

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS.....	1
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	8
ÍNDICE DE GRÁFICOS	9
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN	10
1.2 OBJETIVOS.....	14
OBJETIVO GENERAL	14
OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE	15
2.1 ACRÓNIMOS.....	15
2.2 AGREGADO PARA CONCRETO	16
2.3 PROPIEDADES Y CLASIFICACION DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO	16
2.3.1 Granulometría.....	16
2.3.2 Forma y redondez de la partícula	16
2.3.3 Propiedades superficiales	16
2.3.4 Impurezas	17
2.3.5 Propiedades físicas y mecánicas.....	17
2.3.6 Propiedades químicas y mineralógicas.....	18
2.3.7 Clasificación.....	19
2.3.8 Especificaciones de los agregados gruesos para el concreto	20
2.4 AGREGADO RECICLADO.....	24

2.5 PROPIEDADES Y CLASIFICACION DE LOS AGREGADOS RECICLADOS PARA CONCRETO.....	25
2.5.1 Granulometría.....	25
2.5.2 Forma y textura superficial.....	26
2.5.3 Mortero adherido.....	26
2.5.4 Densidad.....	28
2.5.5 Absorción.....	29
2.5.6 Resistencia a la abrasión.....	33
2.5.7 Contaminantes e Impurezas.....	34
2.5.8 Clasificación Internacional.....	37
2.5.9 Proceso agregado reciclado.....	40
2.5.10 Etapas de producción de agregado reciclado grueso a partir de los RCD.....	43
2.5.11 Experiencia Internacional.....	46
2.6 CONCRETO RECICLADO.....	47
2.7 PROPIEDADES DEL CONCRETO RECICLADO.....	47
2.8 ESTADO FRESCO.....	47
2.8.1 Consistencia.....	47
2.8.2 Densidad.....	49
2.8.3 Contenido de aire y exudación.....	50
2.9 ESTADO ENDURECIDO.....	50
2.9.1 Densidad.....	50
2.9.2 Resistencia a la Compresión.....	50
2.9.3 Módulo de elasticidad.....	54
2.9.4 Resistencia a la tensión.....	57
2.10 MEJORAMIENTO CALIDAD DE LOS AGREGADOS RECICLADOS.....	58
CAPITULO 3: METODOLOGIA.....	61

3.1 CARACTERIZACION DE LECHADAS.....	61
3.2 OBTENCIÓN Y RECOLECCIÓN DEL AGREGADO RECICLADO	65
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO SIN TRATAMIENTO	68
3.4 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CEMENTANTES	75
3.5 FABRICACIÓN Y APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO	77
3.6 CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO CON TRATAMIENTO	80
3.7 FABRICACION DE CONCRETOS	82
3.8 REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE RESISTENCIA.....	85
CAPITULO 4:	88
RESULTADOS Y ANALISIS	88
4.1 ENSAYOS DE LOS MATERIALES SIN TRATAMIENTO	88
4.1.1 Densidad de las partículas y absorción.....	88
4.1.2 Granulometría.....	92
4.1.3 10% de finos.....	101
4.2 ENSAYOS DE LOS MATERIALES CON TRATAMIENTO	103
4.2.1 Densidad, absorción y humedad.....	103
4.2.2 10% finos con tratamiento.....	108
4.3 ENSAYOS AL CONCRETO.....	110
4.3.1 Compresión 7 y 28 días	112
4.3.2 Modulo 7 y 28 días.....	115
4.3.3 Flexión 7 y 28 días	118
CONCLUSIONES	122
LINEAS DE INVESTIGACION	124
REFERENCIAS	125

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1, tratamientos.</i>	12
<i>Ilustración 2, Localización de las regiones pluviométricas. NTC 174 (ICONTEC., 2000).</i>	22
<i>Ilustración 3, Agregados Naturales (Izq.), Agregados Reciclados (Der).</i> (Castaño., 2009).....	24
<i>Ilustración 4, Mortero adherido en AR de hormigones con diferente relación agua-cemento (Hansen T.C., 1986).</i>	27
<i>Ilustración 5, relación entre la densidad y el tamaño máximo del árido reciclado (Sánchez-De-Juan M., 2005).</i>	29
<i>Ilustración 6, Relación entre la densidad y la absorción del árido reciclado grueso. (Sánchez-De-Juan M., 2005).</i>	30
<i>Ilustración 7, Absorción de AR en función de la densidad (Kreijger P.C., 1983).</i>	31
<i>Ilustración 8, relación entre la densidad y la absorción del árido reciclado grueso. (Sánchez-De-Juan M., 2005).</i>	32
<i>Ilustración 9, Proceso agregado reciclado. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	40
<i>Ilustración 10, Etapas de producción de agregado reciclado grueso a partir de los RCD. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	43
<i>Ilustración 11, Pérdida de la manejabilidad en Concretos Reciclados.</i> (Nealen A., 1997).	48
<i>Ilustración 12, Corrección de la consistencia del CR adicionando superplastificantes.</i> (Castaño., 2009)	49
<i>Ilustración 13, Relación resistencia media vs agua-cemento según la curva de Abrams.</i> (Ayman Hanoun Robas., 2008).	51
<i>Ilustración 14, Porosidad total vs Resistencia a la Compresión. (Ayman Hanoun Robas., 2008).</i> .	54
<i>Ilustración 15, Modulo elástico en concretos reciclados con RDC y AR cerámicos. (Grübl P. and Rühl M., 1999)</i>	56
<i>Ilustración 16, Recolección de lechada Cemex Colombia S.A, (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	62

<i>Ilustración 17, Pozo de recolección de agua de reciclaje Cemex Colombia S.A, (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 18, Instrumentación utilizada para los ensayos de contenido de solidos totales, Ph-Muestras recolectadas, (Beltran y Borrego., 2014).</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 19. Preselección de muestras de ARE y ARC en diferentes puntos del Pilón. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	<i>65</i>
<i>Ilustración 20, Separación del material a utilizar a lo largo de la investigación. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 21 , Muestreo de las pilas tomadas arriba, en medio y debajo de la pendiente de la pila, posteriormente realización del cuarteo. (NTC 129 ICONTEC., 1995). (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	<i>67</i>
<i>Ilustración 22 , tamiz 3/8 (Izquierda) – tamiz 3/4 (Medio) – almacenamiento en lonas (Derecha). (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 23, molde cónico y pisón (Izquierda), Secado superficial (Derecha). (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 24, recipiente cilíndrico (Derecho), pistón aplicando la carga (medio), enrasando la muestra en el recipiente cilíndrico (Izquierda). (Beltrán y Borrego., 2014).....</i>	<i>74</i>
<i>Ilustración 25, Frasco de Le Chatelier. I.N.V.E 307 (INVIAS 2007).</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 26, Implementación del tratamiento en el trompo (Izquierda), lechada fabricada con cemento (mitad) y lechada fabricada con humo de sílice (derecha). (Beltrán y Borrego., 2014). ...</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 27, Tratamiento 5 con relación agua-cementante de 1.2, fabricado con humo de sílice (izquierda) y tratamiento 1 con relación agua-cementante de 1.2, fabricado con cemento Portland (derecha). (Beltrán y Borrego 2014).....</i>	<i>81</i>
<i>Ilustración 28, Determinación de Asentamiento. (Beltrán y Borrego., 2014).....</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 29, Maquina Universal. Ensayo de resistencia a la compresión. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 30, Ensayo para la determinación del Módulo de Elasticidad. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	<i>86</i>
<i>Ilustración 31, Maquina Instron 3369. (Beltrán y Borrego., 2014).....</i>	<i>87</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1, Clasificación Agregados.</i> (Solar., 2012).....	19
<i>Tabla 2, Requisitos de gradación para agregado grueso. NTC 174</i> (ICONTEC., 2000).....	21
<i>Tabla 3, Límites para sustancias dañinas y requisitos de las propiedades físicas del agregado grueso para concreto.</i> (ICONTEC., 2000).....	23
<i>Tabla 4, Continuacion.</i> (ICONTEC., 2000).....	23
<i>Tabla 5, Final.</i> (ICONTEC., 2000).....	24
<i>Tabla 6. Datos de índice de mortero adherido.</i> (Hansen T.C., 1986).....	27
<i>Tabla 7, Normas o especificaciones de distintos países con respecto a la absorción máxima y la densidad mínima</i> (Sánchez-De-Juan M., 2005).	33
<i>Tabla 8, Coeficiente de los Ángeles, comparativo árido natural – árido reciclado. Tomado de</i> (Castaño., 2009).	34
<i>Tabla 9, Composición de los agregados reciclados según la norma BS8500-2:02</i> (British Estándar., 2002)	35
<i>Tabla 10, Composición de los agregados reciclados según la norma japonesa.</i> (Works Bureau of Hong Kong., 2002).....	36
<i>Tabla 11, Clasificación de los RCD de acuerdo con el tipo de actividad.</i> (Ramón Velázquez Yáñez., 2004).	42
<i>Tabla 12, Cifras de producción de residuos de demolición y construcción en algunos países de la Unión Europea. Tomada de la Tesis</i> (Ramón Velázquez Yáñez., 2004).....	46
<i>Tabla 13, Resistencia a la compresión con diferentes porcentajes de sustitución.</i> (Álvarez, Jaime., 2012).	53
<i>Tabla 14, Comparación Módulos de Elasticidad.</i> (Martínez-Soto y Mendoza-Escobedo., 2006). ..	55
<i>Tabla 15, Concentraciones de polímeros aplicados a los RCA.</i> (Spaeth y Djerbi Tegger., 2014). 59	

<i>Tabla 16, Resultados absorción, densidad aparente y aplastamiento. (Zhao et al., 2013)</i>	60
<i>Tabla 17. Calculo del Volumen total del tratamiento (Lt). (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	79
<i>Tabla 18, HS=Humo de Sílice, CP=Cemento Portland. Dosificación del tratamiento para cada tratamiento parte 1. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	79
<i>Tabla 19. Diseños de mezcla por m³, para cada concreto fabricado, parte 1. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	83
<i>Tabla 20, Diseños de mezcla por m³, para cada concreto fabricado, parte 2. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	83
<i>Tabla 21, densidades y absorciones obtenidas en la investigación. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	89
<i>Tabla 22, Requerimientos normativos de densidad y absorción para agregados reciclados. (Castaño., 2009).</i>	92
<i>Tabla 23, Granulometría gravilla natural. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	93
<i>Tabla 24, mezcla de materiales por fracción. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	93
<i>Tabla 25, Granulometría grava natural. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	94
<i>Tabla 26, Mezcla de materiales por fracción. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	95
<i>Tabla 27, Granulometría arena. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	96
<i>Tabla 28, Mezcla de materiales por fracción. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	96
<i>Tabla 29, Granulometría 80 ARC – 20ARE. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	98
<i>Tabla 30, Mezcla de materiales por fracción. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	98
<i>Tabla 31, comparación granulometrías. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	99
<i>Tabla 32, Ensayo 10% finos para agregados natural, reciclados y combinaciones. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	101
<i>Tabla 33. Datos de densidad bulk, absorción y Humedad de agregados tratados, a los 3 y 7 días. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	103
<i>Tabla 34. Carga aplicada en agregados reciclados tratados, necesaria para generar 10% finos. (Beltrán y Borrego., 2014).</i>	109

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1, Peso Volumétrico.</i>	17
<i>Ecuación 2, Modulo de rotura.</i> (Vanegas, Juliana., 2008).....	57
<i>Ecuación 3, contenido de humedad en %.</i> NTC 1776 (ICONTEC., 1994).....	69
<i>Ecuación 4, Porcentaje de absorción.</i> I.N.V.E 223 (INVIAS., 2007).....	70
<i>Ecuación 5, Gravedad Específica Bulk.</i> I.N.V.E 223 (INVIAS., 2007).	70
<i>Ecuación 6, Densidad.</i> I.N.V.E 222 (INVIAS., 2007).....	72
<i>Ecuación 7, Absorción.</i> I.N.V.E 222 (INVIAS., 2007).	72
<i>Ecuación 8, Porcentaje de finos.</i> I.N.V.E 224. (INVIAS., 2007).	74
<i>Ecuación 9, Densidad de materiales cementantes.</i> I.N.V.E 307 (INVIAS., 2007).	75
<i>Ecuación 10, Volumen de poros saturables.</i> (Beltrán y Borrego., 2014).....	77
<i>Ecuación 11, Volumen ocupado por agua.</i> (Beltrán y Borrego., 2014).....	77
<i>Ecuación 12, Volumen efectivo a llenar.</i> (Beltrán y Borrego., 2014)	78
<i>Ecuación 13, numero de partículas.</i> (Beltrán y Borrego., 2014)	78
<i>Ecuación 14, Volumen de recubrimiento.</i> (Beltrán y Borrego., 2014).....	78
<i>Ecuación 15, Volumen de recubrimiento Total.</i> (Beltrán y Borrego., 2014).	78
<i>Ecuación 16, Resistencia a la compresión en unidades de Mpa.</i> NTC 673 (ICONTEC., 2000).....	85

ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Grafico 1, Densidad de los agregados. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	90
<i>Grafico 2, absorción agregados. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	91
<i>Grafico 3, Granulometría gravilla natural. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	94
<i>Grafico 4, Granulometría grava natural. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	95
<i>Grafico 5, Granulometría arena natural. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	97
<i>Grafico 6, Granulometría arena natural. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	99
<i>Grafico 7, comparación granulometrías. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	100
<i>Grafico 8, Carga aplicada a cada muestra para generar el 10% de finos. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	102
<i>Grafico 9, Comparación Gravedad especifica del Agregado reciclado con tratamiento a los 3 y 7 días de implementación. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	104
<i>Grafico 10 . Comparación Absorción (%) del Agregado reciclado con tratamiento a los 3 y 7 días de implementación. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	104
<i>Grafico 11. Comparación densidad Bulk Agregado reciclado con tratamiento y sin tratamiento. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	105
<i>Grafico 12. Comparación Absorción Agregado reciclado con tratamiento y sin tratamiento. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	106
<i>Grafico 13, Absorción vs relación agua cementante. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	107
<i>Grafico 14, Absorción vs Gravedad especifica de agregados tratados. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	108
<i>Grafico 15, Correlación entre la carga aplicada necesaria para generar 10% de finos y relación agua-cementante de los tratamientos. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	109
<i>Grafico 16, Carga aplicada a cada muestra para generar el 10% de finos en agregados reciclados tratados. (Beltrán y Borrego., 2014)</i>	110

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

La explotación de los recursos renovables y no renovables ha sido durante décadas una necesidad para el desarrollo de la humanidad. Las grandes industrias se han apoderado de la mayoría de los recursos naturales utilizándolos como materia prima lo cual ha venido generando un desequilibrio ecológico y ambiental, Saus y C. Defagot., (2006) , a raíz de la escasez de los recursos se han desarrollado múltiples técnicas de reciclaje.

En la ciudad de Bogotá existe una alta escasez de agregados naturales, debido a que el material necesario para construcción se debe traer de pueblos aledaños a la ciudad. Con el análisis y la información de los agregados reciclados, se pretende disminuir el uso de agregados naturales.

Hoy en día es de suma importancia la implementación de material reutilizable en la industria de la construcción en todo el mundo, Limbachiya, Marrocchino y Koulouris., (2007), en Bogotá según la resolución 2397, Secretaria Distrital de Ambiente., (2011), a partir de abril del año 2012 se debe utilizar en la construcción elementos reciclados provenientes de los centros de tratamiento. La utilización de los desechos y escombros de construcción (Agregado Reciclado), genera una disminución significativa de éstos, sin embargo, no se cuenta en la mayoría de países con un sitio especial para el depósito y tratamiento de dicho material (A.A. Di Maio., 2007)

El agregado reciclado a simple vista tiene una gran diferencia al agregado natural debido a que posee una superficie rugosa y porosa, producto del mortero sobrante adherido a las partículas. Este mortero afecta las propiedades del material reciclado, el cual depende de la clase de demolición que se tenga; agregado reciclado de escombros (ladrillo,

porcelana, vidrio, etc.) o agregado reciclado de concreto, siendo la alta presencia de absorción en el material, la principal característica de nuestro estudio.

Si la absorción aumenta, deja como consecuencia una menor gravedad específica, además generará una disminución en la resistencia de la mezcla de concreto debido a que aumenta la demanda del agua afectando la relación agua/cemento. El valor de absorción para agregados reciclados generalmente varía entre un 3% y un 10% dependiendo su origen, ésta característica es de suma importancia puesto que de esta depende la manejabilidad y el asentamiento de la mezcla. (Eddy.h., 2014).

No obstante, basándose en los estudios técnicos ya realizados bajo la dirección del Ingeniero Jesús Castaño, Castaño., (2009) y en artículos internacionales, Tam, Gao, y Tam., (2005); Zhao et al., (2013), se ha determinado que una de las causas de la disminución del desempeño mecánico en concretos reciclados es la alta absorción de los agregados como se planteó anteriormente. Como hipótesis queremos plantear que el suministro de agregado pre-sellado con pasta agua-cemento y agua- Humo de Sílice, pueden influenciar en la absorción de los agregados reciclados afectando el comportamiento mecánico del concreto, lo que podría generar un impacto positivo en el uso de este tipo de agregados. Se han realizado investigaciones de como la aplicación de un pre-sellado de agua-cemento en las partículas de agregados reciclados puede afectar positivamente las propiedades mecánicas, dado que esta pasta entraría en los poros que deja el mortero adherido al agregado reciclado generando así un sellamiento y por ende disminuyendo la absorción (Tam y Tam., 2007).

En nuestro trabajo de grado pretendemos investigar y obtener información acerca del comportamiento del concreto con agregado reciclado con el fin de establecer un patrón de confiabilidad en la utilización de dichos agregados. Tanto en el medio nacional como internacional existe una falta de orientación técnica, específicamente relacionada con la resistencia de dichos concretos (Adams et al., 2013).

Se obtendrá una caracterización técnica, por medio de una serie de ensayos para evaluar la capacidad estructural que se puede llegar a conseguir con este tipo de concreto,

Eguchi et al., (2007) y así aportar información para la implementación de la resolución 2397 de 2011 (Secretaría Distrital de Ambiente., 2011).

Para lograr alguna mejora en la resistencia de los agregados, se plantea la implementación de seis diferentes tratamientos, en donde se logre evidenciar de manera comparativa, cual tratamiento se desempeña de mejor manera, aportando así a la disminución de la alta absorción.

Los tratamientos a trabajar son los siguientes:

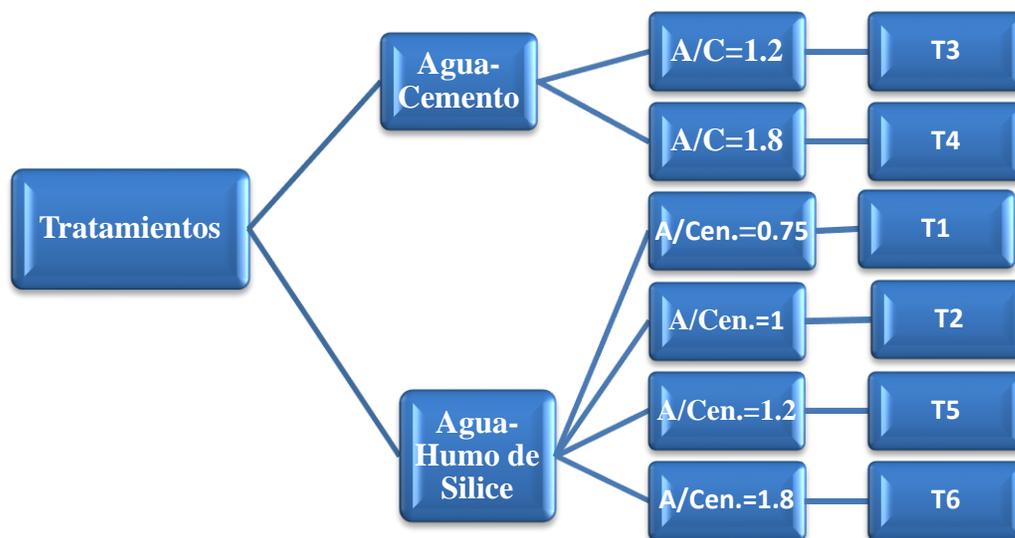


Ilustración 1, tratamientos.

Dichos tratamientos serán aplicados a una mezcla de agregados reciclados compuesta básicamente de dos tipos de material:

- Agregado de concreto reciclado.
- Agregado reciclado de escombros.

Al final se pretende, establecer y elegir el mejor tratamiento, basándose en resultados de diversos ensayos relacionados con las propiedades físicas de los agregados, para así evaluar la resistencia del concreto.

1.2 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la afectación que genera el hacer un tratamiento superficial a los agregados reciclados sobre las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar la influencia que tiene el tratamiento con lechadas pobres sobre las propiedades físicas de los agregados reciclados.
- Evaluar la influencia de los agregados reciclados tratados con lechadas pobres en el concreto en estado fresco.
- Determinar el grado de afectación sobre la resistencia a la compresión, tensión y módulo de elasticidad que genera la inclusión de agregados reciclados tratados y no tratados sobre el concreto en estado endurecido.

CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1 ACRÓNIMOS

A continuación se presentan diferentes acrónimos usados en el trabajo de grado:

RCD: Residuos de la construcción y demolición.

CR: Concreto Reciclado.

ARC: Agregado Reciclado de Concreto.

ARE: Agregado Reciclado de Escombros.

RCA: Recycled Concrete Aggregate.

AN: Agregado Natural.

IMA: Índice de Mortero Adherido.

AR: Agregado Reciclado.

CN: Concreto Natural.

CT1: Concreto Tratamiento 1.

CT2: Concreto Tratamiento 2.

CT3: Concreto Tratamiento 3.

CT4: Concreto Tratamiento 4.

CT5: Concreto Tratamiento 5.

CT6: Concreto Tratamiento 6.

CST: Concreto sin Tratamiento.

2.2 AGREGADO PARA CONCRETO

En la antigüedad no se conocían las propiedades que tienen los agregados en el concreto, se decía que era un material inerte dentro de este. Ya en la modernidad se han generado diversos estudios que comprueban que el agregado es el componente de mayor importancia dentro de cualquier cantidad de metros cúbicos de concreto, las propiedades y características de este influyen en todas las propiedades del concreto. (Solar., 2012)

2.3 PROPIEDADES Y CLASIFICACION DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO

2.3.1 Granulometría

La granulometría se refiere a la determinación del porcentaje de los diferentes tamaños presentes en una muestra. Teniendo como parámetros unos intervalos teóricos. Además de la obtención de los porcentajes se puede conocer los tamaños máximos y mínimos de la muestra a estudiar.(Solar., 2012)

2.3.2 Forma y redondez de la partícula

Esta propiedad se da a partir del tipo de roca y de las condiciones de sedimentación y transporte que ha tenido que experimentar el material.(Solar., 2012)

2.3.3 Propiedades superficiales

La textura es una propiedad relevante para el buen funcionamiento y la manejabilidad del concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido. La textura

juega un papel fundamental en la adherencia de las partículas con la pasta de cemento, puesto que permite tener un área superficial de mayor o menor tamaño.(Solar., 2012)

2.3.4 Impurezas

Debido a la exposición que debe soportar el agregado, la capa superficial puede estar formada por elementos químicos que son perjudiciales para el concreto aunque la roca sea del mejor estado, estas impurezas pueden llegar a ser tan perjudiciales para el concreto que hasta pueden llegar a retardar el proceso de fraguado y el endurecimiento del mismo.(Solar., 2012)

2.3.5 Propiedades físicas y mecánicas

Existen diferentes propiedades físicas de los agregados que son de suma importancia en la resistencia del concreto en estado endurecido:

- **Peso Volumétrico:** es una propiedad que depende de diferentes variables tales como: Humedad, gravedad específica, forma y textura de la muestra. El Peso volumétrico, se determina de la siguiente manera:

$$\text{Peso Volumétrico} = \frac{\text{Peso Agregado}}{\text{Volumen de partículas}}$$

Ecuación 1, Peso Volumétrico.

- **Durabilidad:** Se refiere a la propiedad que poseen las rocas y los agregados en general al estar expuestos a la intemperie, lo que implica cambios de temperatura, humedad y salinidad, entre otros.(Castaño., 2009)

- Resistencia a la Abrasión: Esta propiedad se refiere a la resistencia de los agregados al desgaste por impacto, fricción o rozamiento. También depende de la forma y textura de la partícula.(Castaño., 2009)

- Propiedades Térmicas: Dependiendo el lugar, la temperatura puede variar significativamente, lo que puede causar fisuras debido a la dilatación que se puede presentar en el concreto.(Castaño., 2009)

2.3.6 Propiedades químicas y mineralógicas

Si los agregados poseen alguna especie de compuesto químico este reaccionará directamente con los álcalis del cemento, ésta reacción puede producir una especie de hinchamiento en el concreto hasta fisurarlo de algún modo.(Solar., 2012)

Estas propiedades dependen de tres tipos de procesos geológicos principalmente:

- a. Tipo de roca: Ígnea, metamórfica o sedimentaria.
- b. Condiciones de sedimentación y transporte
- c. Procesos y modificaciones recientes: Se analiza la desintegración, el grado de alteración y el contenido de minerales que tiene la muestra actualmente.

