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)
12.38	13.49	27.67	25.45

14. RESULTADOS DE POROSIDAD DEL HPC.

POROSIDAD EN %		
Porcentaje	Curado Inmersión	Curado Aire
0%	12.2	12.8
	12.8	14.9
	11.7	12.1
5%	15.2	14.1
	14.2	14.6
	14.6	14.3
10%	14.8	14.5
	15.3	14.6
	13.0	13.8
15%	15.5	16.3
	14.5	15.8
	14.5	16.9

ANALISIS ESTADISTICO POROSIDAD			
NO CURADO			
0	5	10	15
Media	Media	Media	Media
X (Mpa)	X (Mpa)	X (Mpa)	X (Mpa)
13.25	14.38	14.32	16.31
Desviacion	Desviacion	Desviacion	Desviacion
σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)
1.45	0.26	0.42	0.51
CURADOS			
0	5	10	15
Media	Media	Media	Media
X (Mpa)	X (Mpa)	X (Mpa)	X (Mpa)
12.24	14.65	14.38	14.82
Desviacion	Desviacion	Desviacion	Desviacion
σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)	σ_{n-1} (Mpa)
0.55	0.50	1.18	0.57