2.3.7 Clasificación

Clasificación					
Arenas graves y naturales		Gravas y arenas trituradas		Agregados artificiales	
Arenas naturales	Gravas naturales	Gravas trituradas	Arenas trituradas	Agregados ligeros	Escorias de altos hornos
Partículas redondas (3mm)	Alta resistencia a la compresión triaxial	Trituración o molienda de la roca	Se obtienen al someter las rocas a un proceso de trituración o molienda.	Concreto de baja densidad, baja resistencia	Compuesto por silicatos de calcio que no son metales.
Tamaño granulométrico de 1 a 3mm para cimentar	Fragmentos de piedra de 3 a 70mm	Uso en la fabricación de concreto	Material puro, poca contaminación	Densidad de agregado variable siendo esta densidad mayor en los fragmentos de menor tamaño.	A pesar de tener porosidad grande no forma fragmentos estructuralmente fuertes.
					Peso unitario y densidad baja

Tabla 1, Clasificación Agregados.(Solar., 2012).

2.3.8 Especificaciones de los agregados gruesos para el concreto

Según la Norma Técnica Colombiana NTC 174, ICONTEC., (2000), se deben tener en cuenta una serie de requisitos para la utilización de los agregados en concretos hidráulicos.

Las características generales del componente a utilizar como agregado grueso, deben estar conformados así:

- Gravas naturales.
- Gravas trituradas.
- Roca triturada.
- Escoria de alto horno enfriada al aire.
- Concreto triturado, el cual es hecho con cemento hidráulico.
- Una combinación de los anteriores.

Para la utilización de concreto triturado como agregado grueso, se deben tener en cuenta una serie de precauciones adicionales, debido a que entran en juego diferentes variables que pueden afectar el desempeño del concreto.

En este caso, la demanda de agua puede aumentar debido a la porosidad y absorción del concreto triturado. De igual manera, dicho concreto triturado al encontrarse desgastado reduce la resistencia al ciclo hielo-deshielo y puede sufrir degradación mientras se manipula y se mezcla, afectando también las propiedades relacionadas con los vacíos de aire.

Granulometría

El agregado grueso a utilizar, debe cumplir los requisitos establecidos en la norma, para el porcentaje en masa requerido del tamaño especificado.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 174 (Quinta actualización)

Tabla 2. Requisitos de gradación para agregado grueso

Número del tamaño del agregado	Tamaño nominal (tamices de abertura cuadrada)	Material que pasa uno de los siguientes tamices (porcentaje en masa)												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm (No.4)	2,36 mm (No.8)	1,18 mm (No.16)
1	90 mm a 37,5 mm	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
2	63 mm a 37,5 mm	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
3	50 mm a 25,0 mm	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-
357	50 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	-	0-5	-	-
4	37,5 mm a 19,0 mm	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-	-
467	37,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	0-5	-	-
5	25,0 mm a 12,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-10	0-5	-	-	-
56	25,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5	-	-
57	25,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-80	-	0-10	0-5	-
6	19,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5	-	-
67	19,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5	-
7	12,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	-
8	9,5 mm a 2,36 mm (No.8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30	0-10	0-5

Tabla 2, Requisitos de gradación para agregado grueso. NTC 174 (ICONTEC., 2000).

Sustancias Dañinas

Debido a que las condiciones atmosféricas cambian según el lugar en el que se vaya a realizar la construcción, es necesario que el productor del agregado designe una clasificación clara, basándose en la resistencia a la abrasión, meteorización y otros aspectos relacionados con condiciones externas al encontrarse el material expuesto.

Por esto, también es necesario obtener información pluviométrica para ser utilizado como guía para estimar las condiciones de humedad y temperatura de la zona, y así establecer el número de ciclos de hielo-deshielo que se puedan presentar.

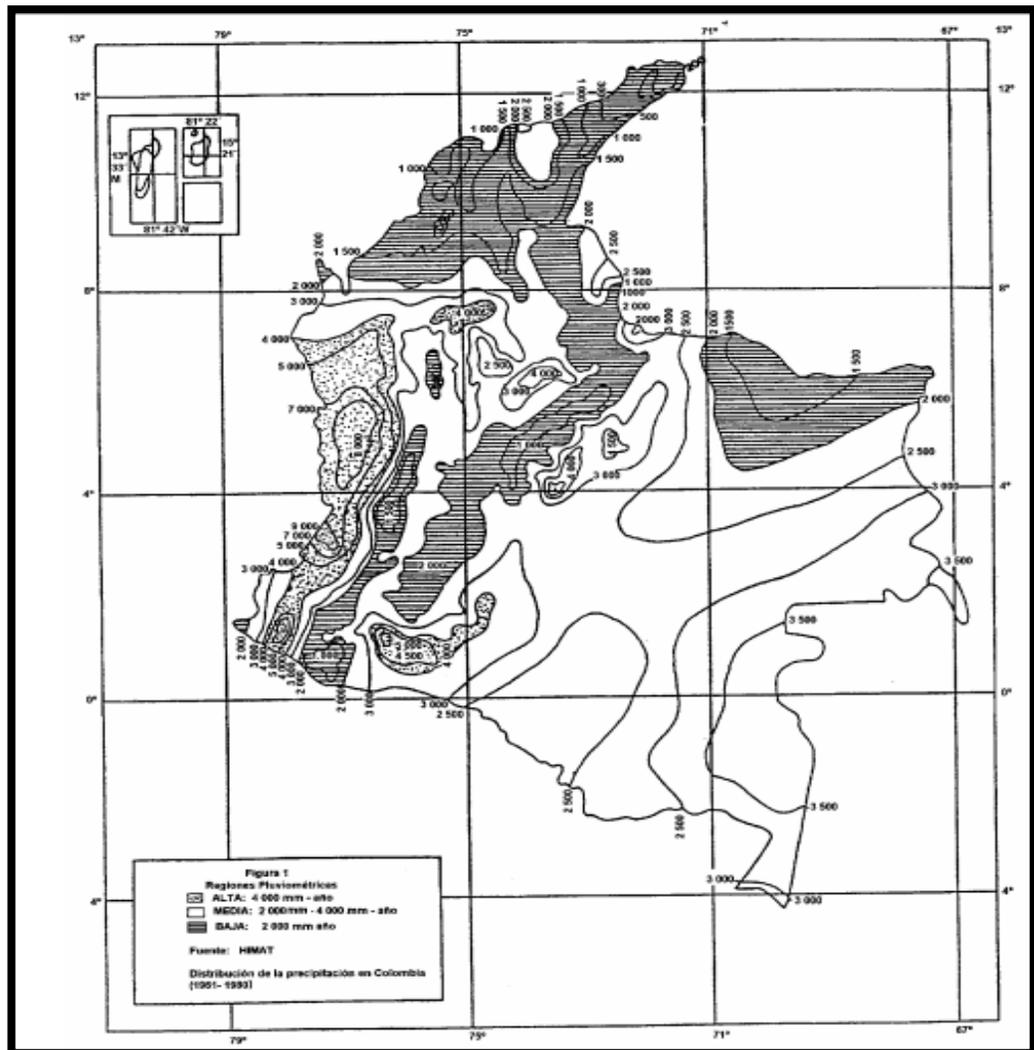


Ilustración 2, Localización de las regiones pluviométricas. NTC 174 (ICONTEC., 2000).

El agregado grueso no debe llevar consigo ningún tipo de material, que pueda reaccionar perjudicialmente con los alcalis del cemento, mucho menos si dicho material se va a utilizar en un lugar en el que se presente una humedad permanente, esto debido a que se puede presentar una expansión excesiva del cemento.

A continuación se presentan los límites para sustancias dañinas y requisitos de las propiedades físicas del agregado grueso para concreto.

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO TRATADO CON LECHADAS POBRES.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 174 (Quinta actualización)

Tabla 3. Límites para sustancias dañinas y requisitos de las propiedades físicas del agregado grueso para concreto

Nota. Véase la Figura 1 para la localización de las regiones pluviométricas y la Nota 8 para orientación sobre el uso del mapa.
 (S) Alta - Región pluviométrica alta- Índice pluviométrico mayor de 4 000 mm-año
 (M) Media - Región pluviométrica media- Índice pluviométrico entre 2 000 mm- año y 4 000 mm- año
 (N) Baja - Región pluviométrica baja-Índice pluviométrico menor de 2 000 mm- año

Designación de clase	Tipo o localización de la construcción de concreto	Porcentaje máximo permitido						
		Terrones de arcilla partículas deleznales	Chert (c) (peso específico s.s.s. menor de 2,40)	Sumatoria de terrones de arcilla, partículas deleznales y cherts (peso específico s.s.s. menor de 2,40)	Material que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200)	Carbón y lignitos	Abrasión (a)	Sanidad por sulfato de magnesio (5 ciclos) (b)
REGIONES PLUVIOMÉTRICAS ALTAS								
1S	Zapatillas, cimientos, columnas y vigas que no están expuestas a las condiciones atmosféricas, losas internas que van a ser cubiertas.	10,0	---	---	1,0 (d)	1,0	50	---
2S	Pisos interiores sin cubierta	5,0	---	---	1,0 (d)	0,5	50	---
3S	Muros de fundación a nivel, muros de contención, estribos, pilas, vigas compuestas y vigas expuestas a las condiciones atmosféricas.	5,0	5,0	7,0	1,0 (d)	0,5	50	18
4S	Pavimentos, puentes de tablero superior, vías de acceso, bordillos, andenes, patios, garajes o parqueaderos, corredores o estructuras ribereñas sujetas a humedecimiento frecuente.	3,0	5,0	5,0	1,0 (d)	0,5	50	18

Continúa...

Tabla 3, Límites para sustancias dañinas y requisitos de las propiedades físicas del agregado grueso para concreto. (ICONTEC., 2000).

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 174 (Quinta actualización)

Tabla 3. (Continuación)

Designación de clase	Tipo o localización de la construcción de concreto	Porcentaje máximo permitido						
		Terrones de arcilla partículas deleznales	Chert (c) (peso específico s.s.s. menor de 2,40)	Sumatoria de terrones de arcilla, partículas deleznales y Cherts (peso específico s.s.s. menor de 2,40)	Material que pasa el tamiz 75 µm (No.200)	Carbón y lignitos	Abrasión (a)	Sanidad por sulfato de magnesio (5 ciclos) (b)
5S	Concreto arquitectónico exterior	2,0	3,0	3,0	1,0 (d)	0,5	50	18
Regiones pluviométricas medias								
1M	Zapatillas, cimientos, columnas y vigas que no están expuestas a las condiciones atmosféricas, losas internas que van a ser cubiertas.	10,0	---	---	1,0 (d)	1,0	50	---
2M	Pisos interiores sin cubierta.	5,0	---	---	1,0 (d)	0,5	50	---
3M	Muros de fundación a nivel, muros de contención, estribos, pilas, vigas compuestas y vigas expuestas a las condiciones atmosféricas.	5,0	8,0	10,0	1,0 (d)	0,5	50	18
4M	Pavimentos, puentes de tablero superior, vías de acceso, bordillos, andenes, patios, garajes o parqueaderos, corredores, o estructuras ribereñas sujetas a humedecimiento frecuente.	5,0	5,0	7,0	1,0 (d)	0,5	50	18

Tabla 4, Continuación. (ICONTEC., 2000).

Tabla 3. Final

Designación de clase	Tipo o localización de la construcción de concreto	Porcentaje máximo permitido						
		Terrones de arcilla partículas deleznales	Chert (c) (peso específico s.s.s. menor de 2,40)	Sumatoria de terrones de arcilla, partículas deleznales y Cherts (peso específico s.s.s. menor de 2,40)	Material que pasa el tamiz de 75 µm (No.200)	Carbón y lignitos	Abrasión (a)	Sanidad por sulfato de magnesio (5 ciclos) (b)
5M	Concreto arquitectónico exterior.	3,0	3,0	5,0	1,0(d)	0,5	50	18
Regiones Pluviométricas bajas								
1N	Losas sujetas a la abrasión del tráfico, puentes de tablero superior, pisos, andenes, pavimentos.	5,0	--	--	1,0(d)	0,5	50	--
2N	Todas las demás clases de concreto.	10,0	--	--	1,0(d)	1,0	50	--

Tabla 5, Final. (ICONTEC., 2000).

2.4 AGREGADO RECICLADO

El agregado reciclado es un material resultante del procesamiento de materiales de construcción desechados, para así extender su vida útil y generar aprovechamiento del mismo.



Ilustración 3, Agregados Naturales (Izq.), Agregados Reciclados (Der.).(Castaño., 2009).

En Ingeniería Civil, siempre se busca un balance equitativo entre la economía y la confiabilidad estructural de cualquier tipo de obra civil, sin embargo, en la actualidad existe un aspecto de suma importancia y relevancia que se debe tener en cuenta en las etapas de pre- factibilidad y factibilidad de cualquier tipo de proyecto. Este aspecto se refiere a que las construcciones sean amigables con el medio ambiente mitigando así el daño producido por los diferentes procesos industriales llevados a cabo.

2.5 PROPIEDADES Y CLASIFICACION DE LOS AGREGADOS RECICLADOS PARA CONCRETO

2.5.1 Granulometría

La granulometría de los agregados reciclados está directamente relacionada con el tipo de trituración. Se recomienda una trituración primaria con trituradoras de mandíbulas, las cuales generaran un bajo porcentaje de finos. Si se desea un agregado reciclado de mejor calidad se debe recurrir a la trituración secundaria aunque el agregado reciclado producido tiene buena gradación con un porcentaje entre 70% y 90% de fracción gruesa. Según T. Yen., (1986), el material reciclado de fracción gruesa generalmente cumple a cabalidad los usos granulométricos establecidos por la norma ASTM, evidenciando así que cumple con una gradación adecuada.(Zaharieva et al., 2003)

Por causa del transporte y almacenamiento el agregado reciclado sufre una desintegración generando así material fino, el valor más común en porcentaje de este material esta entre el 0.5% y el 2%, en este se encuentra un alto contenido de mortero el cual afecta negativamente en las propiedades del concreto final. (León de los Ríos., 2012).

En la norma inglesa se establece en el 5% el límite de finos cuando el agregado reciclado proviene de concreto, y un 3% si dicho agregado proviene de material cerámico o una combinación de los dos, en la norma alemana establece la limitación al 4% y en la norma belga establece la cantidad límite de finos a un 5% si su origen es cerámico, esta cantidad se reduce al 3% si el origen es de concreto. De los porcentajes anteriores se dice

que en promedio el máximo límite de finos permitido es del 5% en la mayoría de países con normas para ARC.

2.5.2 Forma y textura superficial

Los agregados reciclados, debido a su manera de producción, presentan diferentes características de forma y textura que afectan directamente la cantidad de agua en la mezcla y por consiguiente la manejabilidad de la misma; presentan caras fracturadas con textura rugosa y angular, y generalmente son de forma alargada. (Zaharieva et al., 2003).

El coeficiente de forma depende directamente del sistema de trituración implementado en la producción de agregados reciclados, según Marmash., (2011) la trituración realizada con machacadoras de mandíbulas, produce ARC con forma más apropiada para la fabricación de concreto en comparación del agregado producido con machacadoras cónicas o de impacto.

Sin embargo, la variación de coeficiente de forma entre ARC y AN no es de gran magnitud, en estudios consultados por Sánchez De Juan M., (2005) se encuentran valores entre el 0,17% y el 0,35%, siendo el límite recomendado en la norma española del 0,2%.

2.5.3 Mortero adherido

Una de las principales cualidades de los ARC que establece una diferencia con respecto al agregado natural es la cantidad de mortero adherido. El material de demolición incluso después del proceso de trituración, lleva consigo una cantidad significativa de dicho mortero, el cual es de suma relevancia en las propiedades físicas del concreto.

Analizando los resultados obtenidos por Hansen., (1986), del cálculo de volumen de mortero adherido, se evidencia la relación existente entre la cantidad de mortero y los diferentes tamaños de fracciones de los ARC, como se muestra en la siguiente ilustración:

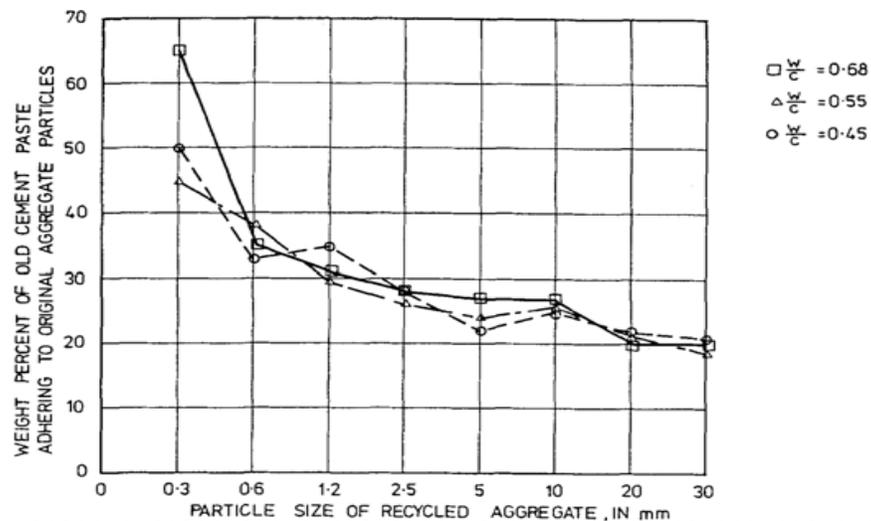


Ilustración 4, Mortero adherido en AR de hormigones con diferente relación agua-cemento (Hansen., 1986).

Se encuentra mayor cantidad de mortero adherido a medida de que las partículas del ARC son menores, por esto se recomienda utilizar únicamente la fracción gruesa para los concretos reciclados, debido que el alto contenido de partículas de mortero adherido puede provocar diferentes efectos en la calidad de las características físicas tanto de los ARC como del concreto.

A continuación se presentan los datos de índice de mortero adherido que Hansen ., 1986) ilustró para diferentes tipos de tamaño de fracción del agregado reciclado:

TAMAÑO FRACCIÓN	INDICE PORCENTAJE MORTERO ADHERIDO
4mm-8mm	60%
8mm-16mm	40%
16mm-32mm	30%

Tabla 6. Datos de índice de mortero adherido.(Hansen., 1986).

También se encuentran otros autores como Vázquez E., (2002), el cual mediante estudios determinó un IMA de 40.5% - 49,5% para fracciones de 10mm-20mm, y hasta el 30,8% para fracciones de 4mm-16mm. De igual manera Ravindrarajah., (1998) encontró un IMA de 20% para fracciones de 20mm-30mm, y hasta el 45%-65% para fracciones menores a 0,3mm.

2.5.4 Densidad

El mortero adherido a la superficie del agregado reciclado genera una característica porosa en él, causando así que la densidad del agregado reciclado sea menor a la densidad del agregado natural. (Zaharieva et al., 2003).

La resistencia del concreto de donde fue extraído el agregado reciclado tiene una alta influencia en la densidad de este material, puesto que para una misma cantidad de mortero adherido, los agregados obtenidos de concretos con una mayor resistencia generan una mayor densidad.

Hansen., (1985), expone que el agregado reciclado debido a su alto contenido de mortero adherido, éste llega a alcanzar una densidad cerca del 5% al 10% menor a la del agregado natural. La densidad también se ve afectada con respecto al tamaño del agregado, debido a que si se reduce el tamaño, la densidad también se verá reducida. Se observó que en los tamaños inferiores hay mayor cantidad de mortero adherido.

Diferentes autores en varias investigaciones evidencian claramente la diferencia de estas densidades. Barra M., (1996) encontró una gran diferencia entre las densidades de los dos tipos de agregado (AN y ARC), en el agregado natural las densidades oscilan entre 2660 kg/m³ y 2680 kg/m³, en el agregado reciclado desciende a 2240 kg/m³- 2270 kg/m³.

Poon, Kou y Lam., (2002) en un estudio realizado a los agregados naturales gruesos y finos presentaron una densidad de 2570 kg/m³ y 2520 kg/m³ respectivamente, los agregados reciclados presentan una mayor diferencia, 2350 - 2470 kg/m³ y 2260 kg/m³ – 2390 kg/m³ los finos.

La densidad presenta según varios autores una dispersión bastante alta debido a que la densidad del ARC puede ser diferente para concretos de distinta procedencia. Según

Sánchez De Juan M., (2005), la densidad del agregado reciclado es generalmente mayor en las partículas más gruesas que en las más finas como se puede observar en la siguiente ilustración:

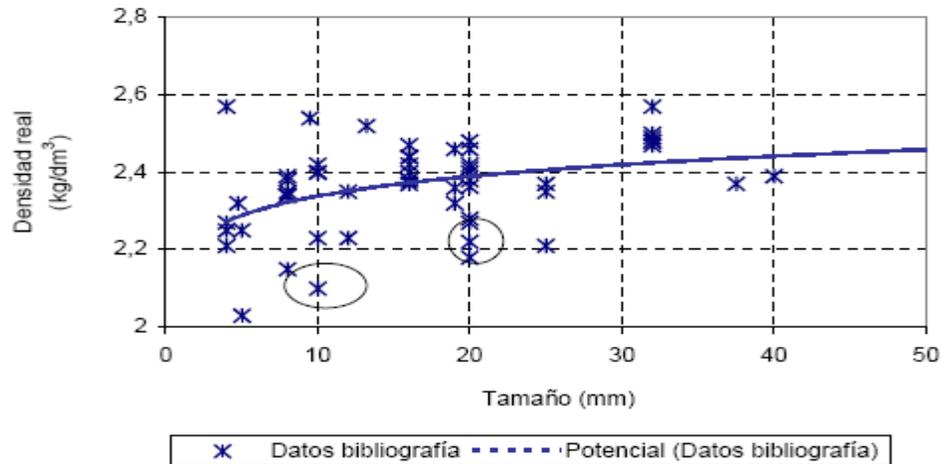


Ilustración 5, relación entre la densidad y el tamaño máximo del árido reciclado (Sánchez De Juan M., 2005).

2.5.5 Absorción

En comparación con los agregados naturales, la absorción en los ARC presenta un aumento significativo, lo cual es directamente influenciado por la alta porosidad tanto de las partículas de mortero adherido como la del porcentaje de material cerámico existente. La alta absorción de los ARC afecta directamente la manejabilidad de la mezcla por lo cual diferentes autores y varias normas extranjeras recomiendan pre-saturar los agregados antes de la producción de concretos. (Castaño., 2009)

La absorción también depende en gran parte de la calidad del concreto original de los ARC, si la relación agua-cemento con la que se fabricó dicho concreto es alta, suelen dar agregados reciclados con una menor densidad y mayor absorción; por lo mismo tanto Hansen ., (1986) como Ravindrarajah., (1998) ostentan que existirá una menor absorción

siempre que se utilicen ARC provenientes de concretos con resistencias altas (bajas relaciones agua-cemento).

Según Castaño., (2009), la absorción en los agregados naturales oscila entre 0% y el 4%, mientras que los ARC pueden aumentar estos valores en un 3% al 13%

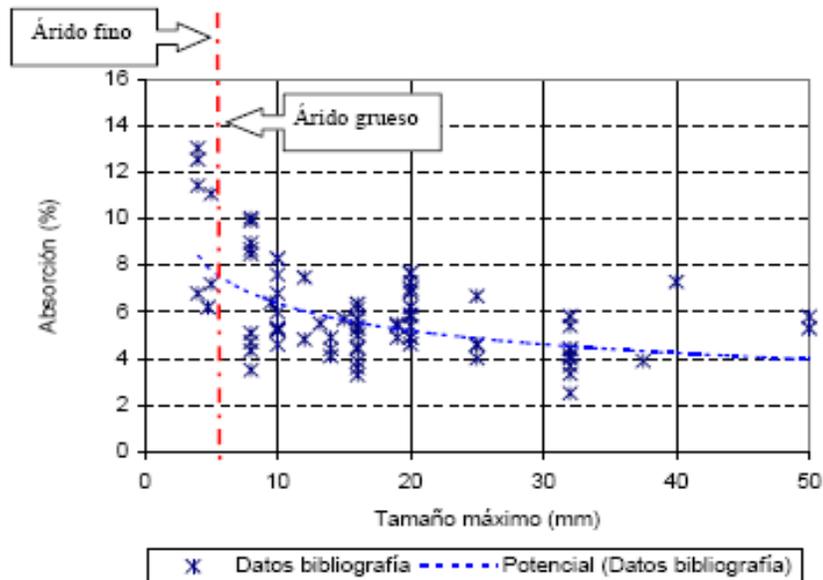


Ilustración 6, Relación entre la densidad y la absorción del árido reciclado grueso. (Sánchez De Juan M., 2005)

En los resultados obtenidos por Sánchez De Juan M., (2005) se encuentra que la absorción oscila entre el 4% y el 10% en agregados gruesos, designa y confirma que en agregados finos se presentan valores mayores.

Existe una correlación directa entre la densidad y la absorción de un ARC, varios autores coinciden en que a mayor densidad del material, se presentará una menor absorción, como se muestra en la siguiente ilustración:

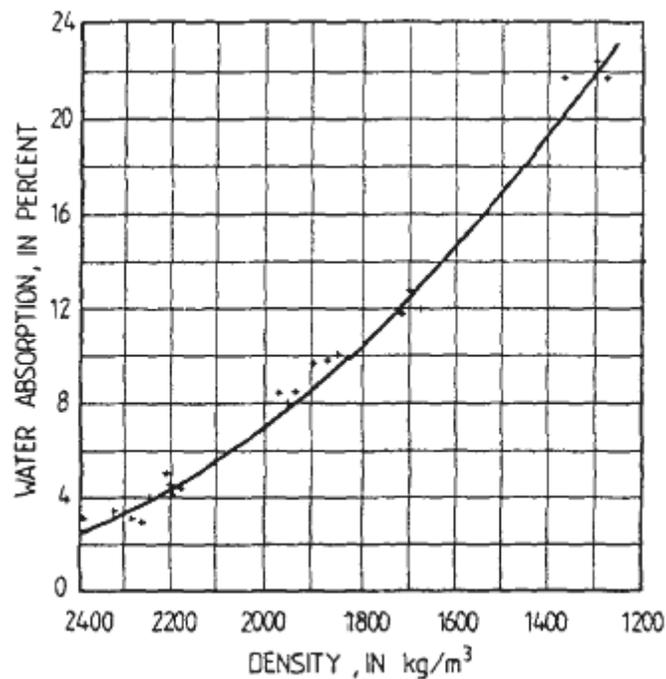


Ilustración 7, Absorción de AR en función de la densidad (Kreijger., 1983).

Por ejemplo Kreijger., (1983) encontró que existe una relación parabólica entre la densidad y la absorción de un ARC, en otras palabras, cuando la densidad es reducida debido a la adhesión del mortero, la absorción tiende a subir.

Ruhl M., (1997), evidenció que el tamaño del agregado y la cantidad de mortero adherido influyen directamente en la absorción, también encontró que la absorción alcanza un valor de 80% al 90% en los primeros 10 minutos de saturación del material, dicho valor concuerda con la recomendación de varios autores de saturar el ARC hasta un valor del 90% aproximadamente, con el fin de mejorar el desempeño y la manejabilidad del concreto.

Por su parte, Sánchez De Juan M., (2005) tras una serie de estudios, deduce que la fracción gruesa de los ARC refleja una buena correlación entre la densidad relativa del material y la absorción, como se muestra en la siguiente ilustración:

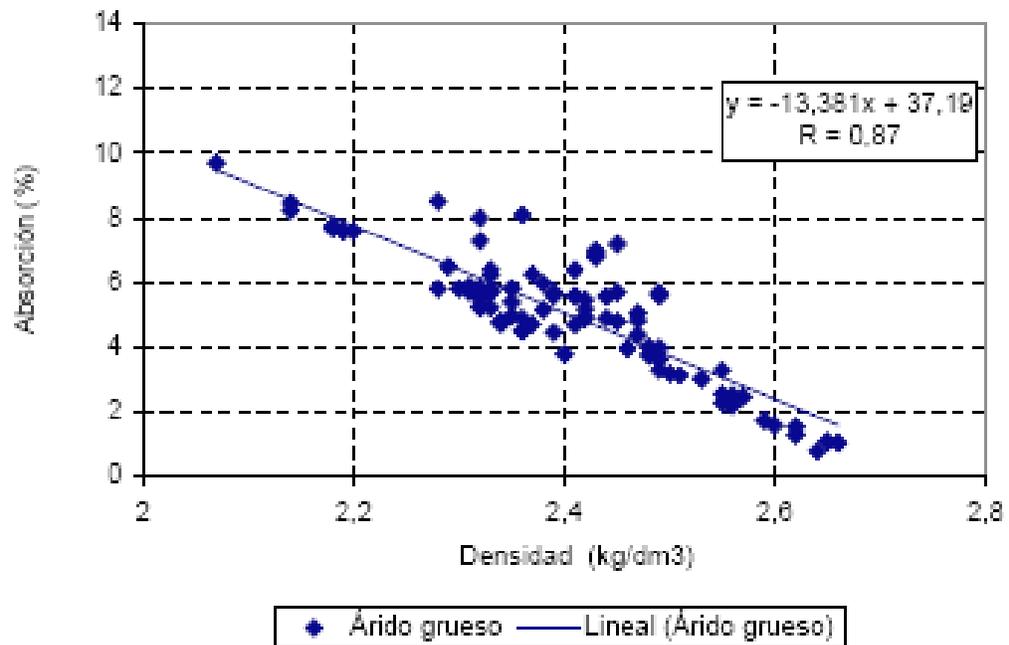


Ilustración 8, relación entre la densidad y la absorción del árido reciclado grueso. (Sánchez De Juan M., 2005)

Por su parte, Sánchez De Juan M., (2005) tras una serie de estudios, deduce que la fracción gruesa de los ARC refleja una buena correlación entre la densidad relativa del material y la absorción.

Existen diferentes recomendaciones, normativas y especificaciones acerca del uso de los ARC, en donde se establecen valores de absorción y densidad (entre otras propiedades físicas) permitidos para la producción de una mezcla de concreto eficiente. A continuación se presenta una tabla que expone la absorción máxima y la densidad mínima que deben tener los AR en diferentes países.

NORMAS O ESPECIFICACIONES		ABSORCIÓN MAXIMA (%)	DENSIDAD MINIMA (Kg/m ³)
PAIS	TIPO AR		
JAPÓN	Tipo 1	3	2200
	Tipo 2	5	
	Tipo 3	7	
ALEMANIA	Tipo 1	10	2000
	Tipo 2	15	
	Tipo 3	20	1800
	Tipo 4	-	1500
BÉLGICA	GBSB 1	18	160
	GBSB 2	9	2100
RILEM	Tipo 1	20	1500
	Tipo 2	10	2000
	Tipo 3	3	2400
HONG KONG	-	10	2000
ESPAÑA	-	7	-
BRASIL	-	12	-
AUSTRALIA	-	8	2100

Tabla 7, Normas o especificaciones de distintos países con respecto a la absorción máxima y la densidad mínima (Sánchez De Juan M., 2005).

2.5.6 Resistencia a la abrasión

Generalmente el agregado reciclado presenta un valor de coeficiente de los Ángeles de resistencia a la abrasión mayor que el agregado natural debido a que las partículas de mortero adherido se desprenden durante el ensayo (Fonteboa., 2002).

La abrasión en la Máquina de los Ángeles según Hansen T.C., (1983) y Fonteboa., (2002), es mayor cuando la resistencia del concreto reciclado es menor, debido a la baja resistencia del mortero adherido. Es complicado predecir el comportamiento del agregado en el ensayo de abrasión porque éste depende en su mayoría del tamaño de la partícula, la calidad del agregado reciclado, la cantidad de mortero adherido, y la calidad

del mortero. Generalmente los valores de coeficiente de los Ángeles se encuentran en un rango entre el 25% y el 40% , (Sánchez De Juan M., 2005).

A continuación se presentarán algunos resultados obtenidos por autores del coeficiente de los Ángeles comparando el agregado natural con el agregado reciclado:

Autor	Fracción de árido	Árido natural	Árido Reciclado
Ravindrarahah (1987)	5mm – 37.5mm	18.10%	37.00%
Barra (1996)	12mm - 20mm	24.70%	31.00%
	6mm – 12mm	20.40%	29.50%
González (2002)	12mm - 25mm	27%	34.00%
Sánchez (2005)	4mm - 16mm	35.80%	38.90%

Tabla 8, Coeficiente de los Ángeles, comparativo árido natural – árido reciclado. Tomado de (Castaño., 2009).

2.5.7 Contaminantes e Impurezas

Los contaminantes que son encontrados generalmente en los agregados reciclados son variados, como madera, plástico, vidrio, cerámica, asfalto, materia orgánica, aluminio, etc. Estos contaminantes generan un problema dado que intervienen negativamente en las propiedades del concreto reciclado.

El agregado reciclado procedente de material de escombros de concreto presenta menos impurezas y contaminantes que el producido por escombros de obra, éstas impurezas generan una disminución en la resistencia del concreto, aparte de la disminución en la resistencia se evidencian más problemas tales como reacciones álcali-agregado (vidrio), ataque por sulfatos (yeso), desprendimientos superficiales (madera o papel), elevada retracción (arenas arcillosas) o mal comportamiento hielo-deshielo (ladrillos).(Rueda., 2011)

Existen diferentes normas que proporcionan el máximo contenido de impurezas en porcentaje de proporción en masa para los diferentes materiales que componen el agregado reciclado.

La norma BS 8500-2:02. “Specification for Constituent Materials and Concrete” diferencia el agregado reciclado proveniente de concreto (RCA) y el de escombros o residuos de obra (RA), como se muestra en la tabla 8, a continuación:

ELEMENTOS	MAXIMO CONTENIDO DE IMPUREZAS % PROPORCIÓN EN MASA	
	RCA	RA
Material cerámico	5	100
Partículas ligeras	0.5	1
Asfalto	5	10
Otros materiales (vidrio, plástico, metales, etc.)	1	1

Tabla 9, Composición de los agregados reciclados según la norma BS8500-2:02.

La norma japonesa Bureau., (2002), establece los valores máximos de contenido de impurezas en función de su naturaleza, como se muestra en la tabla 9, a continuación:

ELEMENTOS	MAXIMO CONTENIDO DE IMPUREZAS EN PROPORCIÓN DE MASA
Contenido de yeso u otras impurezas de densidad < 1950 kg/m ³	10 kg/m ³
Contenido de asfalto, madera, plásticos, papel, pintura y otras partículas retenidas en el tamiz 1,2mm o densidad < 1200 kg/m ³	2 kg/m ³

Tabla 10, Composición de los agregados reciclados según la norma japonesa. Bureau., (2002)

La norma alemana DIN 4223 presenta el contenido de impurezas del agregado reciclado según lo muestra la siguiente tabla:

ELEMENTOS		MAXIMO CONTENIDO DE IMPUREZAS %			
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4
Hormigón, áridos minerales en conformidad con DIN 4226-1		≥90	≥70	≤20	≥80
Clinker, cerámicos sin poros.		≤10	≤30	≥80	
Gres calcáreo				≤5	
Contenido de materiales como cerámicos o concreto ligero o poroso, estuco, cemento, escoria porosa o pumita.		≤2	≤3	≤5	≤20
Contenidos externos	Asfalto	≤1	≤1	≤1	
	Mineral: como vidrio, cerámicos, escoria de metal o yeso de estuco.	≤2	≤2	≤2	≤2
	No mineral: como goma (caucho), materia plástica artificial, metal, madera, restos de plantas, papel u otros materiales.	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤1

Tabla 10, Composición de los agregados reciclados según la norma DIN 4223.

2.5.8 Clasificación Internacional

Clasificación según la norma de Estados Unidos

- A. Residuos de agregados reciclados procedentes de demoliciones, mezcla de concreto y residuos cerámicos tratados, con presencia de elementos contaminantes.
- B. Residuos de demolición clasificados y limpios, mezcla de concreto y residuos cerámicos tratados, sin presencia de elementos contaminantes.
- C. Residuos cerámicos limpios. Se componen de restos de ladrillos triturados que contienen menos del 5% de concreto.
- D. Residuos de concreto limpios. Se componen de restos de concreto triturados que contienen menos de 5% de restos de ladrillo.

La RILEM (Unión internacional de laboratorios y expertos en materiales de construcción), señala tres tipos de agregados reciclados (Wainwright., 1994):

TIPO I: Agregados procedentes en mayoría de fábrica de ladrillo (árido cerámico).

TIPO II: Agregados procedentes en su mayoría de residuos de concreto con un contenido máximo de residuos cerámicos de 10%.

TIPO III: Agregados compuestos por una mezcla de agregados naturales mayor del 80%. El resto puede estar integrado por un 10% como máximo de agregados tipo I o hasta un 20% de agregados tipo II.

Clasificación Norma Japonesa

En Japón se clasifica el material en función de su utilización para obras civiles, en tres tipos de calidad, regulados por las normas JIS A 5021, JIS A 5022 y JIS A 5023:

Tipo H: Concreto en masa o armado con fin estructural. Mayor calidad.

Tipo M: Concreto en masa o losas de concreto.

Tipo L: Concreto pobre.

Clasificación de acuerdo con especificaciones Belgas

Clasifican respecto al origen del agregado, similares a las Rilem

GBSB I: Originarios de residuos cerámicos

GBSB II: Originarios de residuos de concreto

Clasificación Normal Inglesa BS 8500:02

Clasificación según el origen del agregado.

RCA: Agregados procedentes de concreto

RA: Agregados procedentes de materiales cerámicos o mezcla de ambos.

Clasificación del Building Research Establishment

Se han producido guías sobre el uso de agregados reciclados, como el Digest 433, el cual realiza una clasificación de acuerdo al RILEM.

RCA I: Agregados procedentes de mampostería.

RCA II: Agregados originarios de concreto con contenido de ladrillo entre 0-10%.

RCA III: Agregados procedentes de concreto y mampostería, con contenidos de ladrillo entre 0-50%.

Clasificación Norma alemana DIN 4223

Clasificación por el contenido de los residuos.

Tipo 1: Agregados originarios de concreto >90%, con contenidos < 10% de Clinker, mampostería o arenisca calcárea.

Tipo 2: Agregados originarios de concreto >70%, con contenidos < 30% de Clinker, mampostería o arenisca calcárea.

Tipo 3: Agregados originarios de residuos cerámicos >80%, con contenidos de materiales procedentes de concreto <20%.

Tipo 4: Agregados procedentes de mezclas de RCD, con contenidos >80% de materiales originarios de concreto o productos cerámicos.

Norma Alemana NEN 5905 clasificación

Tipo 1: Agregados reciclados de concreto

Tipo2: Mezcla de agregados reciclados de concreto y agregado cerámico.

Tipo3: Agregados reciclados cerámicos.

2.5.9 Proceso agregado reciclado

Por otra parte, en la mayoría de los casos se utilizan materiales que podrían ser denominados de primera generación, los cuales después de su utilización y al acabar su vida útil se transforman en un desecho, el cual se utiliza para rellenos y obras menores o en su defecto simplemente como basura. Lo que se plantea en el panorama nacional e internacional es que a dicho residuo después de someterlo a algún proceso de transformación y clasificación, se le pueda prolongar su vida útil para así convertirlo en un material de segunda generación, el cual puede ser reemplazado en algunos porcentajes por el de primera generación, siendo más óptimo si los dos materiales fueran de un origen similar (C.J. Mendoza y I.E. Martínez., 2005).

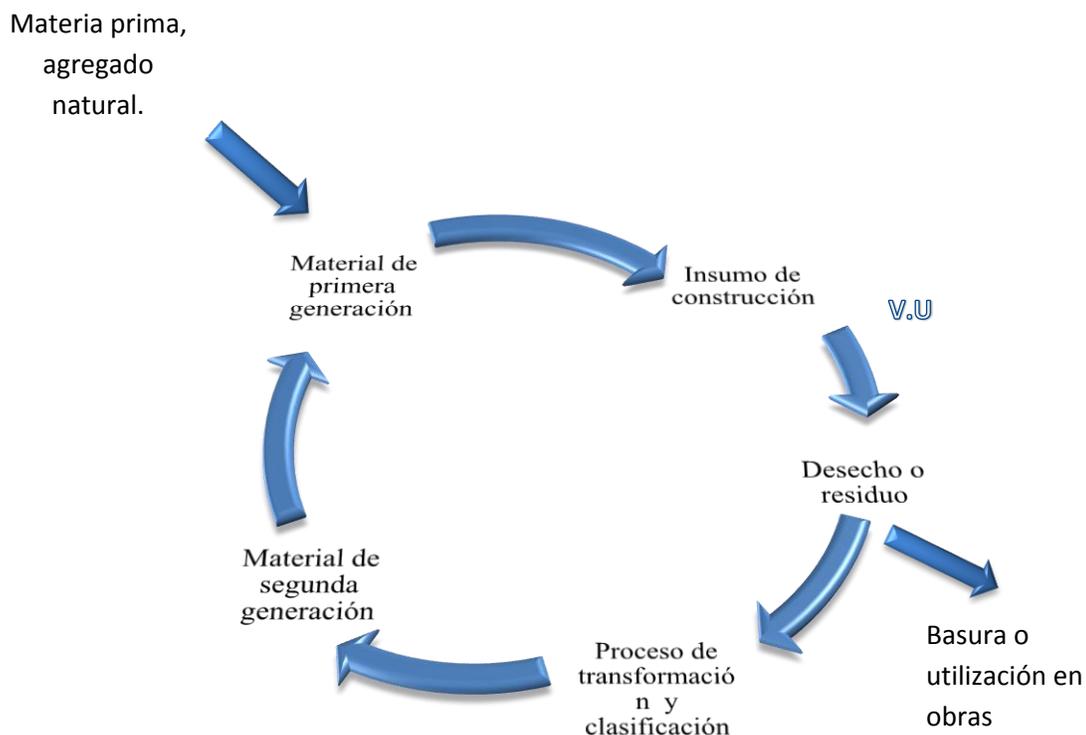


Ilustración 9, Proceso agregado reciclado. (Beltrán y Borrego., 2014).

El proceso de transformación y clasificación del agregado reciclado tiene como finalidad la separación del material inservible que se encuentra adherido, la trituración y la separación por tamaños del material a obtener.

Como materia prima para la elaboración del material de segunda generación, se pueden recibir escombros de diferentes composiciones y tipos de obras, por lo que es necesario tener en cuenta dichos aspectos al momento de clasificarlos. Además, los RCD pueden clasificarse también según la actividad en la que se producen. Dichas actividades son:

- Construcción.
- Demolición.
- Reparación.

En la tabla 11, se muestra la clasificación aproximada de los diferentes RCD's que se pueden generar, estableciendo los posibles materiales que pueden llevar consigo, y algunas descripciones de los mismos. (Velázquez., 2004).

Actividad	Objeto	Componentes principales	Observaciones
Demolición	Viviendas Otros edificios Obras publicas	-Antiguas: mamposteria,ladrillo, madera, yeso,tejas -Recientes: ladrillo hormigon, hierro,acero,metales y plasticos -Industriales: hormigon, acero,ladrillo, mamposteria. -Servicios:hormigon, ladrillo,mamposterio,hierro, madera.	Los materiales dependen de la edad del edificio y del uso del cocreto del mismo en el caso de los de servicios. Los materiales dependen mucho de la edad y el tipo de infraestructura a demoler. No es una actividad frecuente.
Construcción	-Excavación -Edificación y obras publicas -Reparación y mantenimiento - Reconstrucción y rehabilitacion	-tierras -hormigón,hierro, acero, ladrillos, bloques,tejas , materiales cerámicos, plasticos, materiales no ferreos. -suelo,roca,hormigon, productos bictuminosos. -viviendas: cal,yeso,madera,tejas,materiales ceramicos, pavimentos, ladrillos. -otro: hormigón, acero, mampotería, ladrillo, yeso, cal, madera.	Normalmente se reutilizan en gran parte. Originados básicamente por recortes, materiales rechazados por su inadecuada calidad y rupturas por deficiente manipulacion. Generación de residuos poco significativa en el caso de edificación.

Tabla 11, Clasificación de los RCD de acuerdo con el tipo de actividad. (Velázquez., 2004).

Otro ítem de clasificación de RCD's importante es la edad de las construcciones o edificaciones que los producen, debido que esto evidencia la calidad de los materiales obtenidos.

Sin embargo, en algunos países se tiene como practica tradicional evaluar y retirar antes de proceder a la demolición materiales que puedan ser reutilizados sin necesidad de destruirlos o tratarlos, como por ejemplo, todo lo relacionado con la carpintería metálica o en madera (puertas, ventanas, escaleras y pisos entre otros), tuberías

metálicas y conducciones, y algunos elementos en cerámica. De igual manera, se acostumbra transportar y desechar los RCD en lugares cercanos al foco de demolición.

2.5.10 Etapas de producción de agregado reciclado grueso a partir de los RCD

En la actualidad existen diferentes países que ya cuentan con plantas especializadas en el reciclaje y tratamiento de RCD's, las cuales cobran por el servicio de recibir desechos teniendo en cuenta que esta va a ser su materia prima.

Normalmente la manera en la que trata dicho material, es mediante trituradoras portátiles que están conformadas por una quijada de trituración primaria, la cual arroja el material a una banda magnética transportadora en donde se separan los materiales féreos, luego el material es conducido a un cono de trituración secundaria acompañado de un tamiz, el cual está equipado con un vibrador.(Velázquez., 2004)

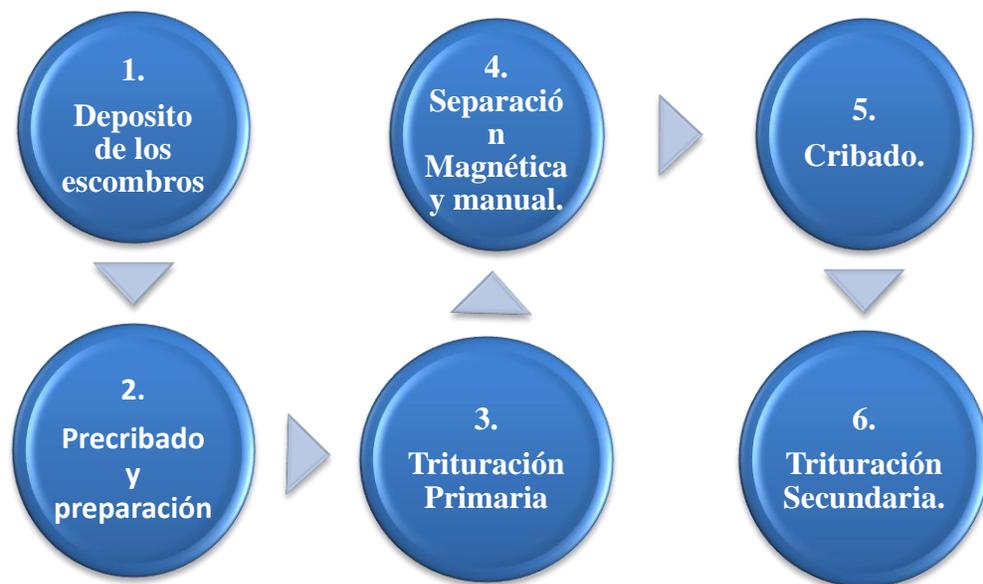


Ilustración 10, Etapas de producción de agregado reciclado grueso a partir de los RCD. (Beltrán y Borrego., 2014).

1) Depósito de los escombros.

Se depositan los viajes de escombros en diferentes pilas, haciendo una preclasificación según el tipo y origen de los desechos. Usualmente el material lleva consigo piezas grandes de madera, vidrios, plásticos entre otros, los cuales pueden retirados manualmente; también se encuentran bloques de concreto con acero incrustado, los cuales deben ser reducidos por medio de una excavadora hidráulica o un bulldozer, con el fin de poder introducir el material al sistema de reciclado que tiene un tamaño máximo de entrada. (Velázquez., 2004).

2) Pre-cribado y preparación.

Antes de proceder a la trituración del material, se somete a un pre-cribado con el fin de controlar el tamaño final que se desea obtener. Usualmente el material lleva consigo piezas grandes de madera, vidrios y plásticos entre otros, los cuales pueden retirados manualmente; también se encuentran bloques de concreto con acero incrustado, que deben ser reducidos por medio de una excavadora hidráulica o un bulldozer, con el fin de poder introducir el material al sistema de reciclado que tiene un tamaño máximo de entrada. (Velázquez., 2004).

3) Trituración Primaria.

Después de realizar la preparación previa del material, se procede a verterlo por la primera abertura de trituración, para esto primero se pasa por una malla la cual retiene el material que necesita trituración primaria y deja pasar el que no necesita, el tamaño de dicha malla depende del tamaño máximo que se quiera establecer para el agregado grueso.

En la trituradora de quijadas es necesario verificar que no entre material férreo o de madera de tamaño superior a la abertura, debido a que puede causar obstrucciones.

4) Separación magnética y manual.

Luego de retirar el material férreo posible en las quijadas de trituración primaria, este es conducido por unas bandas transportadoras que salen de las quijadas, las cuales poseen separadores magnéticos, que se encargan de atraer y retirar el acero del material. Inmediatamente se debe supervisar y retirar manualmente elementos plásticos o metálicos que no alcanzaron a ser atraídos por los magnetos. En algunos casos con el fin de evitar el colapso de actividades por obstrucciones, se separan los dos procesos, el proceso primario del secundario.

5) Cribado y separación de impurezas ligeras.

El material triturado se pasa a través de mallas con un tamaño de abertura determinado, dicha abertura depende del tamaño mínimo que se quiera establecer para el agregado grueso. En algunos casos en esta etapa del proceso, se utilizan sistemas industrializados para seleccionar y eliminar impurezas ligeras que puedan estar presentes en el material, dichos sistemas consisten en una tolva o escurridor helicoidal que se encarga de seleccionar y separar impurezas mientras escurre el material lavado, para así pasar directamente a trituración secundaria.

6) Trituración Secundaria.

Por último, el material retenido en el proceso de cribado, es seleccionado para realizarle una segunda trituración, el material que pasa es el producto final que se desea obtener.

2.5.11 Experiencia Internacional

Es tema de alta prioridad en todo el mundo el uso del RCA en las obras civiles. En Gran Bretaña el 10% de los agregados con RCA son utilizados para fines estructurales, en 1994 se utilizaron 78.000 toneladas de RCA en Holanda. Alrededor de todo el mundo se han generado un sin número de investigaciones acerca del RCA para la producción de concreto de alta calidad, recomendando sustituir solo hasta el 30% del agregado grueso.(Oikonomou., 2005).

En algunos países de la Unión Europea se están consiguiendo niveles aceptables de reciclaje. A continuación en la tabla 12 se presentan las cifras de producción de residuos de demolición y construcción de algunos países de la Unión Europea (Velázquez., 2004):

PAIS	PRODUCCION (MILES DE TONELADAS)	PRODUCCION PER.-CAPITA (Kg.-Hab.-año)
ALEMANIA	53.000	880
BELGICA	7.000	700
DINAMARCA	6.500	1.275
ESPAÑA	11.000	285
FRANCIA	30.400	580
HOLANDA	14.000	940

Tabla 12, Cifras de producción de residuos de demolición y construcción en algunos países de la Unión Europea. Tomada de la Tesis (Velázquez., 2004).

2.6 CONCRETO RECICLADO

Se define como el concreto realizado con agregado reciclado procedente de concreto o de escombros de obras civiles, las propiedades de este concreto son completamente diferentes a las de concreto convencional principalmente en la baja densidad y la alta absorción.(Castaño., 2009)

2.7 PROPIEDADES DEL CONCRETO RECICLADO

Tanto en estado fresco como en endurecido, existen diferentes variaciones en las propiedades del concreto debido a la inclusión del RCD. La alta absorción de los agregados reciclados, provoca un cambio significativo en la relación agua-cemento lo cual afecta diferentes propiedades.

2.8 ESTADO FRESCO

2.8.1 Consistencia

Según Limbachiya y Roberts., (2004) Debido a que el RCD posee una densidad entre 4-8% más baja que el natural y una mayor capacidad de absorber agua, la mezcla presenta una disminución en el asentamiento y por ende una mayor dificultad en la manejabilidad del concreto, todo esto para mezclas con porcentajes alrededor del 50% de RCD. También encontró que para porcentajes mayores al 50% de sustitución de agregados, se presenta mayor variabilidad en la estabilidad de la mezcla.

Por otro lado, Castaño., (2009) y Hansen., (1983) entre otros, concluyen que para obtener la misma manejabilidad y docilidad que presenta un concreto estándar, se debe incluir aproximadamente un 5% más de agua en la mezcla. Es aconsejable no utilizar el RCD en condiciones secas, debido a que la manejabilidad disminuye considerablemente por la alta absorción del agregado.

En un estudio, Nealen A., (1997) evidenció la disminución de trabajabilidad en un concreto reciclado comparándolo con una mezcla de control fabricada con concreto reciclado.

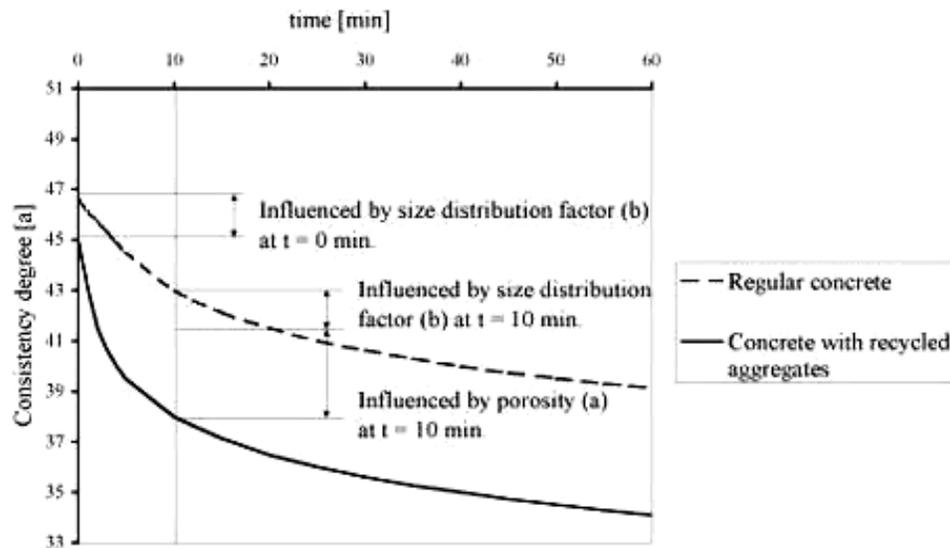


Ilustración 11, Pérdida de la manejabilidad en Concretos Reciclados.(Nealen A., 1997).

Este aumento de consistencia, no solo está influenciada por la alta porosidad, sino también por el desprendimiento de mortero adherido (Castaño., 2009) y por la forma angulosa de los RCD producto de la trituración (Rashwam S., 1997).

En temporadas de sol y sequía, generalmente el agregado se encuentra sin contenido de agua, por lo que autores tales como Nealen A., (1997), Poon et al., (2004) y M. Etxeberria and E. Vázquez., (2007) proponen saturar el material mediante aspersion con el fin de contrapesar el efecto negativo que produce la alta absorción, Sin embargo, al pre-humedecer los agregados, se está aumentando la cantidad de agua en la mezcla cambiando la relación agua-cemento, por lo que es necesario aplicar mayor cantidad de pasta, lo cual contrarresta el aumento de la consistencia debido también a la superficie rugosa de los RCD. (Schmidt y Nealen., 1999).

Sin embargo, Velázquez., (2004) basándose en otros estudios expone como posible solución a la disminución del revenimiento, la implementación de un aditivo reductor de agua o superplastificante.

En la siguiente ilustración, Castaño., (2009) estima una corrección para la manejabilidad del concreto reciclado comparándolo con una mezcla de control, utilizando aditivos superplastificantes.

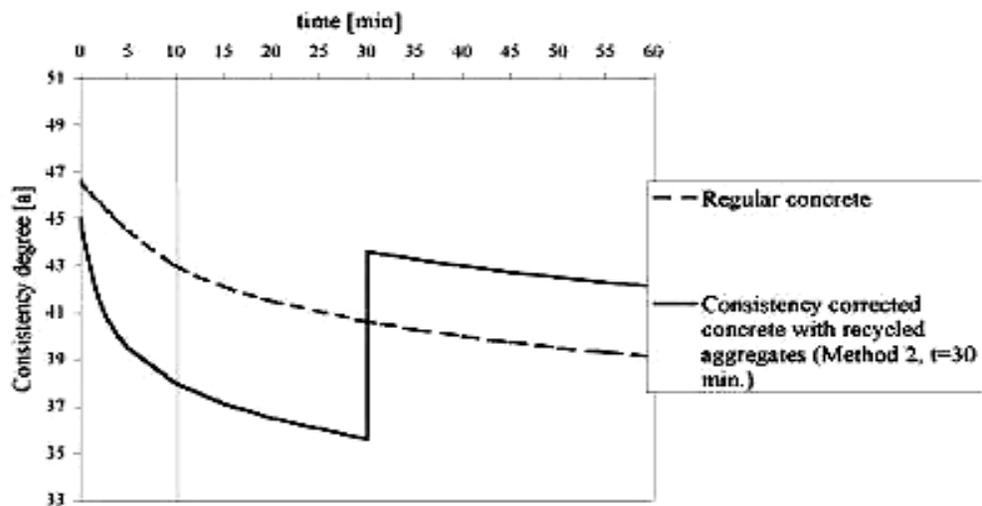


Ilustración 12, Corrección de la consistencia del CR adicionando superplastificantes.(Castaño., 2009).

2.8.2 Densidad

La densidad del concreto reciclado, está directamente relacionada con la cantidad de mortero adherido a las partículas y la densidad del RDC, por lo que al compararlo con un concreto natural, se revela una disminución que está ligado al porcentaje de sustitución de agregado grueso en la mezcla.

Según Álvarez., (2012) los valores de densidad del concreto reciclado en unidades de Kg/m^3 varían entre 2130 y 2400, aproximadamente.

2.8.3 Contenido de aire y exudación

En estudios realizados por Martínez S y Mendoza E., (2006), a diferentes mezclas de concreto reciclado, se estimaron valores de contenido de aire normales en comparación a los que presenta un concreto natural, los valores oscilan entre el 1,5% y el 2%.

Sin embargo, otros autores deducen que el contenido del aire de un CR puede llegar a ser ligeramente mayor al de un CN.

Por otro lado, la exudación de los concretos reciclados depende del estado del RDC al momento de la fabricación de la mezcla. Si los RDC a utilizar se encuentran secos debido a la alta absorción que estos presentan, la exudación arrojará valores por debajo de los normales, pero si se encuentran saturados o con presencia alta de humedad, los valores se tornan similares a los de un CN. (Martínez S y Mendoza E., 2006).

2.9 ESTADO ENDURECIDO

2.9.1 Densidad

Al igual que en estado fresco, la baja densidad de los RDC afecta directamente dicha propiedad en el concreto reciclado, sin embargo, la densidad en este caso es una propiedad que depende del porcentaje de sustitución de RDC. Según Sánchez De Juan M., (2005), cuando se sustituye el 50% de RDC, se puede encontrar una disminución alrededor del 2% con respecto al CN; si se sustituye la totalidad de agregados gruesos por RDC, puede alcanzar una reducción hasta del 3,5%, sin embargo, también encontró que con sustituciones del 20%, la disminución es casi imperceptible.

2.9.2 Resistencia a la Compresión

En concretos, la resistencia a la compresión es uno de los parámetros más importantes, de esta manera, es como mejor se desempeña el material, y su valor es de vital

importancia para la realización de cálculos estructurales. La resistencia a la compresión se define como la máxima carga axial posible que puede soportar un cilindro de concreto (Vanegas., 2008).

Se han llevado a cabo una serie de estudios acerca de concretos reciclados, en los cuales se ha encontrado que utilizando la misma relación a/c en distintas mezclas, y reemplazando el agregado natural por algún tipo de agregado reciclado en diferentes proporciones, la resistencia al igual que otras propiedades mecánicas, presentan una disminución en comparación con mezclas convencionales, siendo esta reducción de eficiencia inversamente proporcional al porcentaje de sustitución.

En la siguiente gráfica, se evidencia la disminución de la resistencia a la compresión cuando hay mayor presencia de agregados reciclados.

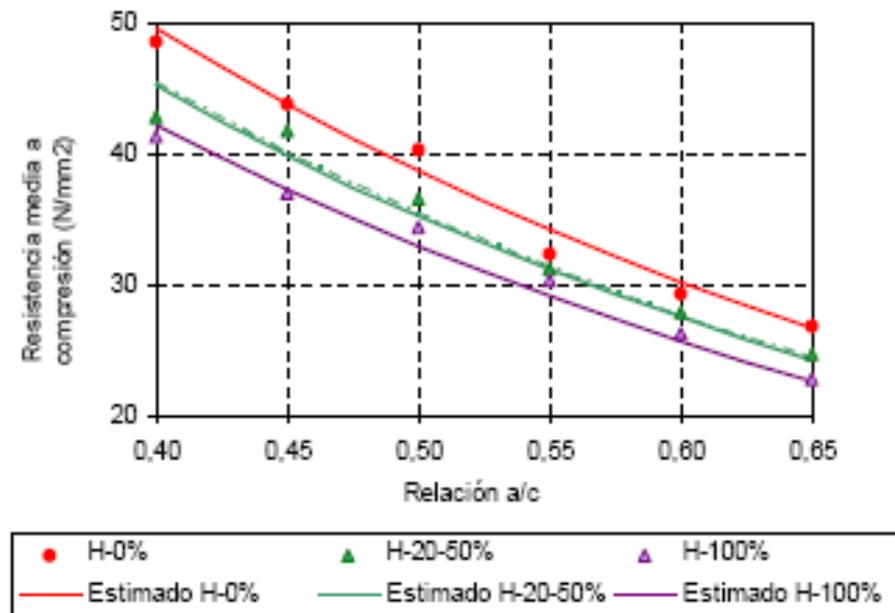


Ilustración 13, Relación resistencia media vs agua-cemento según la curva de Abrams. (Ayman H, R., 2008).

Esta disminución se puede dar debido a diferentes aspectos relacionados principalmente con las características de los agregados reciclados.

Según Castaño., (2009), dichas pérdidas de resistencia se deben a aspectos tales como:

- Menor resistencia mecánica de los RDC.
- Presencia de alta absorción, lo que conlleva a que existan partículas de cemento sin hidratar.
- La cantidad de mortero adherido impide el contacto con la matriz con la pasta, afectando la adherencia de la mezcla.

A continuación se muestra una tabla realizada por Álvarez., (2012) en donde se hace una comparación de varios autores sobre la resistencia a la compresión con diferentes porcentajes de sustitución de agregado reciclado.

Referencia	Resistencia a compresión (MPa)			% Sustituido	Observaciones
	CN	CR	% Dif. Resistencia		
(Fonteboa., 2002)	38.3	40.2	5%	50% AG	Aumento 12% de agua y cemento
	41.8	42.9	3%	50% AG	
(Gómez-Soberón., 2002)	39	35.8	-8%	60% AG	400 Kg/m3 de cemento
	39	34.5	-12%	100% AG	
(S. C. Kou and Dixon Chan., 2004)	45.9	43.6	-5%	20% AG	Con ceniza Volante
	45.9	40.4	-12%	50% AG	
	45.9	38.3	-17%	100% AG	
(Sanchez-De-Juan M., 2005)	29.3	26.3	-10%	100% AG	a/c = 0.6
	40.3	34.4	-15%	100% AG	a/c = 0.5
	48.5	41.3	-15%	100% AG	a/c = 0.5
(Tsong-Yueh T and Yuen-Yuen CH., 2006)	-	-	-20%	100% AG y AF	Aumenta contenido de agua y cemento
	-	-	-30%		
(Evangelista L., 2007)	59.3	57.3	-3.40%	20% AF	
		58.8	-0.8%	50% AF	
		54.8	-7.60%	100% AF	
(Etxeberria et al., 2007)	29	28	-4%	25% AG	a/c = 0.55
	29	29	-	50% AG	a/c = 0.52
	29	28	-4%	100% AG	a/c = 0.50

Tabla 13, Resistencia a la compresión con diferentes porcentajes de sustitución. (Álvarez., 2012).

Por otro lado, Ayman H, R., (2008) mediante una serie de ensayos argumenta que la resistencia no solo depende del porcentaje de agregado a sustituir, distinguiendo a la porosidad como otro factor importante en el desarrollo mecánico del concreto.

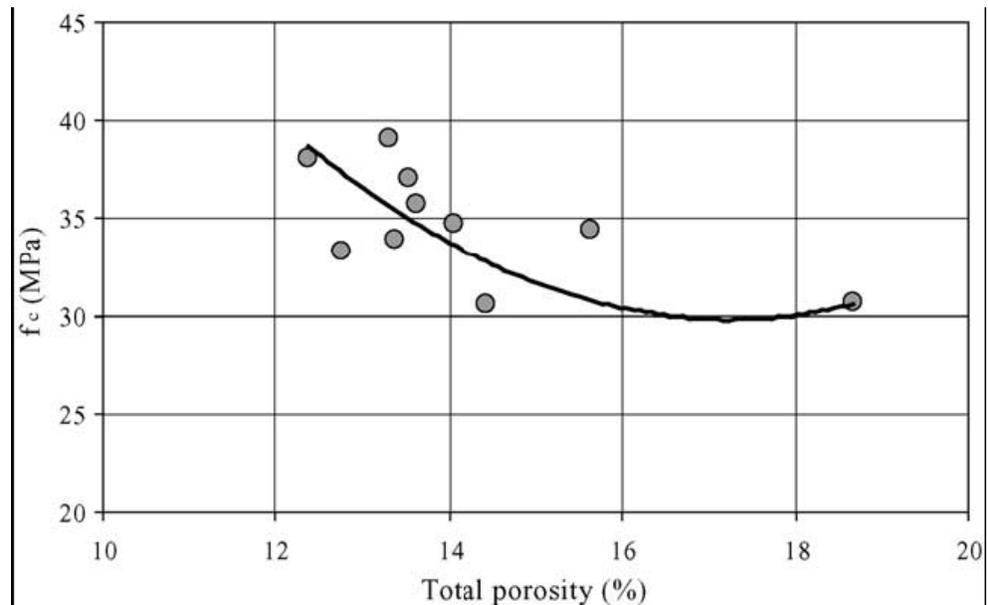


Ilustración 14, Porosidad total vs Resistencia a la Compresión. (Ayman H, R., 2008).

Se recomienda por diferentes autores como (Ayman H, R., 2008) y (Kikuchi M. y Ehara K., 1993), como se cita en Castaño., (2009), que dicha sustitución debe hacerse en la fracción gruesa, debido a que la incorporación de agregados reciclados finos, conlleva a una reducción mayor del desempeño mecánico del concreto.

2.9.3 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad se define como la relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente a esfuerzos de tensión o compresión, siempre y cuando estén por debajo del límite de proporcionalidad del material. (Vanegas., 2008).

Al igual que las otras propiedades mecánicas que presentan los concretos con material reciclado, el comportamiento del módulo elástico está relacionado con la manera en la que se desempeñan los RDC. Vanegas., (2008), explica que el módulo en concretos está influenciado en gran parte por la relación agua-cemento, por lo que se puede deducir

que debido a la afectación de esta característica por la alta porosidad y absorción de los agregados reciclados, es congruente que la mezcla presente una disminución con respecto a un CN.

Castaño., (2009), señala que el mortero adherido a las partículas de AR, presenta un módulo elástico bajo, lo cual conlleva a una disminución de ésta propiedad en los concretos reciclados.

En estudios realizados por Martínez S y Mendoza E., (2006), se evidencia como utilizando diferentes porcentajes de sustitución, siempre el módulo de elasticidad fue menor en las mezclas recicladas que en las convencionales en aproximadamente un 15-30%, como se puede observar en la tabla 14 mostrada a continuación:

CONCRETOS CONVENCIONALES		CONCRETOS RECICLADOS	
Mezcla	Módulo de elasticidad E_x (10^3)(Kg/cm 10^2)	Mezcla	Módulo de elasticidad E_x (10^3)(Kg/cm 10^2)
CN200	227	CR200	170
CN300	263	CR300	214
CN400	264	CR400	188

Tabla 14, Comparación Módulos de Elasticidad. (Martínez S y Mendoza E., 2006).

Sin embargo, éste autor también encontró que las deformaciones unitarias fueron del mismo orden que las que presentan los concretos convencionales, dejando así como principal variable el valor de los esfuerzos que soportan los concretos.

Por su parte Guzmán., (2010) mediante pruebas, encontró que los valores del módulo de elasticidad en porcentajes de sustitución del agregado grueso entre el 10% y el 20% no presentaban cambios significativos con respecto a la mezcla de control, pero reemplazando el 50% de la mezcla, esta propiedad alcanza un valor alrededor del 75-80% del concreto convencional, resultados que concuerdan con otros autores como Topcu I.B.,

(1997), que encontró una disminución entorno al 20% y Casuccio M y Giaccio G., et Al., (2008) entre el 13% y el 18%.

Las propiedades mecánicas del concreto reciclado también dependen del tipo de agregado reciclado que se vaya a utilizar, por ejemplo Gröbl P. y Rühl M., (1999) por medio de ensayos encontró que los concretos que contenían AR procedentes de material cerámico, presentaban un módulo elástico menor que los fabricados con RDC, lo cual se puede evidenciar en la Ilustración 15 mostrada a continuación:

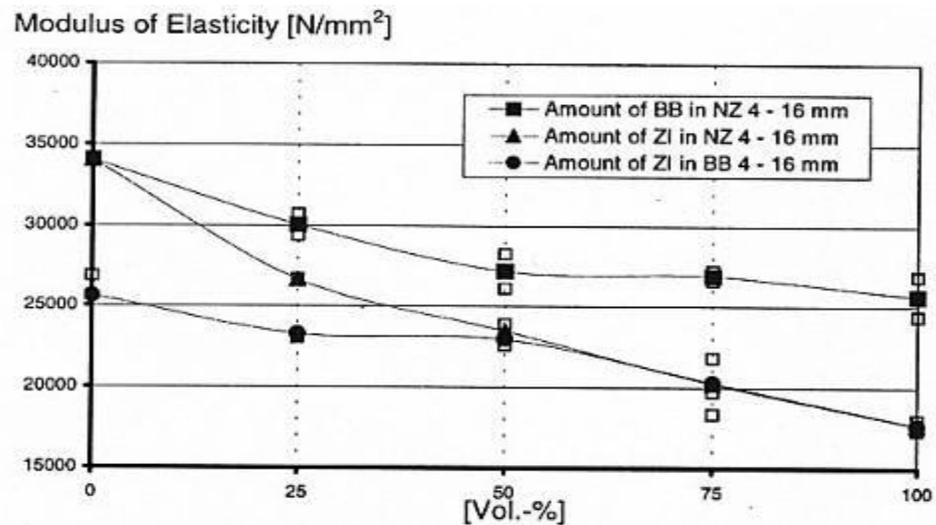


Ilustración 15, Modulo elástico en concretos reciclados con RDC y AR cerámicos. (Gröbl P. and Rühl M., 1999).

2.9.4 Resistencia a la tensión

La resistencia a la tensión en concretos se evalúa por medio del módulo de rotura, aunque no es de mucha importancia y presenta resultados bajos en comparación con otros materiales, es un valor que se puede correlacionar con la resistencia a la compresión tal y como lo muestra Vanegas., (2008) en la siguiente ecuación:

$$M * R = K \sqrt{f'c}$$

Ecuación 2, Modulo de rotura. (Vanegas., 2008).

Dónde:

M.R. = Modulo de rotura.

K = Coeficiente de correlación.

f'c = Resistencia a la compresión.

Para concretos reciclados, por medio de la realización de ensayos experimentales, autores como Martínez S y Mendoza E., (2006) y Fonteboa., (2002), encontraron que ésta propiedad tiene una disminución baja con respecto a los concretos convencionales e incluso en algunos casos no muestra una diferencia relevante, esto en porcentajes bajos de sustitución de agregados. Por ejemplo Sánchez De Juan M., (2005) encontró valores de disminución alrededor del 1%, para porcentajes de sustitución menores al 50%, similar a lo analizado por Fonteboa., (2002), el cual afirma que existen una variación entre el 1% y el -1%.

Por otro lado, Nealen A., (1997), afirma que con sustituciones del 100% de agregados reciclados, la resistencia a tensión puede llegar a tener pérdidas hasta el 30% lo cual concuerda con lo descrito por Castaño., (2009), quien complementando con otros autores encontró valores que oscilan entre el 6% y el 20%.

2.10 MEJORAMIENTO CALIDAD DE LOS AGREGADOS RECICLADOS

Como se ha venido tratando en el documento el trabajo a realizar es el mejoramiento de los agregados reciclados por medio de tratamientos con lechadas pobres, a continuación se presentaran estudios realizados por diferentes investigadores.

En el estudio realizado por Spaeth y Tegger., (2014), se generaron desarrollos experimentales sobre la mejora del rendimiento de los RCA, sobre todo la absorción de agua y la resistencia a la fragmentación. Para esto, se realizaron tratamientos con polímeros a los RCA entre 12-20 mm, los agregados fueron utilizados como agregado grueso aproximadamente con una densidad de 2.7 g/cm^3 , extraídos a su vez de reciclado de concreto (ARC). La mezcla la llevaron a cabo con una relación de agua cemento de 0.49.

Diferentes soluciones de polímeros se prepararon con diferentes concentraciones. Se sumergió el RCA en estas soluciones en un laboratorio con un entorno controlado.

Las soluciones se prepararon con diferentes concentraciones mostradas en la siguiente tabla:

Treatment acronyms	Names of product	Compositions	Concentration gradient	
			$C_{min}(\%)$	$C_{max}(\%)$
P1	Sodium silicate solution	Sodium silicate	7	30
P2	BS 2 Wacker siloxane/silane emulsion	Octyl/methyl methoxy co-oligomeric siloxane/silane	5	30
P3	IE 4 Dow Corning silane emulsion	Octyl triethoxy silane	5	40
P4	BS 3 Wacker siloxane/silane emulsion	Siloxane/propyl trimethoxy silane	5	50
P5	BS 4 Wacker siloxane/silane emulsion	Siloxane/propyl triethoxy silane	5	60
P6	BS 5 Wacker siloxane/silane emulsion	Siloxane/alkylalkoxysilane	5	40

Tabla 15, Concentraciones de polímeros aplicados a los RCA. (Spaeth y Tegguer., 2014).

El recubrimiento generado por la combinación polimérica (P1 “solución de silicato de sodio” + P2 “emulsión de sileno”), generó una reducción significativa de absorción de agua lo que significa que con estos tratamientos se genera una protección contra la penetración del agua.

Zhao et al., (2013) aporta a la literatura una investigación modificando la estructura superficial de los ARC, generando varios tipos de pasta impregnándola en los agregados reciclados con un espesor aproximadamente del 0.035 mm. Se realizaron las mezclas con diferentes tipos de relación agua-cemento como: 0.5 ,0.6 ,0.7, 0.8 y 1 arrojando los resultados de absorción, densidad y aplastamiento mostrados en la siguiente tabla:

Rendimiento Físico	Concreto Natural	Agregado Grueso Reciclado					
		Control	W/C 0.5	W/C 0.6	W/C 0.7	W/C 0.8	W/C 1
Absorción de Agua (%)	0.7	4.1	3.5	3.4	3.1	2.5	3
Densidad Aparente (Kg/m ³)	2730	2650	2670	2660	2660	2680	2650
Aplastamiento (%)	10.1	14.2	12.1	11.6	11.5	11	11.7

Tabla 16, Resultados absorción, densidad aparente y aplastamiento. (Zhao et al., 2013)

Se indica en la anterior tabla que los valores generados por los ensayos tienen una disminución con el aumento de la relación agua-cemento, el tratamiento que produjo más rendimiento físico ante la densidad aparente fue el de relación agua-cemento de 0.8 el cual corresponde al espesor de 0.035. En conclusión, la pasta de recubrimiento demasiado delgada puede ser dócil a efectos adversos del mortero adherido antiguo.

Con las mismas relaciones agua-cemento nombradas anteriormente, ésta investigación realizó las combinaciones con sulfoaluminato, cenizas volantes, silicato de sodio obteniendo un aumento en la resistencia a la compresión del concreto a 28 días de un 34.8% con sulfoaluminato y en un 32,4% tratados por impregnación de silicato de sodio. Lo anterior se debe a la disolución de la pasta de cemento y cenizas que ejercieron el efecto de dilución, efecto de nucleación y efecto de reacción de hidratación secundaria para mejorar el rendimiento del mortero.(Zhao et al., 2013).

CAPITULO 3: METODOLOGIA

METODOLOGIA

En este capítulo se genera la estructuración de la investigación “*COMPORTAMIENTO MECANICO DE CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO TRATADO CON LECHADAS POBRES*”, explicando detalladamente los procedimientos, equipos y normativa utilizada para la realización del trabajo.

3.1 CARACTERIZACION DE LECHADAS

Se planteó al inicio de la investigación utilizar la lechada (agua-cemento), desechado por los camiones cargadores de concreto (Mixer) de la Empresa Cemex Colombia S.A. para así poder realizar un análisis de Ph y contenido de sólidos.



Ilustración 16, Recolección de lechada Cemex Colombia S.A, (Beltrán y Borrego., 2014).

Se supuso desde un inicio que el material encontrado en la empresa Cemex Colombia S.A. era un material con un contenido único de agua- cemento, sin tener en cuenta los diferentes tipos de residuos con los que estaba combinado éste material (grasa, tierra. Etc.), el material se extrajo de un pozo de agua de reciclaje ubicada en Planta Américas, Cemex Colombia S.A. el cual se verá en la siguiente ilustración:



Ilustración 17, Pozo de recolección de agua de reciclaje Cemex Colombia S.A, (Beltrán y Borrego., 2014)

En la siguiente ilustración se podrán observar respectivamente de izquierda a derecha los ensayos realizados. Ensayo de contenido de Sólidos Totales- Ensayo de Captura de datos de Ph- Muestras Recolectadas (Rice W., 2013)



Ilustración 18, Instrumentación utilizada para los ensayos de contenido de solidos totales, Ph- Muestras recolectadas, (Beltran y Borrego., 2014).

Al realizar los ensayos respectivos llegamos a la conclusión que no se pudo determinar el contenido de cemento debido a la presencia alta de material no deseado en la muestra, teniendo en cuenta que en las lechadas existía una alta variabilidad de las proporciones en el tiempo, se decidió fabricar lechadas artificiales con parámetros fijos.

Se escogen dos tipos de lechadas artificiales a utilizar como tratamiento superficial:

- Cemento: queriendo cubrir en su totalidad el agregado reciclado y por su facilidad de obtención, economía y factibilidad de implementación en tal caso de que se logre la industrialización del procedimiento.
- Puzolana de alta finura (Humo de Sílice): Es un material inorgánico de forma esférica y de una extremada finura, éste material ha sido utilizado para la fabricación de concreto de alta resistencia y es principalmente producido por la condensación de vapores, lo que se requiere de este excelente material es que penetre los poros del agregado reciclado para así llegar a una disminución

significativa de la absorción del mismo, afectando así la relación agua-cemento e incrementando la resistencia de la mezcla de concreto.(Delgado., S.f).

3.2 OBTENCIÓN Y RECOLECCIÓN DEL AGREGADO RECICLADO

Para la obtención del material con el que se llevó a cabo el trabajo de grado, se contó con el apoyo de la Empresa Reciclados Industriales, la cual dedica sus operaciones a la recolección y selección de desechos de escombros y demoliciones de obras civiles, con el fin de reutilizarlo para usos industriales.

Ya en la planta se procedió a seleccionar y a separar dos pilas de diferentes agregados reciclados, controlando que la Excavadora Hidráulica tomara las respectivas muestras en diferentes puntos del pilón (arriba, mitad y abajo) , con el fin de garantizar que se está seleccionando una muestra representativa como se observa a continuación en la ilustración 19.



*Ilustración 19. Preselección de muestras de ARE y ARC en diferentes puntos del Pilón.
(Beltrán y Borrego., 2014).*

Dicho material ya se encontraba triturado y separado por diferentes tamaños. Como se puede observar en la ilustración 20, la pila de la izquierda estaba conformada por agregado reciclado compuesto en su mayoría por desechos de escombros de mampostería y cerámica (ARE). La pila de la derecha se compone de agregado reciclado de concreto (ARC), el cual en su vida útil fue utilizado como concreto estructural. Se aseguró que debajo de estas pilas se colocará un plástico extendido para evitar variación en la humedad del material.



Ilustración 20, Separación del material a utilizar a lo largo de la investigación. (Beltrán y Borrego., 2014)

Luego de tener las pilas ya formadas, se seleccionó el material a trabajar de igual forma como se seleccionó en el pilón, haciéndolo en la parte superior, media e inferior de la pila siguiendo los requerimientos de la norma (NTC 129 ICONTEC., 1995), la cual describe el muestreo en campo, como se muestra en la ilustración 21 a continuación:



Ilustración 21 , Muestreo de las pilas tomadas arriba, en medio y debajo de la pendiente de la pila, posteriormente realización del cuarteo. NTC 129 ICONTEC., (1995). (Beltrán y Borrego., 2014).

Contando ya con el material debidamente escogido, se procedió a verificar por medio de re tamizado los rangos del tamaño entregados por la planta de Reciclados Industriales, los cuales son 3/4 (19 mm) y 3/8 (9.5 mm), los ARE utilizados por la empresa para la fabricación de bases y sub-bases granulares para construcción y reparación de vías y los ARC para venta a plantas concreteras. A continuación se presenta en la ilustración 22, los tamaños de los tamices y el material ya almacenado en lonas de completamente secas para garantizar que no hubiese variación en la humedad.



Ilustración 22 , tamiz 3/8 (Izquierda) – tamiz 3/4 (Medio) – almacenamiento en lonas (Derecha). (Beltrán y Borrego., 2014).

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO SIN TRATAMIENTO

Como primera medida se realizaron ensayos de caracterización a los dos tipos de agregado reciclado cada uno por separado (ARCE-ARE) y al agregado natural (grueso y fino). Dichos ensayos se describen a continuación.

Para el análisis granulométrico, tal y como se presenta en la norma NTC 174, (ICONTEC 2000). se determinó la gradación del material teniendo en cuenta que en este caso los rangos de tamaño estaban reducidos a solo tres valores de abertura, los cuales fueron 3/4”, 1/2” y 3/8”. Para esto se requirió de los tamices nombrados y la balanza calibrada con una exactitud de 0.1 %. se estableció el porcentaje retenido en cada tamiz para así poder generar la curva granulométrica de dichos materiales.

La humedad que presentaban los diferentes agregados al momento de la realización y ejecución de los ensayos, se estableció basándose en la norma NTC 1776, ICONTEC., (1994), en la cual se especifica el procedimiento correcto para realizar el ensayo. Se tomó aproximadamente 3000 (g) de material ya que el tamaño máximo nominal del agregado fue de 19 mm, luego se toma el peso en estado natural, se lleva al horno a una

temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, para después tomar el peso seco de la muestra. Para saber el porcentaje de humedad se utilizó la ecuación 3 mostrada a continuación:

$$W (\%) = 100 * (H - S)/S.$$

Ecuación 3, contenido de humedad en %. NTC 1776 (ICONTEC., 1994).

Dónde:

W = contenido de humedad de la muestra, en porcentaje.

H = masa inicial de la muestra, en gr.

S = masa de la muestra seca, en gr

Para el obtener los valores de absorción y Gravedad específica Bulk, se siguieron los parámetros sugeridos por la norma I.N.V. E – 223 (INVIAS., 2007).

El procedimiento que se implementó se explica a continuación:

- Primero, la masa saturada superficialmente seca (M_{ss}) se estableció luego del periodo de inmersión que recomienda la norma (15-19horas), retirando el agua superficial visible de las partículas con un paño. Este valor se midió con una aproximación de 0,5g.
- Luego de esto, la muestra se sumergió en una canastilla metálica, la cual se encontraba conectada a la balanza, luego se procedió a determinar la masa sumergida en agua (M_{sa}), sin embargo, antes de registrar la medición se agitó un poco la canasta con el fin de eliminar posible aire acumulado en las partículas.
- Por último luego de colocar la muestra en horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener masa constante, se registró la masa seca (M_s).

Ya con las masas calculadas, se utilizan las siguientes formulas recomendadas por la norma, para calcular el porcentaje de absorción y la gravedad especifica Bulk.

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{(B - A)}{A} \times 100$$

Ecuación 4, Porcentaje de absorción. I.N.V.E 223 (INVIAS., 2007).

$$Gsb \text{ (Kg/cm}^3\text{)} = \frac{A}{(B - C)}$$

Ecuación 5, Gravedad Especifica Bulk. I.N.V.E 223 (INVIAS., 2007).

Dónde:

A (g)=Masa muestra seca.

B (g)=Masa muestra en estado saturado superficialmente seco.

C (g)=Masa muestra sumergida en agua.

En el caso del agregado natural fino se halló la densidad con los parámetros establecidos por la norma I.N.V.E 222 (INVIAS., 2007). La cual determina la gravedad especifica bulk basada en la masa saturada y superficialmente seca del agregado fino. Para la realización del ensayo se necesitaron los siguientes equipos:

- Balanza con una exactitud de 0.1%.
- Picnómetro (frasco de Le Chatelier).
- Molde cónico
- Pisón: varilla metálica.

Se tomó una muestra del agregado fino natural aproximadamente de 1 kg, luego se llevó al horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, ya con el material manejable después de dejarlo enfriar se sumerge en agua garantizando que quede todo cubierto dejándolo de 15 a 19 horas aproximadamente, después del periodo de inmersión se expulsa cuidadosamente el agua para evitar la pérdida de material y se extiende la muestra sobre una superficie plana para iniciar el proceso de secado superficial, como se observa en la ilustración 23 mostrada a continuación:



Ilustración 23, molde cónico y pisón (Izquierda), Secado superficial (Derecha). (Beltrán y Borrego., 2014).

Ya con el material seco se procedió a chequear la condición saturada y superficialmente seca, se sujetó el molde cónico con su diámetro mayor apoyado sobre una superficie plana y se comenzó a vaciar la muestra en 3 capas, golpeando cada una con 25 golpes. Al final de este procedimiento la muestra dentro del molde cónico se desboronó el agregado fino queriendo decir que el material ya ha alcanzado su condición seca superficial.

Se requiere determinar la masa del picnómetro, más la muestra, más el agua, para determinar la masa saturada completamente.

La densidad y la absorción se determinaron con las siguientes ecuaciones (6 y 7):

Densidad:

$$Gsb \text{ (Kg/cm}^3\text{)} = \frac{A}{B + S - C}$$

Ecuación 6, Densidad. I.N.V.E 222 (INVIAS., 2007).

Dónde:

A= Masa seca al horno.

B= Ecuación de ajuste picnómetro: $y = -0.1152 (x) + 660.46$. Ecuación entregada por el laboratorio para la calibración del picnómetro utilizado, donde (x) es la temperatura ambiente.

C= Masa total.

S= 500 (g), cantidad de muestra exigida por la norma I.N.V.E 222. (INVIAS., 2007).

Absorción:

$$A (\%) = \frac{S - A}{A} * 100$$

Ecuación 7, Absorción. I.N.V.E 222 (INVIAS., 2007).

Dónde:

S= 500 (g), cantidad de muestra exigida por la norma I.N.V.E 222. (INVIAS., 2007)

A= Masa seca al horno.

Se evaluó también la resistencia mecánica de los agregados gruesos a la trituración al ser sometido a esfuerzo de compresión, determinando así la carga necesaria para producir en el agregado grueso, un 10% de finos. (INVIAS., 2007). La muestra para el ensayo se secó inicialmente al aire y se tamizó por las mallas de 1/2" y 3/8", se usará solo el agregado comprendido entre estos dos tamaños. Los equipos que se utilizaron en la realización de este ensayo según la I.N.V.E 224 (INVIAS., 2007), fueron los siguientes:

- Conjunto de acero para el montaje de la muestra descrito en la ilustración 24.
- Recipiente cilíndrico, el cual tendrá el objetivo proporcionar una medida en el ensayo.
- Plato base, donde encaja el cilindro perfectamente.
- Pistón, para con este aplicar esfuerzos de compresión a la muestra
- Varilla para compactación, varilla cilíndrica de sección circular recta
- Balanza con una exactitud de 0.1%.
- Tamices (1/2", 3/8" y No. 8)

Se llenó el recipiente cilíndrico con la muestra en tres capas de una misma altura, aplicándole en cada capa 25 golpes. Luego de lista la muestra se procede a introducir el pistón de carga para aplicar la compresión al agregado en el cilindro y llegar a alcanzar una penetración establecida por la norma según la naturaleza de la muestra ensayada. Todo el material obtenido en el ensayo se pasó por el tamiz No.8 y se determinó la masa del material retenido por éste. A continuación en la ilustración 24 se muestran imágenes representativas del ensayo de 10% de finos:



Ilustración 24, recipiente cilíndrico (Derecho), pistón aplicando la carga (medio), enrasando la muestra en el recipiente cilíndrico (Izquierda). (Beltrán y Borrego., 2014)

El porcentaje de finos producido por la carga aplicada se obtuvo con la ecuación 8 mostrada a continuación:

$$\%F = \frac{ma - mr}{mr} * 100$$

Ecuación 8, Porcentaje de finos. I.N.V.E 224. (INVIAS., 2007).

Dónde:

Ma= Masa agregado,

Mr= Masa agregado retenido.

3.4 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CEMENTANTES

Se llevó a cabo la caracterización de materiales cementantes usados en el trabajo de grado (cemento y Humo de sílice), determinando la densidad por medio de la norma I.N.V.E 307 (INVIAS., 2007), para la realización del ensayo se necesitó de un frasco de le Chatelier calibrado con las dimensiones especificadas en la norma. La densidad de los materiales se determinó llenando el frasco de Kerosene libre de agua a 23°C, después se observó la lectura inicial y se comenzó a añadir el material cementante en una cantidad de 64 (g), garantizando que el material no quedara adherido a las paredes del frasco, luego se colocó el tapón al frasco y se agitó hasta que salieran todos los vacíos generados por la aplicación del procedimiento. El frasco se introdujo en un baño de agua a temperatura ambiente durante un tiempo prudente (30 minutos). La diferencia entre las lecturas inicial y final representa el volumen líquido desplazado por el peso del material cementante usado en el ensayo. Al final la densidad fue calculada como se describe en la ecuación 9, a continuación:

$$Densidad \left(\frac{Kg}{cm^3} \right) = \frac{Masa \ de \ cemento \ (Kg)}{Volumen \ desplazado \ (cm^3)}$$

Ecuación 9, Densidad de materiales cementantes. I.N.V.E 307 (INVIAS., 2007).

A continuación se muestra en la ilustración 25 se muestra un esquema de las medidas del Frasco de Lechatelier:

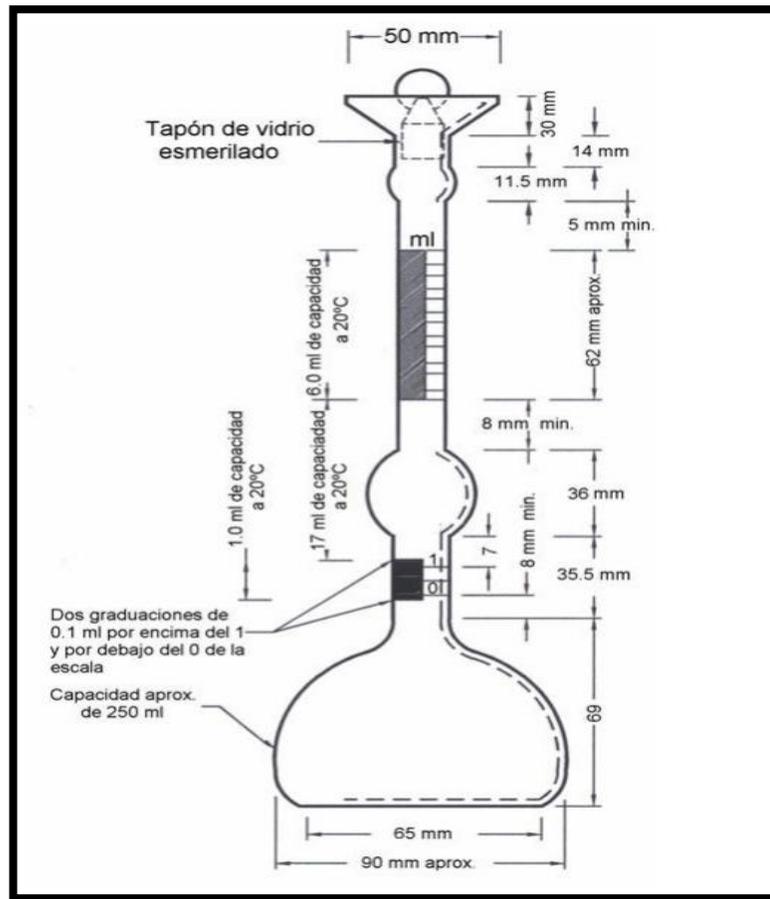


Ilustración 25, Frasco de Le Chatelier. I.N.V.E 307 (INVIAS 2007).

3.5 FABRICACIÓN Y APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO

Se fabricaron lechadas artificiales compuestas de dos materiales cementantes, la primera con cemento y la segunda con humo de sílice. Para el cálculo del volumen de tratamiento a emplear se utilizaron dos parámetros diferentes, primero se calculó el volumen efectivo que se puede ocupar por la lechada en los poros del material saturándolo al 90%, y el otro factor se determinó computando la cantidad de lechada necesaria para recubrir las partículas del agregado en su totalidad, con una capa de 0,3mm de espesor. Todo esto se realizó para una cantidad de agregado final de 20Kg.

Se calculó el volumen efectivo mediante la diferencia entre el volumen de poros saturables y el volumen ocupado por agua en el agregado, tal como se presenta en formulas propuestas a continuación:

Volumen de poros saturables:

$$V_{\text{poros saturables}}(\text{Lt}) = \% \text{ absorción} * \frac{\text{Densidad agregado (Kg/Lt)}}{\text{Cantidad agregado(Kg)}}$$

Ecuación 10, Volumen de poros saturables. (Beltrán y Borrego., 2014).

Volumen ocupado por agua:

$$V_{\text{ocupado por agua}}(\text{Lt}) = \% \text{ Humedad} * \frac{\text{Densidad agregado (Kg/Lt)}}{\text{Cantidad agregado(Kg)}}$$

Ecuación 11, Volumen ocupado por agua. (Beltrán y Borrego., 2014).

Volumen efectivo a llenar:

$$V_{\text{efectivo a llenar}}(Lt) = 0.90[V_{\text{poros saturables}}(Lt) - V_{\text{ocupado por agua}}(Lt)]$$

Ecuación 12, Volumen efectivo a llenar. (Beltrán y Borrego., 2014)

El volumen de recubrimiento se estableció basándose en la granulometría del material con combinaciones de agregados 80%ARC y 20%ARE, en donde se determinó la cantidad de partículas aproximada por cada tamaño, que se encuentra en un Kg del agregado, suponiendo las partículas como esferas perfectas.

$$\#particulas.i(1/Kg) = \frac{V_{\text{material por tamaño}}(Lt/Kg)}{V_{\text{esfera por tamaño}}(Lt)}$$

Ecuación 13, numero de partículas. (Beltrán y Borrego., 2014)

$V_{\text{recubr}.i}(Lt)$

$$= [Superficie Esfera(cm^2) \times ancho recubrimiento(cm)] \times \frac{1Lt}{1000cm^3}$$

Ecuación 14, Volumen de recubrimiento. (Beltrán y Borrego., 2014).

$$V_{\text{rec}.Total}(Lt/Kg) = \sum_{i=1}^3 [V_{\text{recubr}.i}(Lt) \times \#particulas.i(1/Kg)]$$

Ecuación 15, Volumen de recubrimiento Total. (Beltrán y Borrego., 2014).

Donde i es el número de tamaños existentes en la muestra.

Teniendo los valores de volumen de recubrimiento y volumen efectivo a llenar, se pudo calcular la cantidad total de tratamiento.

Vol. recubrimiento total (Lt)	0,4027
Vol efectivo a llenar (Lt)	0,4524
Vol Total tratamiento (Lt)	0,8551

Tabla 17. Calculo del Volumen total del tratamiento (Lt). (Beltrán y Borrego., 2014).

Con el volumen del tratamiento calculado para 20Kg de agregado, se determinan los valores de la dosificación de la lechada, estableciendo cuánta agua y material cementante se necesitan para cada tratamiento, como se muestra en las siguientes tablas.

Dosificaciones calculadas para 20Kg de agregado reciclado 80% ARC 20% ARE.						
Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Cementante	HS	HS	CP	CP	HS	HS
Relación agua-cementante	0.75	1.00	1.20	1.80	1.20	1.80
Cemento (Kg)	0.70	0.58	0.56	0.40	0.51	0.38
Agua (Kg)	0.53	0.58	0.67	0.72	0.61	0.68
Vol. cemento (Lt)	0.33	0.27	0.19	0.13	0.24	0.18
Vol. agua (Lt)	0.53	0.58	0.67	0.72	0.62	0.68
Vol. lechada (Lt)	0.86					

Tabla 18, HS=Humo de Sílice, CP=Cemento Portland. Dosificación del tratamiento para cada tratamiento parte 1. (Beltrán y Borrego., 2014).

Después de obtener la dosificación exacta del tratamiento, Éste se le aplicó a 6 muestras del agregado combinado. Dicha aplicación se realizó de manera lenta y en un periodo de

tiempo aproximado a 10 minutos, siempre intentado distribuir de la manera más homogénea posible el tratamiento sobre el material, como se observa en la ilustración 26:



Ilustración 26, Implementación del tratamiento en el trompo (Izquierda), lechada fabricada con cemento (mitad) y lechada fabricada con humo de sílice (derecha). (Beltrán y Borrego., 2014).

Por último, se almacenaron las muestras de agregados con tratamiento, en un lugar bajo techo con el fin de evitar variabilidad en el contenido de agua.

3.6 CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO CON TRATAMIENTO

Los agregados tratados con las lechadas artificiales, fueron nuevamente sometidos a las diferentes pruebas realizadas en la caracterización inicial, con el fin de evaluar si existe algún cambio significativo y así poder decidir cuales tratamientos son óptimos para el diseño y la fabricación de concretos. El ensayo de 10% de finos, humedad, porcentaje de absorción y gravedad específica Bulk, son los parámetros que se evaluaron justo a los tres y siete días de la fabricación y aplicación de la lechada, con el fin de permitir una

estabilización del tratamiento, y dar un acercamiento al comportamiento de éste con respecto al tiempo.

El porcentaje de absorción, se determinó de igual manera que en el agregado sin tratamiento, teniendo en cuenta que al momento de determinar la masa de la muestra en estado saturado superficialmente seco, se retiró el agua visible en la superficie con el paño, intentando no quitar por completo el tratamiento.



Ilustración 27, Tratamiento 5 con relación agua-cementante de 1.2, fabricado con humo de sílice (izquierda) y tratamiento 1 con relación agua-cementante de 1.2, fabricado con cemento Portland (derecha). (Beltrán y Borrego 2014).

En la imagen 27, se observa dos muestras utilizadas para la realización del ensayo de absorción 3 días después de su fabricación.

3.7 FABRICACION DE CONCRETOS

En los concretos realizados con agregado reciclado, se utilizó siempre el 50% de sustitución en los agregados naturales

El diseño de mezcla que se estableció para los diferentes concretos fue calculado basándose en lo descrito por Guzmán., (2001), en su libro de tecnología del concreto y del mortero. Se estableció una relación agua-cemento de 0.59, con una cantidad de cemento de 320 Kg/m³, esto basándose en el tamaño máximo nominal que presentaba el agregado.

Se hicieron las correcciones de humedad pertinentes en la arena, grava natural, grava reciclada sin tratar y grava reciclada tratada.

Se comenzó fabricando dos concretos de control, El primero compuesto 100% de agregado natural y el segundo incluyendo agregado reciclado combinado sin ningún tipo de tratamiento superficial.

Luego se produjeron seis concretos, de los cuales dos presentaban agregados reciclados tratados con lechada de cemento y los otros cuatro con lechada de humo de sílice. Con cada concreto se procedió a fundir dos cilindros y una viga por edad de falla, como el comportamiento mecánico fue evaluado a los 7 y 28 días, esto dio un total de 4 cilindros y 2 vigas por concreto, lo que en otras palabras, teniendo en cuenta desperdicios equivale a 17 litros de mezcla aproximadamente.

En las siguientes tablas, se muestran los diseños de mezcla utilizados para cada uno de los concretos:

Diseños de mezcla corregidos por humedad, para 1 m ³				
Concreto	CN	CST	CT1	CT2
Relación agua-cemento	0,59	0,59	0,59	0,59
Cementante utilizado en el tratamiento	N/A	N/A	Humo de sílice	Humo de sílice
Cemento (Kg)	320	320	320	320
Agua (Kg)	173	193	191	191
Arena (Kg)	879	729	846	835
Grava (Kg)	831	441	426	438
Grava reciclada (Kg)	-	441	426	438
Aditivo (%)	3,5	3,5	3,5	3,5

Tabla 19. Diseños de mezcla por m³, para cada concreto fabricado, parte 1. (Beltrán y Borrego., 2014).

Diseños de mezcla corregidos por humedad, para 1 m ³				
Concreto	CT3	CT4	CT5	CT6
Relación agua-cemento	0,59	0,59	0,59	0,59
Cementante utilizado en el tratamiento	Cemento Portland	Cemento Portland	Humo de sílice	Humo de sílice
Cemento (Kg)	320	320	320	320
Agua (Kg)	190	188	187	186
Arena (Kg)	772	785	786	779
Grava (Kg)	439	440	437	438
Grava reciclada (Kg)	439	440	437	438
Aditivo (%)	3,5	3,5	3,5	3,5

Tabla 20. Diseños de mezcla por m³, para cada concreto fabricado, parte 2. (Beltrán y Borrego., 2014).

El asentamiento utilizado fue de $10 \text{ cm} \pm 2\text{cm}$, el cual fue verificado con el concreto en estado fresco basándose en la norma NTC 396 ICONTEC., (1992), que trata de añadir el concreto fresco a un molde cónico y compactarlo con una varilla. Luego el molde se levanta permitiendo que el concreto se asiente de forma natural. El dato de asentamiento es la diferencia entre a posición inicial y la desplazada de la superficie superior del concreto.

En la ilustración 28 se expone parte del procedimiento del ensayo de asentamiento realizado con el concreto en estado fresco.



Ilustración 28, Determinación de Asentamiento. (Beltrán y Borrego., 2014)

Tanto los cilindros como las vigas, fueron desencofrados aproximadamente a las 24 horas de la fundición y trasladados inmediatamente al cuarto de curado. Allí permanecieron hasta las respectivas edades de falla.

3.8 REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE RESISTENCIA

Como se planteó en los objetivos de la investigación, se llevaron a cabo los ensayos de compresión, modulo y flexión de la siguiente manera:

Ensayo de compresión

Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto con los todos los parámetros de la norma NTC 673 (ICONTEC., 2000). El método de ensayo consiste en la aplicación de una carga axial de compresión a los cilindros moldeados. Después de retirar los cilindros del cuarto de curado se llevan a la maquina universal para que sean fallados a compresión. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la máxima carga alcanzada durante el ensayo entre el área de la sección transversal del cilindro como se observa en la ecuación 16.

$$Resistencia (Mpa) = \frac{P \text{ aplicada (Ton - f)}}{Area \text{ especimen (Cm}^2)} * 98.1$$

Ecuación 16, Resistencia a la compresión en unidades de Mpa. NTC 673 (ICONTEC., 2000).

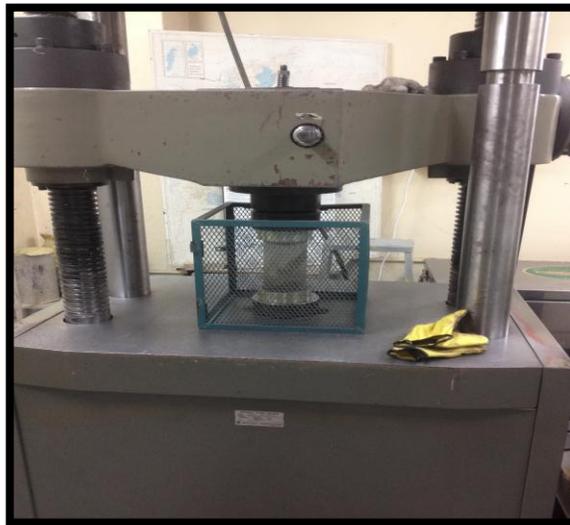


Ilustración 29, Maquina Universal. Ensayo de resistencia a la compresión. (Beltrán y Borrego., 2014).

El módulo de elasticidad o módulo de Young se calculó por medio de deformímetros y sistemas informáticos con los parámetros de la norma NTC 4025 (ICONTEC 2006). Se determinan los datos cuando los cilindros se hallan bajo esfuerzos de compresión longitudinal. En el ensayo se tomó un esfuerzo del 40% del promedio de las cargas de falla obtenidos en los ensayos de Resistencia a la compresión (7 y 28 días). A continuación se presenta la ilustración de montaje del ensayo de Modulo.



Ilustración 30, Ensayo para la determinación del Módulo de Elasticidad. (Beltrán y Borrego., 2014).

Para la determinación de la resistencia del concreto a la flexión se utilizaron los parámetros descritos por la norma NTC 2871 (ICONTEC 2004). El ensayo se llevó a cabo en la maquina Instron 3369 la cual se muestra a continuación en la ilustración 31.

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO TRATADO CON LECHADAS POBRES.



Ilustración 31, Maquina Instron 3369. (Beltrán y Borrego., 2014)

CAPITULO 4:

RESULTADOS Y ANALISIS

4.1 ENSAYOS DE LOS MATERIALES SIN TRATAMIENTO

4.1.1 Densidad de las partículas y absorción

Para determinar las propiedades de los agregados y calcular el diseño de mezcla, la densidad de las partículas es uno de los factores importantes que se involucra para obtener un buen resultado, cuando en la mezcla se incluyen agregados de diferentes densidades esto influye negativamente en el rendimiento y en la cantidad de agregados para un determinado volumen de concreto. Esta propiedad se ve principalmente afectada por la humedad y las propiedades geológicas que están presentes en el agregado.

En este proyecto se determinó también el contenido de humedad y absorción de los agregados antes de realizar cualquier tipo de diseño de mezcla ya que la cantidad de agua en la tiene un efecto directo en la resistencia de cualquier muestra de concreto. A continuación en la tabla 21 se observan las densidades y la absorción de agua de todos los tipos de materiales utilizados en la investigación. Se encontró que en las diferentes combinaciones de agregados reciclados, los porcentajes de absorción y densidad bulk presentan una baja variabilidad entre ellos.

Material	Densidad Bulk (Kg/m ³)	Absorción de agua (%)	Humedad (%)
Agregado natural grava + gravilla	2277	5.4	5.6
Agregado natural arena	2495	3.7	8.5
Agregado reciclado ARC	1980	9.8	6.8
Agregado reciclado ARE	2197	6.1	5.3
Agregado reciclado 80% ARC 20% ARE	1993	10.4	3.4
90% ARC – 10% ARE	2003.6	9.7	-
70% ARC – 30% ARE	2945.4	9.9	-

Tabla 21, densidades y absorciones obtenidas en la investigación. (Beltrán y Borrego., 2014).

Se puede justificar que la presencia de alta humedad en las muestras de agregado de ARC y ARE, es debido a la época de lluvia en el momento de recolectar del material, posteriormente fue necesario colocar dichas muestras en un espacio bajo techo para impedir que entre más humedad y al mismo tiempo permitir que baje la existente.

Por medio de los datos expuestos en la tabla 21, se realizó una comparación de los diferentes valores de gravedad específica que presentan los materiales a utilizar.

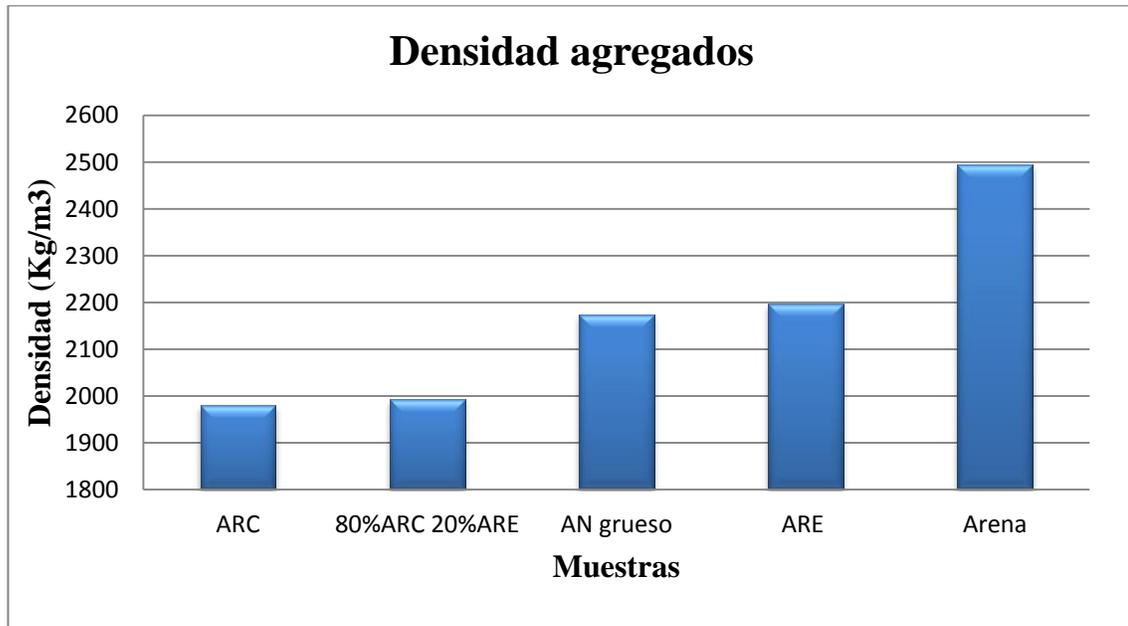


Grafico 1, Densidad de los agregados. (Beltrán y Borrego., 2014).

Los resultados expuestos en el gráfico 1, muestran que el agregado reciclado de concreto tiene el menor valor de densidad de todos los agregados iniciales. Dicho valor predomina en el comportamiento del agregado reciclado 80%ARC-20%ARE.

Con respecto a la absorción de los materiales, se encuentra que los agregados reciclados de concreto presentan el máximo valor en comparación con los otros agregados estudiados, tal y como se muestra en el grafico 2.

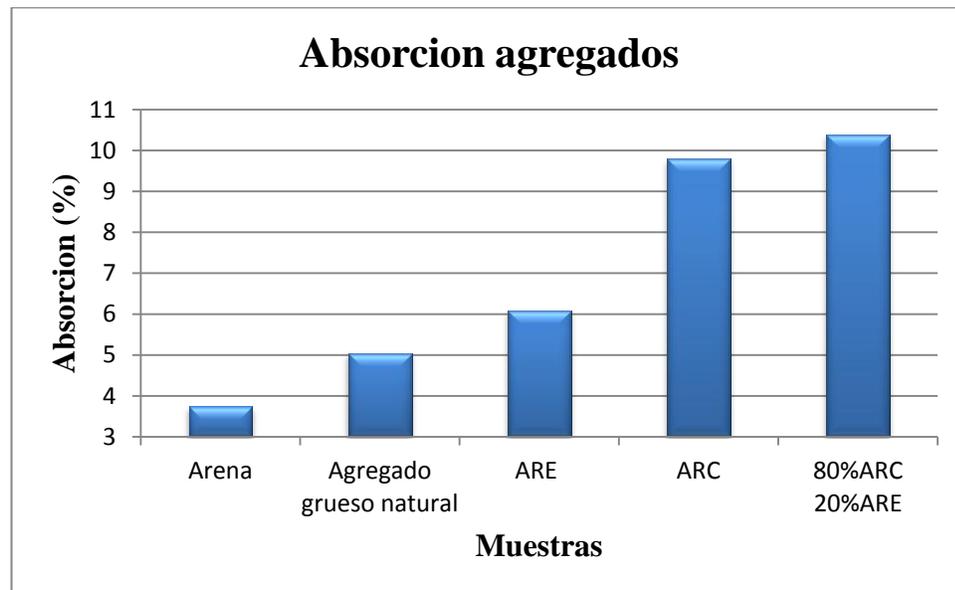


Grafico 2, absorción agregados. (Beltrán y Borrego., 2014)

Ya que el agregado compuesto de 80%ARC-20%ARE, está conformado en su mayoría por el material que presenta la absorción más alta, dicha propiedad prevalece en el material.

En la tabla 22 se observan los requerimientos normativos de densidad y absorción para agregados reciclados en varios países. (Castaño., 2009).

Normativa	Densidad Seca (Kg/m ³)	Absorción (%)
Rilem – ISO 6783 y 7033	≥ 2000 tipo II, ≥ 2400 tipo III	≤ 10 tipo II, ≤ 3 tipo III
Japón – JIS A1110	≥ 2200	≤ 3 tipo 1, ≤ 5 tipo 2, ≤ 7 tipo 3
Bélgica – NBN B11-255	≥ 2100	<9
Hong Kong – BS 812	≥ 2000	<10
Alemania – DIN EN 1096-6	≥ 2000	≤ 10 tipo 1, ≤ 15 tipo 2
Australia – AS 1141.6	≥ 2100	<6
España – Anejo EHE 2008	≥ 2000	≤ 7

Tabla 22, Requerimientos normativos de densidad y absorción para agregados reciclados. (Castaño., 2009).

El agregado reciclado utilizado, cumple con la mayoría de normativas y puede ser perfectamente utilizado en la fabricación de concreto, sin embargo según la norma japonesa, el agregado reciclado utilizado en este estudio no es apto para ser utilizado en concreto estructural por su alta absorción, pero si para concretos convencionales y losas.

4.1.2 Granulometría

En el análisis granulométrico se busca saber en qué proporción están presentes los agregados de la mezcla y definir el excedo de fracciones gruesas o finas y cualquier tipo de desajuste en la distribución de los tamaños.

A continuación se presentan la granulometría, de cada uno de los agregados utilizados en la investigación:

Granulometría agregado natural (Gravilla):

Granulometría agregado natural					Peso seco al horno (g)	2957.10
					Peso inicial (g)	3000
Gravilla natural						
Tamaño abertura tamiz (pulg)	Tamaño abertura tamiz (mm)	Peso retenido por tamiz	porcentaje retenido por tamiz	porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa	
1	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4	19.05	37.40	1.26	1.26	98.74	
1/2	12.70	523.20	17.69	18.96	81.04	
3/8	9.53	772.70	26.13	45.09	54.91	
n°4	4.76	1355.30	45.83	90.92	9.08	
fondo	fondo	268.50	9.08	100.00	0.00	
			100			

Tabla 23, *Granulometría gravilla natural.* (Beltrán y Borrego., 2014).

Mezcla de Materiales por Fracción								
Tamaño Tamiz	inch	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	8
	mm	38.1	25.4	19.1	12.7	9.53	4.76	2.36
Gravilla natural		100	100	98.74	81.04	54.91	9.08	0

Tabla 24, *mezcla de materiales por fracción.* (Beltrán y Borrego., 2014).

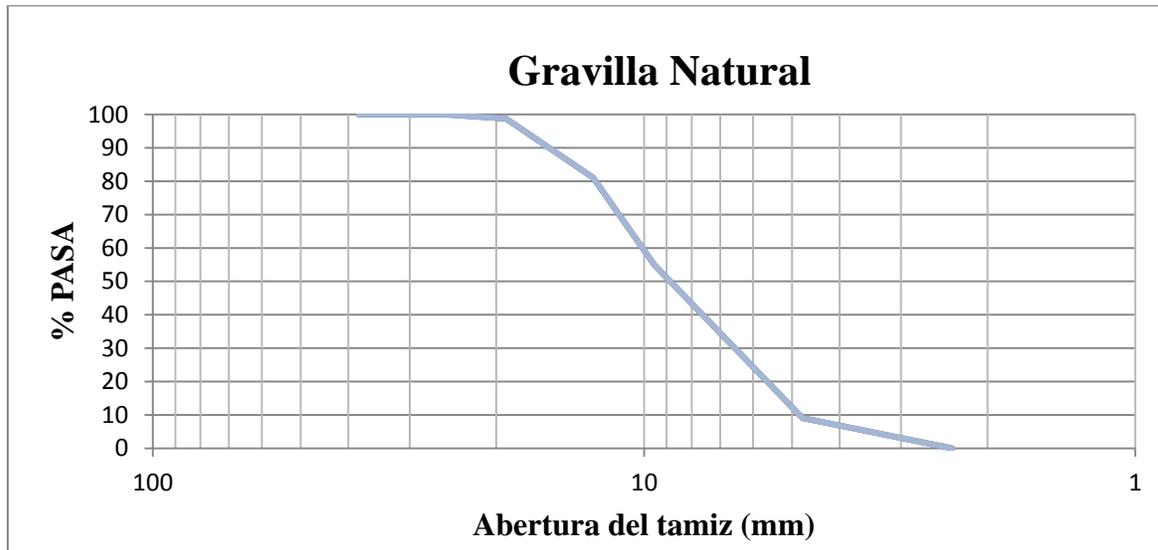


Grafico 3, Granulometría gravilla natural. (Beltrán y Borrego., 2014).

Granulometría agregado natural (Grava):

Granulometría agregado natural				Peso seco al horno	2876
				Peso inicial	3000
Grava natural					
Tamaño abertura tamiz (pulg)	Tamaño abertura tamiz (mm)	Peso retenido por tamiz (g)	porcentaje retenido por tamiz	porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa
1	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4	19.05	1278.5	44.45	44.45	55.55
1/2	12.70	1205.7	41.92	86.38	13.62
3/8	9.53	277.5	9.65	96.03	3.97
n°4	4.76	102.1	3.55	99.58	0.42
fondo	fondo	12.2	0.42	100.00	0.00
			100		

Tabla 25, Granulometría grava natural. (Beltrán y Borrego., 2014).

Mezcla de Materiales por Fracción								
Tamaño Tamiz	inch	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	8
	mm	38.1	25.4	19.1	12.7	9.53	4.76	2.36
Grava natural		100	100	55.55	13.62	3.97	0.42	0

Tabla 26, Mezcla de materiales por fracción. (Beltrán y Borrego., 2014).

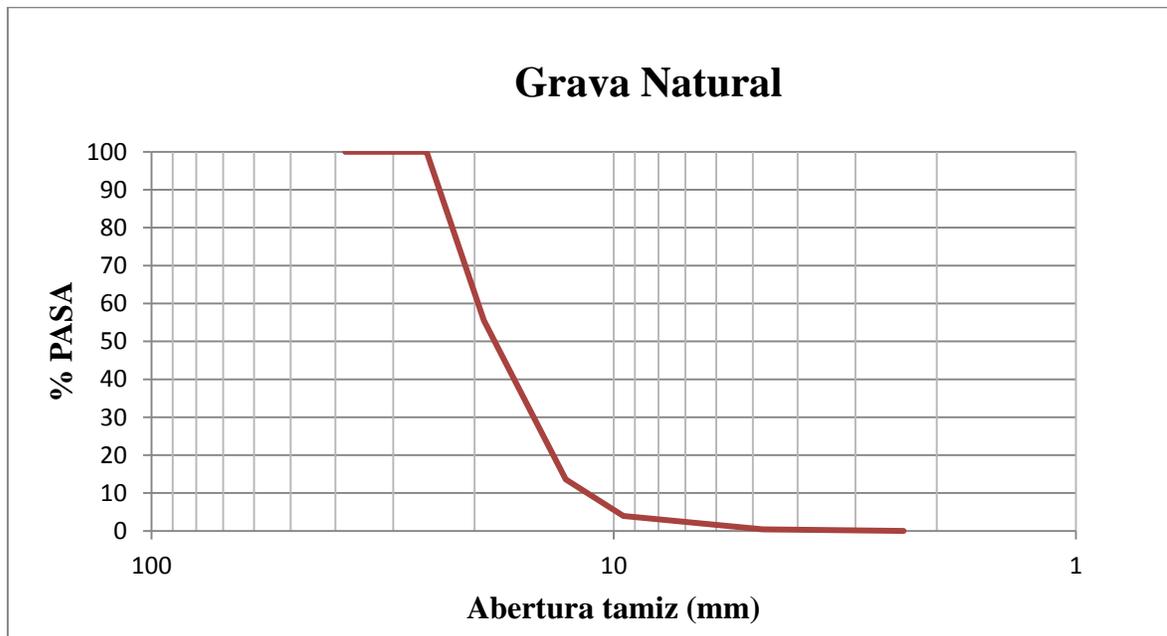


Grafico 4, Granulometría grava natural. (Beltrán y Borrego., 2014).

Granulometría agregado natural (Arena):

Granulometría agregado natural				Peso seco al horno	1504.3
				Peso inicial	3000
Arena					
Tamaño abertura tamiz (pulg)	Tamaño abertura tamiz (mm)	Peso retenido por tamiz	porcentaje retenido por tamiz	porcentaje retenido acumulado	porcentaje pasa
N°4	4.72	0	0	0	100
N°8	2.36	701.9	46.66	46.66	53.34
N°16	1.18	808.9	53.77	53.77	46.23
N°30	0.6	416	27.65	81.43	18.57
N°50	0.3	157.9	10.50	91.92	8.08
N°100	0.15	78.6	5.23	97.15	2.85
N°200	0.075	42.9	2.85	100.00	0.00
fondo		6.5	100		

Tabla 27, Granulometría arena. (Beltrán y Borrego., 2014).

Mezcla de Materiales por Fracción									
Tamaño Tamiz	inch	3/8"	4	8	16	30	50	100	200
	mm	9.525	4.72	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Arena natural		100	100	53.34	46.23	18.57	8.08	2.85	0

Tabla 28, Mezcla de materiales por fracción. (Beltrán y Borrego., 2014).

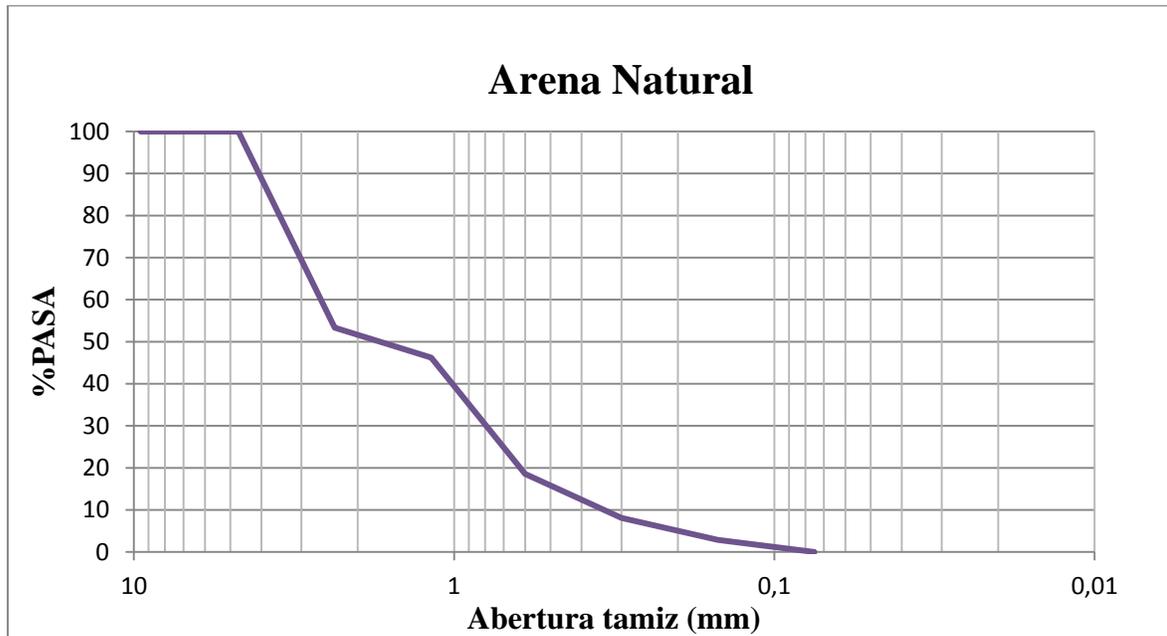


Grafico 5, Granulometría arena natural. (Beltrán y Borrego., 2014).

Granulometría 80 ARC – 20 ARE:

Granulometría agregado natural				Peso seco al horno	996
				Peso inicial	3000
80 ARC – 20ARE					
Tamaño abertura tamiz (pulg)	tamaño abertura tamiz (mm)	peso retenido por tamiz	porcentaje retenido por tamiz	porcentaje retenido acumulado	porcentaje pasa
1	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4	19.05	0	0.00	0.00	100.00
1/2	12.70	470	47.19	47.19	52.81
3/8	9.53	495	49.70	96.89	3.11
n°4	4.76	31	3.11	100.00	0.00
fondo	fondo	0	0.00	100.00	0.00
			100		

Tabla 29, Granulometría 80 ARC – 20ARE. (Beltrán y Borrego., 2014).

Mezcla de Materiales por Fracción								
Tamaño Tamiz	inch	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	8
	mm	38.1	25.4	19.1	12.7	9.53	4.76	2.36
Agregado 80ARC-20ARE		100	100.00	100.00	52.81	3.11	0.00	0.00

Tabla 30, Mezcla de materiales por fracción. (Beltrán y Borrego., 2014).

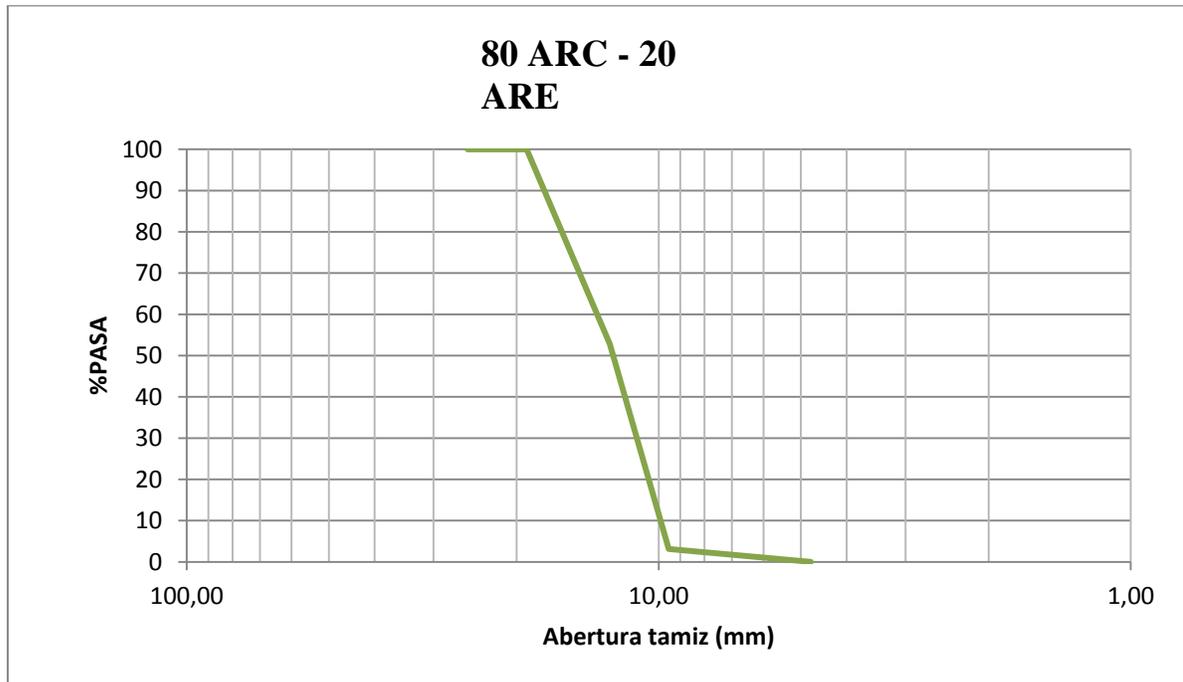


Gráfico 6, Granulometría arena natural. (Beltrán y Borrego., 2014).

Se compararon todas las granulometrías en la siguiente gráfica:

Comparación													
Tamaño o Tamiz	inc h	1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	8	16	30	50	100	200
	mm	38.1	25.4	19.1	12.7	9.53	4.76	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Gravilla natural	100	100	98.74	81.04	54.91	9.08	0	0	0	0	0	0	0
Grava natural	100	100	55.55	13.62	3.97	0.42	0	0	0	0	0	0	0
Agregado 80ARC-20ARE	100	100	100	52.81	3.11	0.00	0	0	0	0	0	0	0
Arena natural	100	100	100	100	100	100	53.34	46.23	18.57	8.08	2.85	0	0

Tabla 31, comparación granulometrías. (Beltrán y Borrego., 2014).

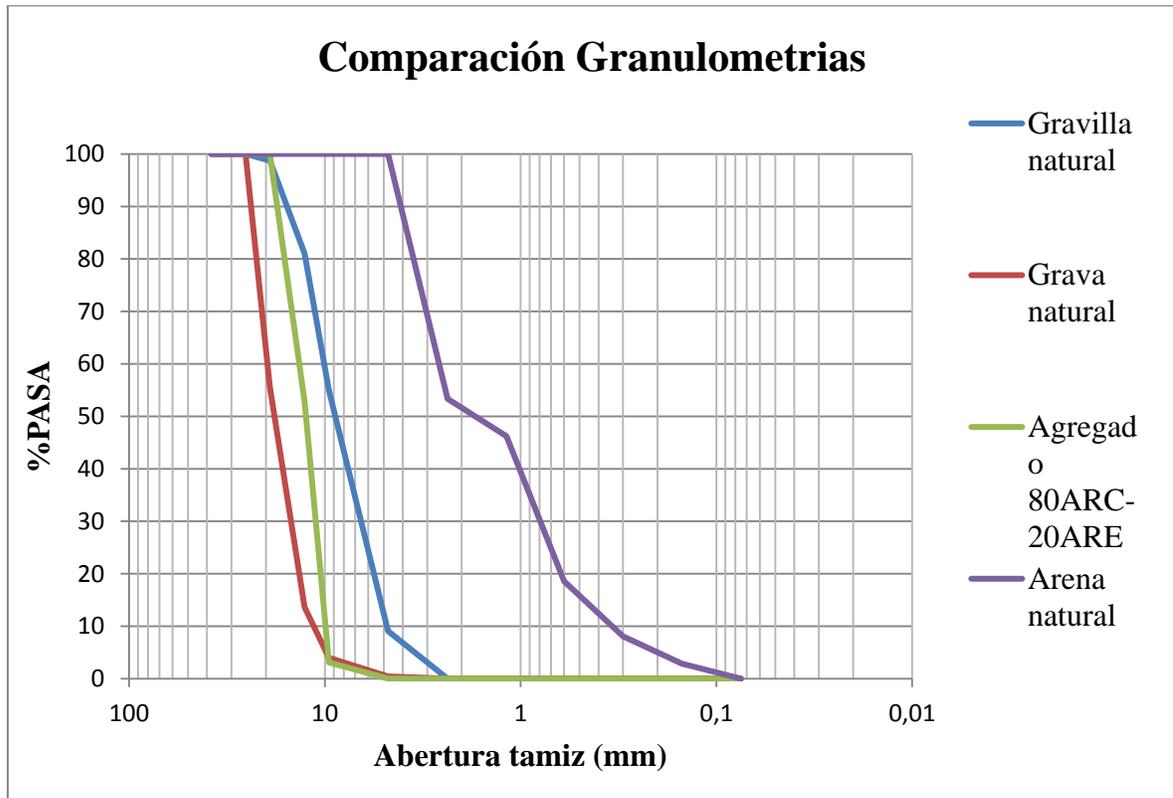


Grafico 7, comparación granulométrias. (Beltrán y Borrego., 2014).

Así como se había descrito anteriormente el agregado reciclado trabajado fue entregado con un rango de tamaños entre $3/4"$ y $3/8"$, lo cual se asemeja a una combinación de gradaciones de la grava y la gravilla natural, esta similitud es necesaria para simular el comportamiento del agregado natural al ser sustituido por el agregado reciclado.

4.1.3 10% de finos

En la siguiente tabla se presentan los datos del ensayo de 10% de finos para los diferentes tipos de agregado con diferentes combinaciones:

Tipo de agregado	ARC	ARE	90%-10%	70%-30%	80%-20%	AN
Masa 1 (gr)	2257	2037.8	2353.2	2298.1	2271.6	2271.6
Penetración (mm)	18	16.5	17.5	17.5	18	18
Velocidad (mm/min)	4	4	4	4	4	4
Carga aplicada (Kg)	12450	8085	12460	13050	12450	23986.6
Masa 2 (gr)	2046.3	1808.1	2159.6	2080.2	2034.15	2034.15
% Finos producidos (Ma-Mr)/Ma	9.33	11.27	8.23	9.48	10.45	10.45

Tabla 32, Ensayo 10% finos para agregados natural, reciclados y combinaciones. (Beltrán y Borrego., 2014).

Analizando los resultados obtenidos, se encontró que el ARE presenta una resistencia mecánica menor que la del ARC en un 35%, lo cual era de esperar debido a la procedencia de cada uno. De igual manera se evidencia que entre las diferentes combinaciones no existe una variación significativa de la resistencia mecánica siendo este un parámetro influyente para la decisión de solo probar tratamientos en la combinación de 80% ARC-20% ARE.

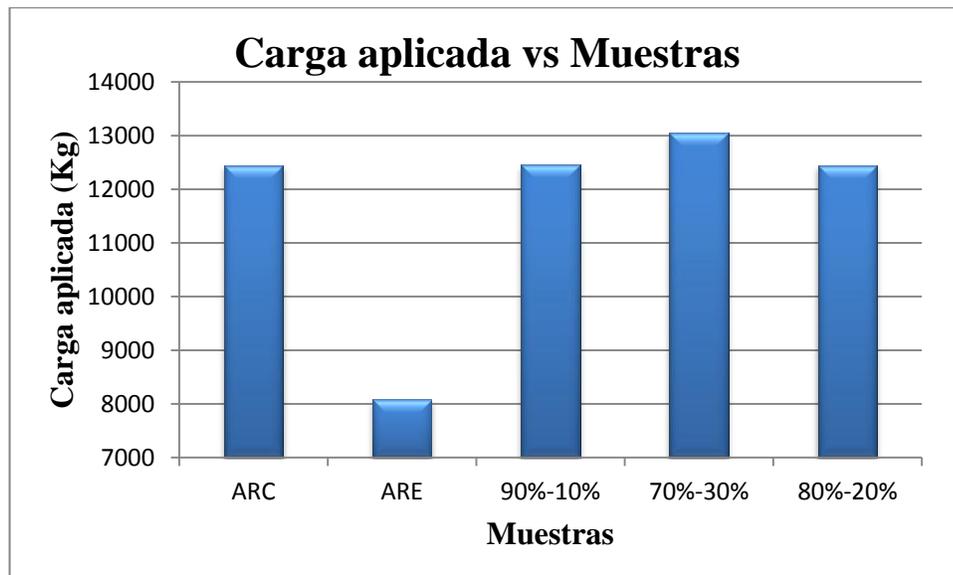


Grafico 8, Carga aplicada a cada muestra para generar el 10% de finos. (Beltrán y Borrego., 2014)

Además basándose en la gráfica anterior que describe de mejor manera el desempeño mecánico de los materiales, se puede deducir que la resistencia mecánica presente en las distintas distribuciones, es aportada por el ARC dado que los valores de carga registrados son similares.

Por otro lado con respecto al concreto natural, todos los agregados reciclados incluyendo combinaciones, arrojaron una disminución en los valores de resistencia aproximadamente del 47%, corroborando que los agregados naturales presentan un mejor desempeño que los agregados reciclados.

4.2 ENSAYOS DE LOS MATERIALES CON TRATAMIENTO

4.2.2 Densidad, absorción y humedad

Luego de la aplicación, exactamente a los 3 y 7 días se obtuvieron datos de gravedad específica Bulk y absorción, con el fin de evaluar la afectación del tratamiento a las propiedades del agregado, como se muestra a continuación.

Relación Agua-Cementante	Tratamientos aplicados al agregado 80%ARC 20%ARE					
	Material	Densidad Bulk (Kg/m ³)		Absorción (%)		Humedad (%)
		3 días	7 días	3 días	7 días	14 días
0.75	T1	1885	2093	14.5	8.8	3.3
1	T2	1840	2050	16.4	9.3	3.6
1.2	T3	2114	2285	9.5	8.2	3.8
1.8	T4	2166	2213	9.4	8.4	4.1
1.2	T5	2215	2230	8.7	8.1	3.5
1.8	T6	2184	2215	8.7	8.1	4.2

Tabla 33. Datos de densidad bulk, absorción y Humedad de agregados tratados, a los 3 y 7 días. (Beltrán y Borrego., 2014).

Desde un principio la implementación de los tratamientos, tenía como objetivo la mejora en propiedades como la Gravedad específica Bulk y Absorción.

Como primera medida, de la tabla 33 se logró obtener la afectación que ocasiona el tiempo en las propiedades del agregado tratado, como se muestra en las gráficas 8 y 9.

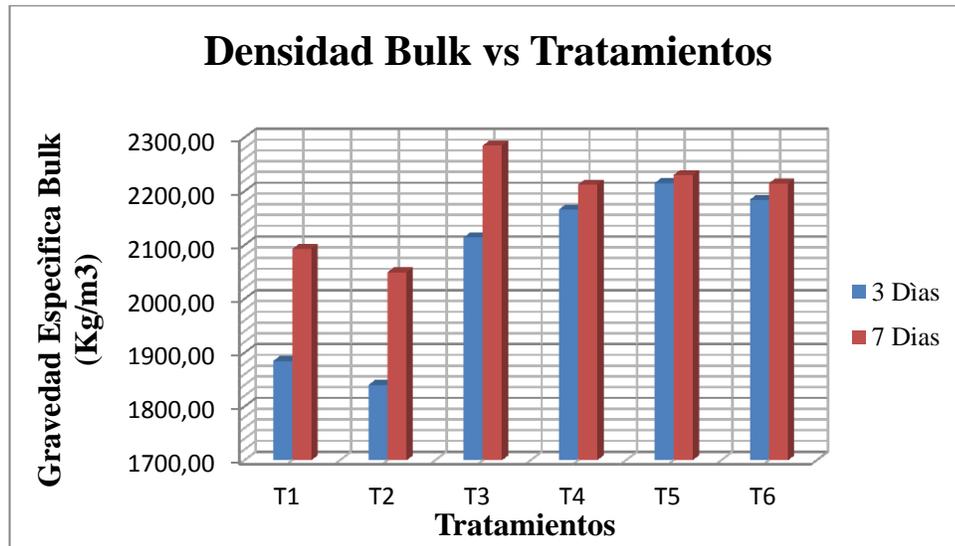


Grafico 9, Comparación Gravedad específica del Agregado reciclado con tratamiento a los 3 y 7 días de implementación. (Beltrán y Borrego., 2014).

Tanto en la gráfica 9 como en la 10, se demuestra que los tratamientos arrojan mejores resultados a los 7 días de la implementación, aumentando la gravedad específica y disminuyendo el porcentaje de absorción.

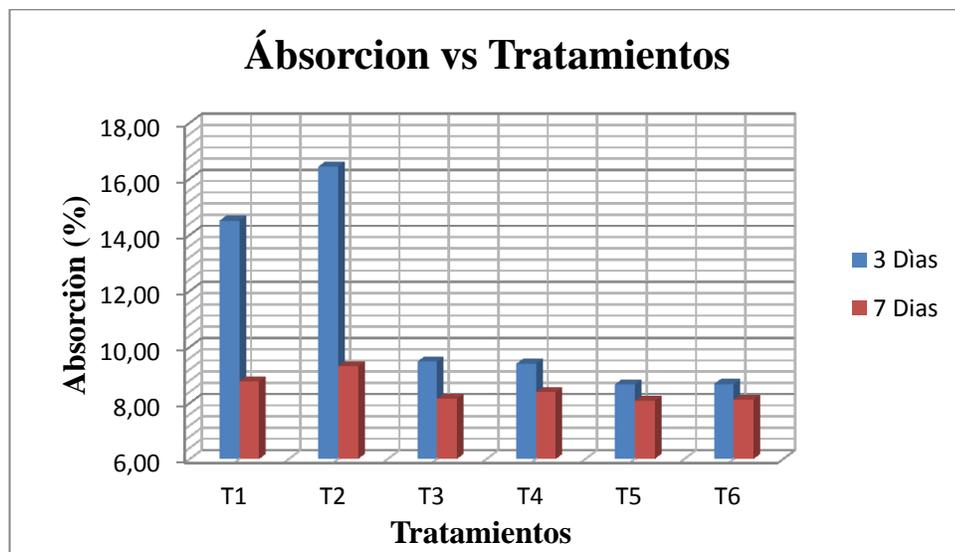


Grafico 10. Comparación Absorción (%) del Agregado reciclado con tratamiento a los 3 y 7 días de implementación. (Beltrán y Borrego., 2014).

De los resultados obtenidos se realizó una comparación entre los diferentes agregados tratados y el agregado sin tratar, la cual establece si el tratamiento tiene implicaciones en el agregado reciclado.

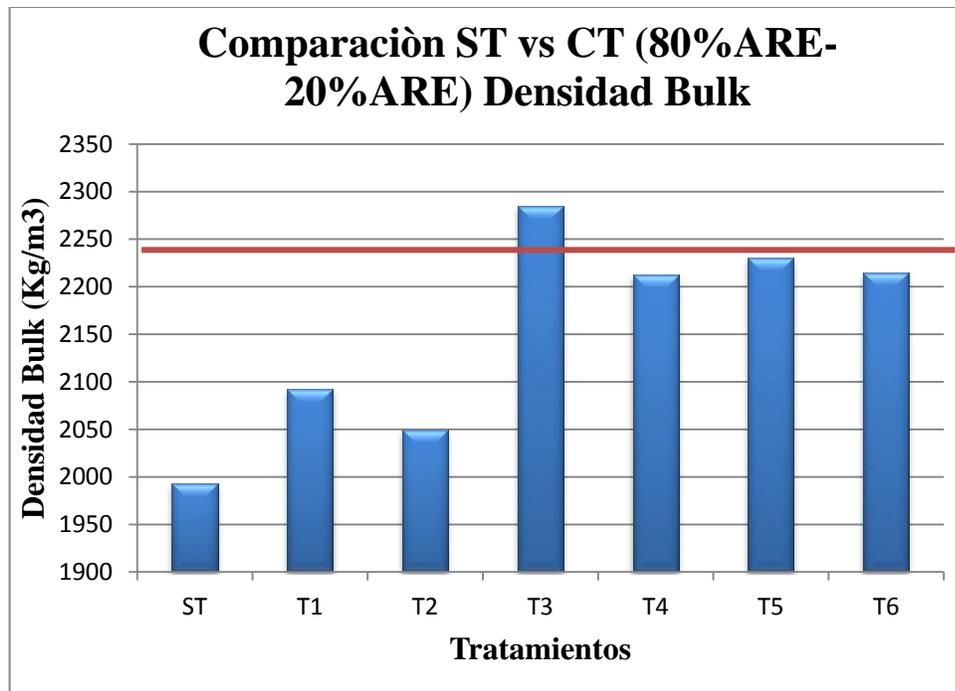


Grafico 11. Comparación densidad Bulk Agregado reciclado con tratamiento y sin tratamiento. (Beltrán y Borrego., 2014).

Se puede deducir de la gráfica 11 que al aplicar las lechadas estándar, se obtuvo un incremento en la totalidad de los agregados tratados con respecto al agregado natural sin tratamiento.

El tratamiento que mayor densidad Bulk presentó fue el T3, incrementando el valor en un 12.7%. Por otro lado con un incremento del 2.8% el tratamiento que generó menor variabilidad fue el T2.

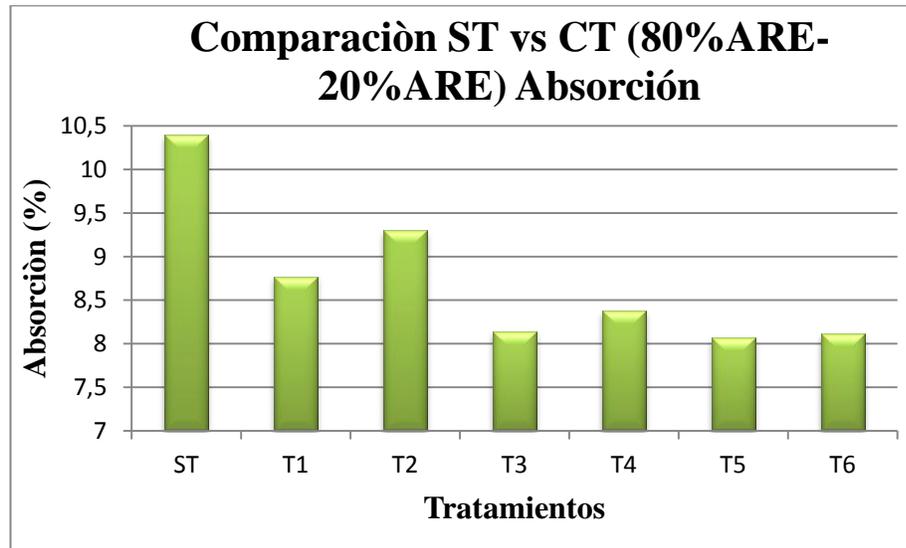


Grafico 12. Comparación Absorción Agregado reciclado con tratamiento y sin tratamiento. (Beltrán y Borrego., 2014).

De igual manera que en el comportamiento de la densidad, la absorción mostró un cambio positivo con todos los tratamientos aplicados tal y como se puede analizar en la gráfica 12. En un 22% aproximadamente, disminuyeron los tratamientos T3, T4, T5 y T6 mientras que con un 10.6% el tratamiento T2 fue el que menos variación expuso.

Se pudo establecer una relación por medio de la gráfica 13 entre la absorción del agregado reciclado tratado y la relación agua-cementante de los diferentes tratamientos.

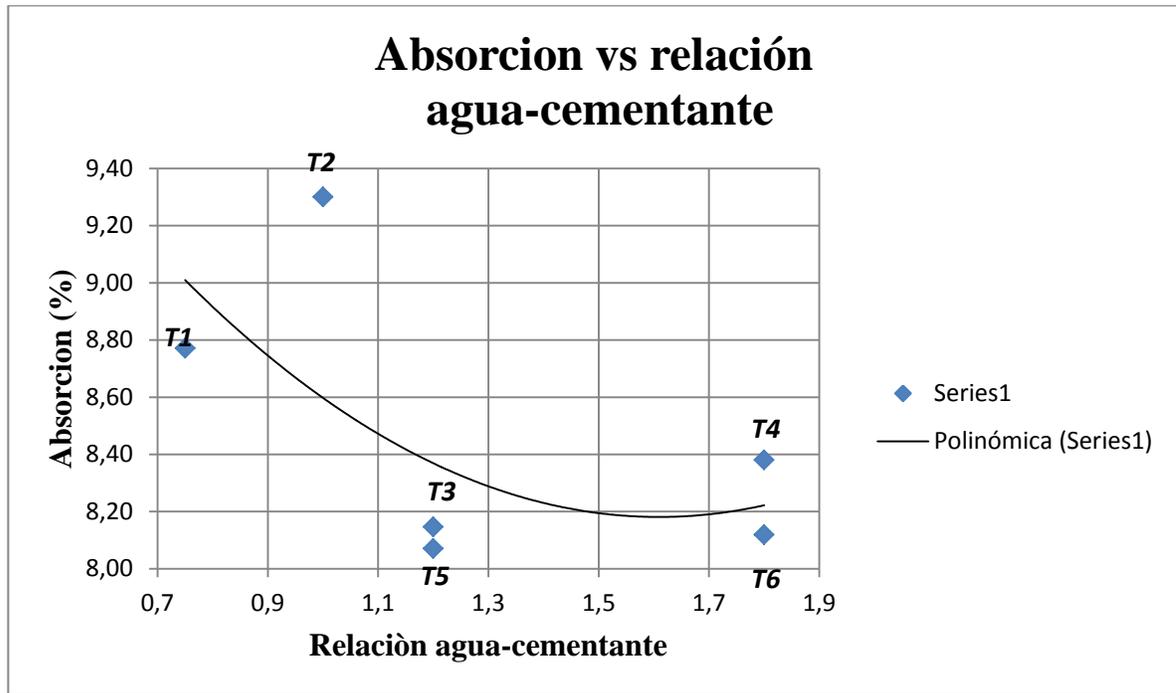


Grafico 13, Absorción vs relación agua cementante. (Beltrán y Borrego., 2014).

Los resultados arrojaron que a menor relación agua-cementante, la absorción es mayor como se puede evidenciar en la línea de tendencia de la gráfica 13. También se puede observar que después de cierta relación el valor tiende a estabilizarse.

Por último al comparar los datos obtenidos entre sí, como se muestra en la gráfica 14, se encuentra una correlación directa entre las dos propiedades, lo cual ratifica que la densidad de los agregados es inversamente proporcional a la absorción de agua que estos puedan presentar.

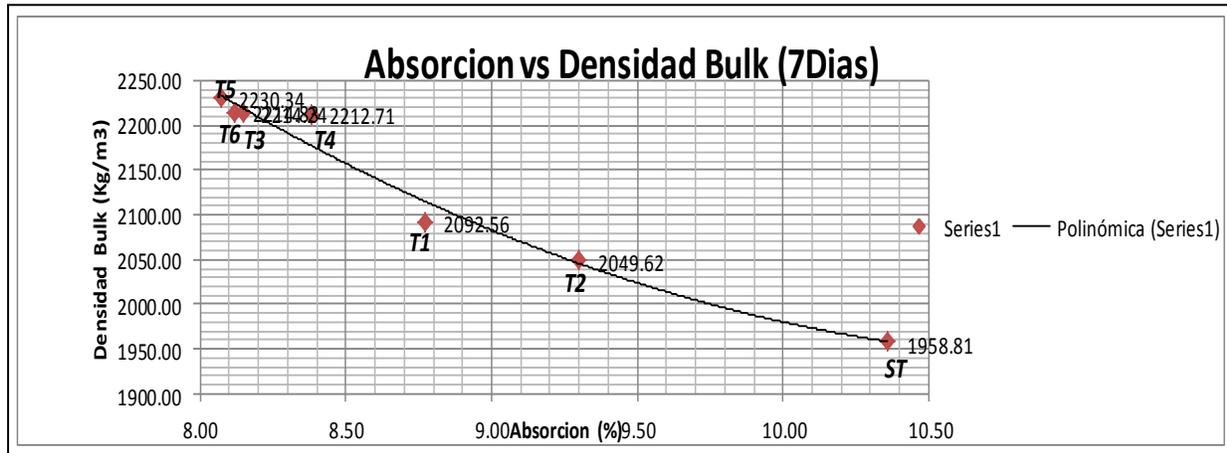


Gráfico 14, Absorción vs Gravedad específica de agregados tratados. (Beltrán y Borrego., 2014).

4.2.2 10% finos con tratamiento

Los agregados sometidos al ensayo de 10% de finos, fueron realizados con una penetración promedio de 18.25mm según la naturaleza del material que en este caso se encontraba entre partículas redondeadas y partículas angulares.

En la siguiente tabla se muestra un resumen con las cargas aplicadas a cada uno de los agregados tratados, para producir un 10% de finos con un margen de error de 2.5%.

Tanto a 3 como a 7 días se realizó el ensayo a dos muestras por material, por lo cual a continuación se presentan valores promedio.

Tratamiento del agregado reciclado	Carga aplicada (Kg) para producir 10±2.5% finos.	
	3 Días	7 Días
T1	15660	16075
T2	15960	17195
T3	9175	11875
T4	9940	11675
T5	11185	12585

T6	8045	9030
----	------	------

Tabla 34. Carga aplicada en agregados reciclados tratados, necesaria para generar 10% finos. (Beltrán y Borrego., 2014).

Con respecto al desempeño mecánico de los agregados reciclados tratados, en los datos obtenidos se encuentra que los tratamientos que poseen menor relación agua-cementante registran una mayor carga que los otros, para generar el mismo porcentaje de finos, tal y como se muestra en la siguiente gráfica:

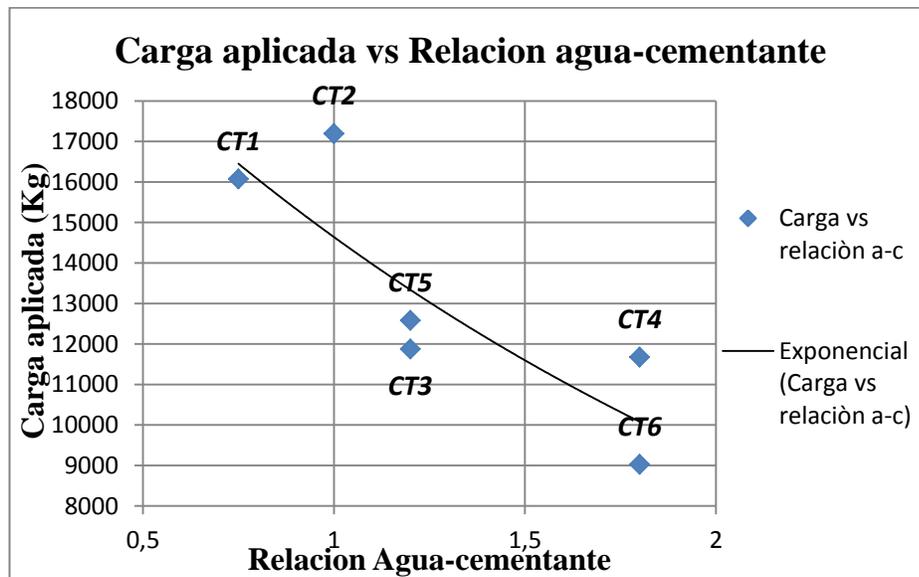


Gráfico 15, Correlación entre la carga aplicada necesaria para generar 10% de finos y relación agua-cementante de los tratamientos. (Beltrán y Borrego., 2014).

Por lo que se deduce que cuando el cementante del tratamiento tiene una mayor concentración, produce un mejor desempeño en la resistencia de los agregados.

De los datos mostrados en la tabla 34, se estableció por medio de un gráfico de barras, la variación en los valores de carga aplicada a los 3 y 7 días de haber ejecutado los tratamientos.

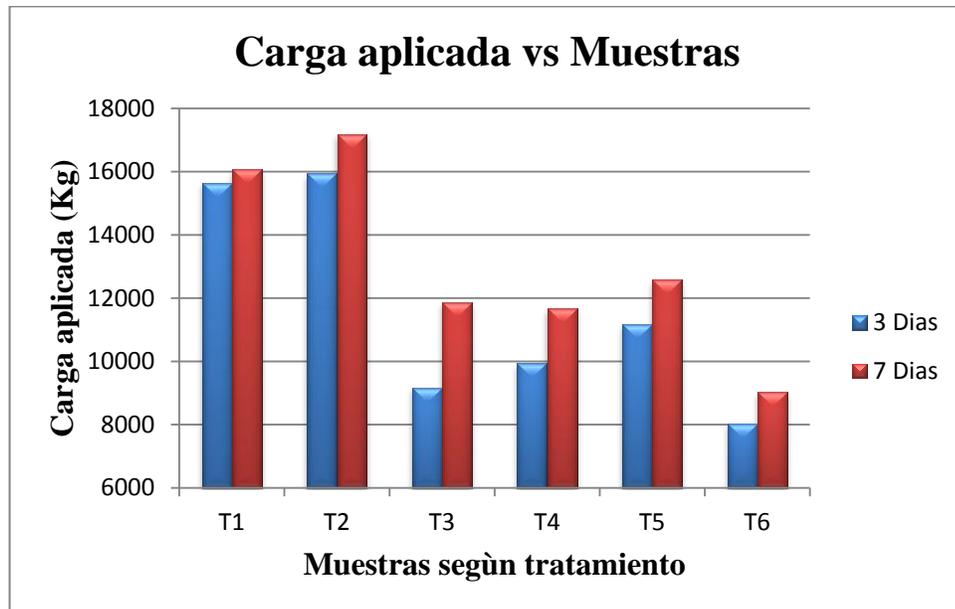


Grafico 16, Carga aplicada a cada muestra para generar el 10% de finos en agregados reciclados tratados. (Beltrán y Borrego., 2014).

Por medio de la gráfica 16, se pudo evidenciar que en los agregados tratados, fue necesario aplicar mayor carga a los 7 días que a los 3, para generar el 10% de finos, lo cual implica que los tratamientos aportan más a la resistencia de los agregados, cuando se permite un tiempo específico de estabilización de método.

4.3 ENSAYOS AL CONCRETO

4.3.1 Consistencia

Se llevó a cabo el ensayo de consistencia a los ocho concretos con sus diferentes tratamientos como se puede observar en el siguiente gráfico:

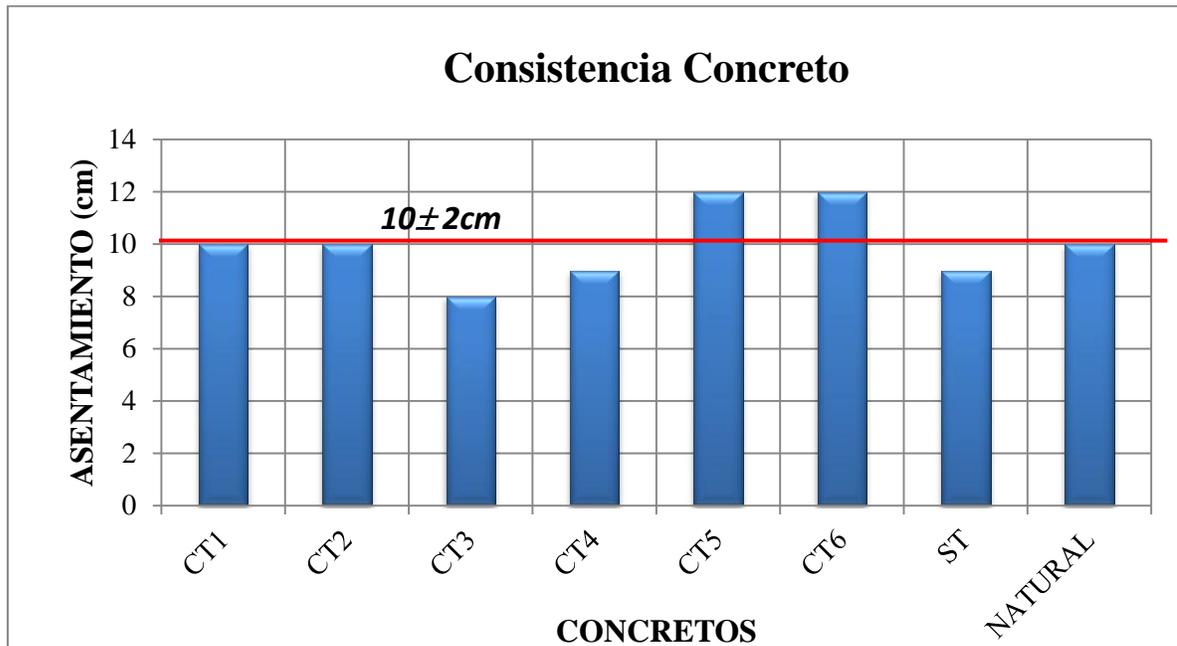


Grafico 17, Consistencia del concreto en estado fresco, de cada muestra. (Beltrán y Borrego., 2014).

Como se observa en el grafico 17, las muestras de concreto reciclado CT5 y CT6 son las que presentan una mayor fluidez, mientras que el concreto CT3, por lo contrario presenta un menor asentamiento y por consiguiente una alta consistencia. Sin embargo todos los datos de asentamiento se encuentran en un rango de $10 \pm 2\text{cm}$, lo cual se puede interpretar como un margen de error aceptable.

Con respecto a los tipos de tratamientos efectuados, se encontró una consistencia mayor en los concretos con lechadas fabricadas de cemento, mientras que los tratados con humo de sílice tienden tener un mayor asentamiento.

4.3.2 Compresión 7 y 28 días

Datos Resistencia a la Compresión de concretos.				
MUESTRA	COMPOSICION	RELACIÓN (A/CEMENTANTE)	RESISTENCIA 7 Días (Mpa)	RESISTENCIA 28 Días (Mpa)
CT1	humo de sílice	0.75	23.3	25.3
CT2	humo de sílice	1	26.2	27.2
CT3	cemento	1.2	28.8	33.0
CT4	cemento	1.8	23.2	24.1
CT5	humo de sílice	1.2	20.6	22.1
CT6	humo de sílice	1.8	22.4	24.6
CST	-	-	17.8	19.0
CN (control)	-	-	21.2	23.5

Tabla 35. Resistencia a la compresión de concretos reciclados y no reciclados. (Beltrán y Borrego, 2014)

De la tabla 35, se puede deducir que en todos los agregados reciclados tratados, el valor de resistencia tuvo algún incremento en relación con el agregado sin tratamiento, evidenciando una afectación positiva de los tratamientos. Para mayor facilidad de interpretación, se realizó la siguiente comparación:

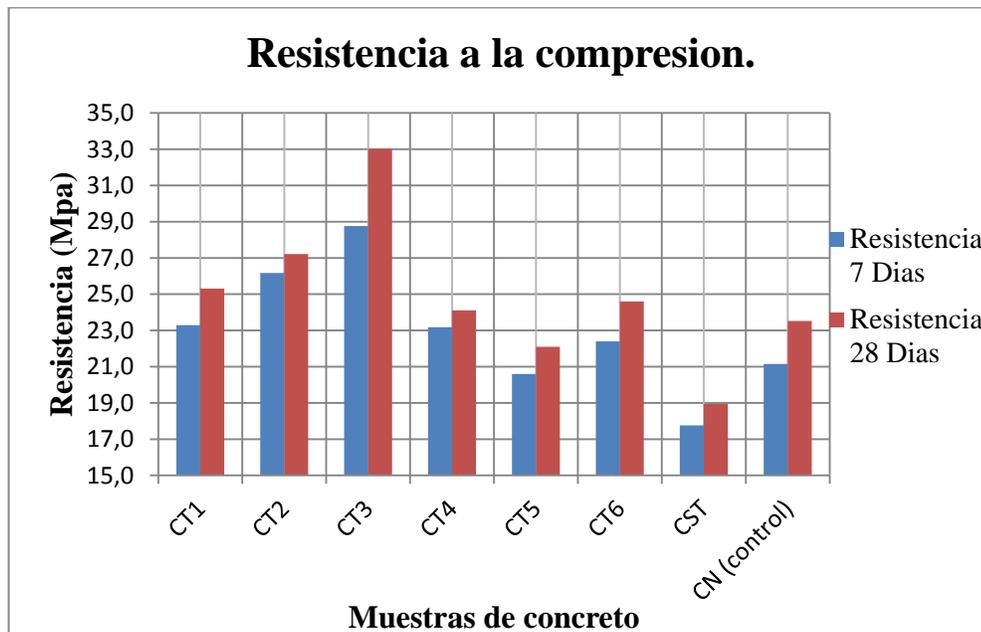


Grafico 18. Datos resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. (Beltrán y Borrego,. 2014).

En la gráfica 18, el concreto que presento una mayor resistencia tanto a los 7 como a los 28 días fue el CT3, el cual fue fabricado con relación agua-cemento de 1.2. La resistencia que presenta el concreto de agregado reciclado sin tratamiento a los 28 días, es inferior al CT3 en un 40% aproximadamente, evidenciando un incremento considerable y positivo para este tratamiento.

De la misma manera, el concreto reciclado sin tratamiento, presenta una resistencia equivalente al 80% de la generada por el concreto natural (CN).

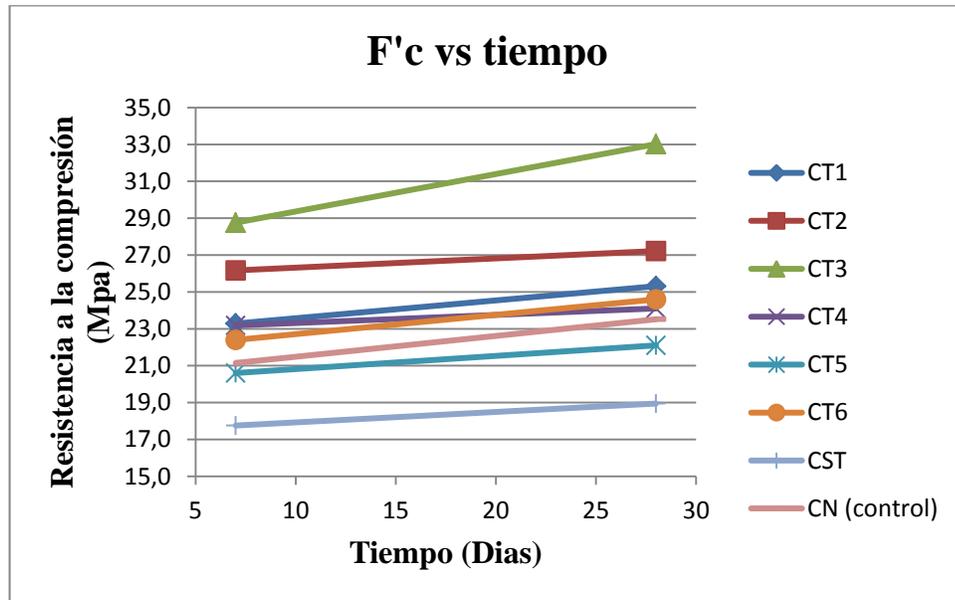


Grafico 19. Desarrollo de la resistencia a la compresión de los concretos en el tiempo. (Beltrán y Borrego,. 2014).

Con respecto al desarrollo de la resistencia del concreto reciclado a lo largo del tiempo, se encontró que el CT3 fue el que mayor resistencia adquirió entre los 7 y 28 días, con un aumento de alrededor del 14%, es decir aproximadamente un 3.8% más que lo alcanzado por el concreto patrón (CN).

Por su parte el concreto con agregado reciclado sin tratamiento, aumento su resistencia en un 4% menos de lo adquirido por concreto natural.

4.3.3 Modulo 7 y 28 días

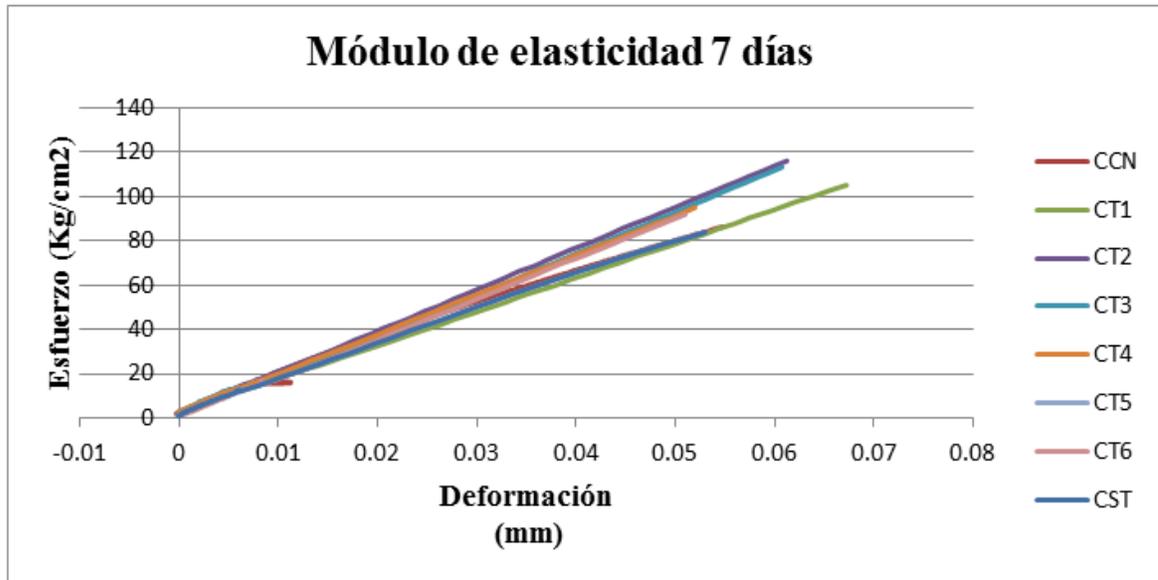


Gráfico 20, Modulo de elasticidad a los 7 Días. (Beltrán y Borrego., 2014).

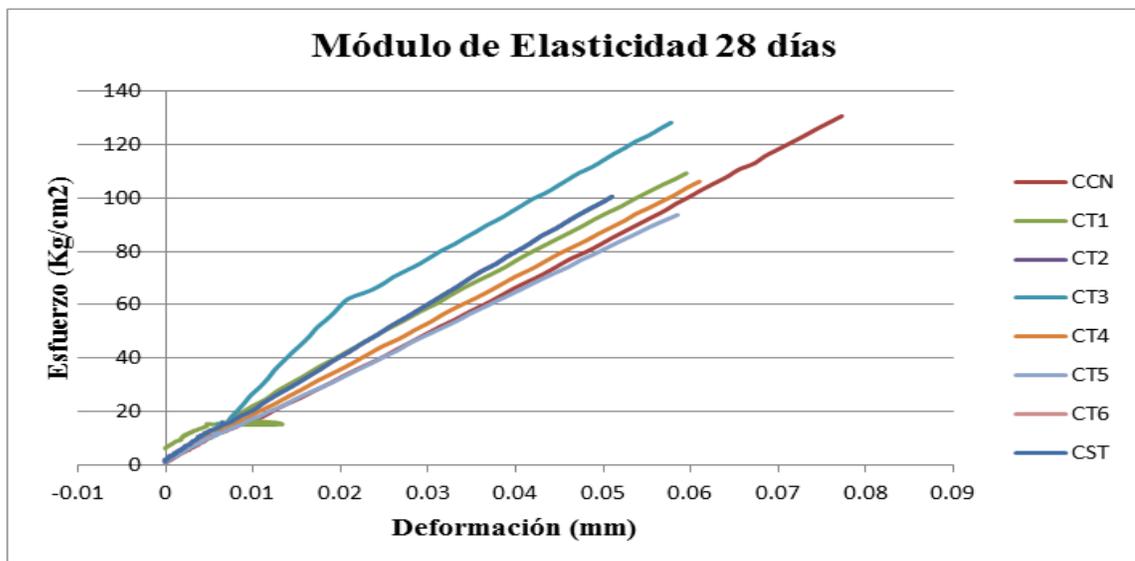


Gráfico 21, Modulo de elasticidad a los 7 Días. (Beltrán y Borrego., 2014).

En los gráficos 20 y 21, se evidencia como el concreto sin tratamiento CST presento una pendiente menor que los concretos con agregados tratados y el control, tanto a 7 como 28 días, arrojando los siguientes valores de Módulo de elasticidad. Por otra parte el comportamiento de la curva esfuerzo vs deformación de los concretos CT1 y CT3 muestra una variación que tiene origen en un error de conexión de los deformímetros de la máquina, al momento de la realización de los ensayos.

MUESTRAS	Módulo de Elasticidad (Mpa)	
	7 Días	28 Días
CN	15695.76	16881
CT1	15535.62	17177.82
CT2	18838.38	19705.38
CT3	18264.12	23754.78
CT4	17956.08	17292.06
CT5	16206.78	16087.44
CT6	18087.66	17548.08
CST	14843.04	15472.38

Tabla 37. Módulo de elasticidad a 7 y 28 Días. (Beltrán y Borrego., 2014).

Se observa que el mayor modulo registrado pertenece al CT3, tal y como se muestra de mejor manera en la gráfico 22.

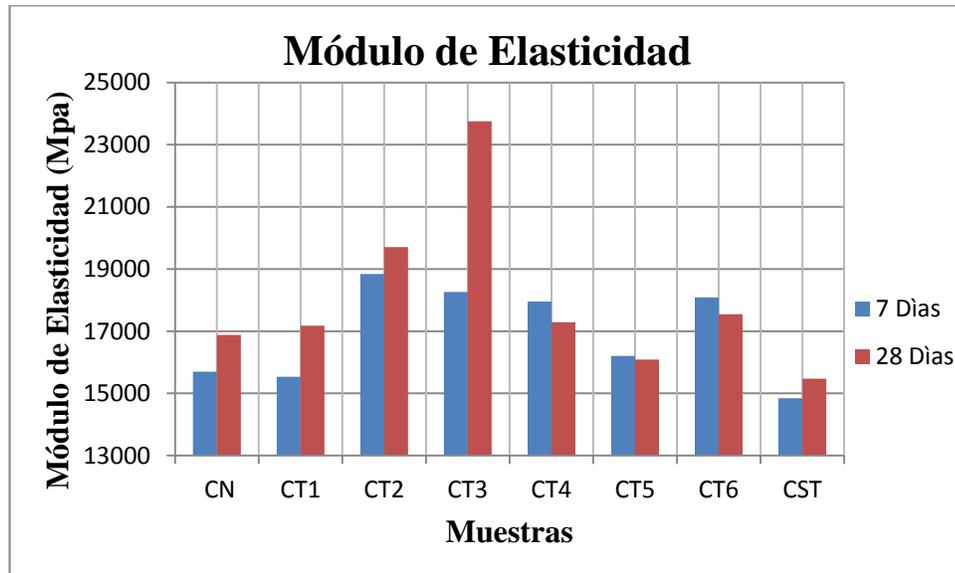


Grafico 22, Módulo de elasticidad a 7 y 28 Días. (Beltrán y Borrego., 2014).

El Módulo del concreto sin tratamiento (CST) es equivalente a un 65% del CT3 y un 92% del CN. De igual manera los demás concretos con agregados tratados mostraron un aumento en el valor del módulo.

El CT3 fue la mezcla que obtuvo un 25% de incremento entre los 7 y 28 días, siendo el mayor entre todos los concretos, mientras el concreto patrón presentó una variación de 7.5%, la cual es 3.5% mayor que la del CST.

4.3.4 Flexión 7 y 28 días

Se determinaron los resultados de carga última, necesarios para el cálculo de módulo de rotura para las diferentes mezclas estudiadas. Dichos datos se muestran en la tabla 36, expuesta a continuación.

Tipo	P ultima		S=F. de rotura		MR	
	(N)		(N)		(MPa)	
Unidades	7 Días	28 Días	7 Días	28 Días	7 Días	28 Días
Tiempo	7 Días	28 Días	7 Días	28 Días	7 Días	28 Días
CN	10220.18	10787.9	30660.5	32363.7	4.6	4.9
CT1	10680.34	12790.3	32041.0	38370.8	4.8	5.8
CT2	12179.7	12507.8	36539.1	37523.5	5.5	5.6
CT3	14135.79	15745.0	42407.4	47234.9	6.4	7.1
CT4	13327.92	14335.1	39983.8	43005.2	6.0	6.5
CT5	10712.03	11997.9	32136.1	35993.7	4.8	5.4
CT6	8254.91	9953.2	24764.7	29859.5	3.7	4.5
CST	7890.9	8765.9	23672.7	26297.7	3.6	3.9

Tabla 36. Calculo de módulo de rotura para los diferentes concretos a 7 y 28 días. (Beltrán y Borrego,., 2014).

Se evidencio por medio de la gráfica que los concretos presentan un incremento en el módulo de rotura, entre los 7 y 28 días después de su fabricación.

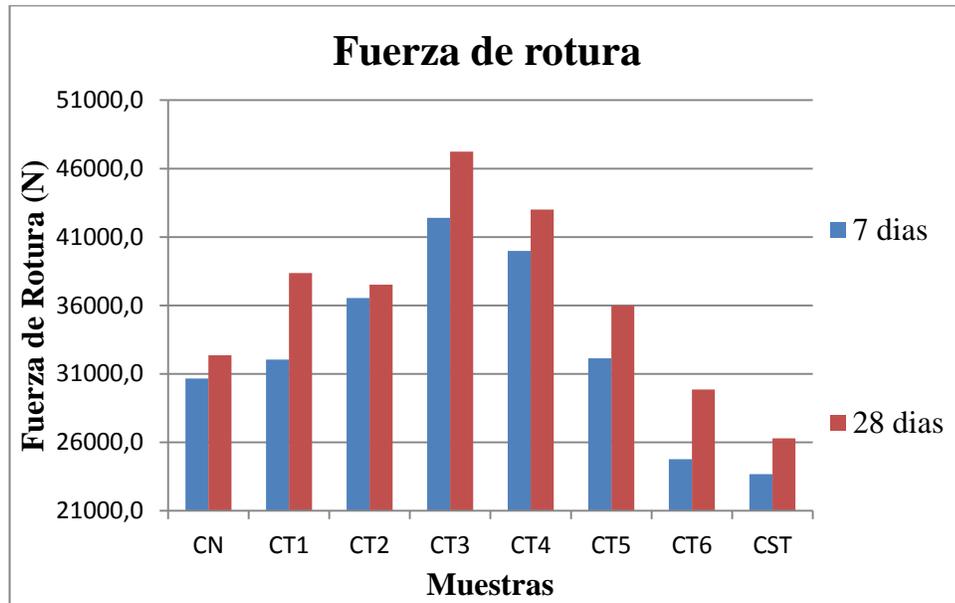


Grafico 23. Desarrollo en el tiempo del Módulo de rotura de cada concreto. (Beltrán y Borrego,, 2014).

La grafica 23 muestra que resistió una mayor fuerza de rotura fue el CT3, superando el MR al control en un 46 %, y al concreto sin tratamiento en un 80 %. Este último fue el que revelo un menor Módulo de Rotura en comparación con todos los concretos.

Por otra parte el CT1 presento un aumento entre los 7 y 28 días de 20%, mientras que el CT3 arrojó un aumento de 11% igual al expuesto por el concreto sin tratamiento. Dicho valor es más o menos 5% mayor del aumento generado en el control.

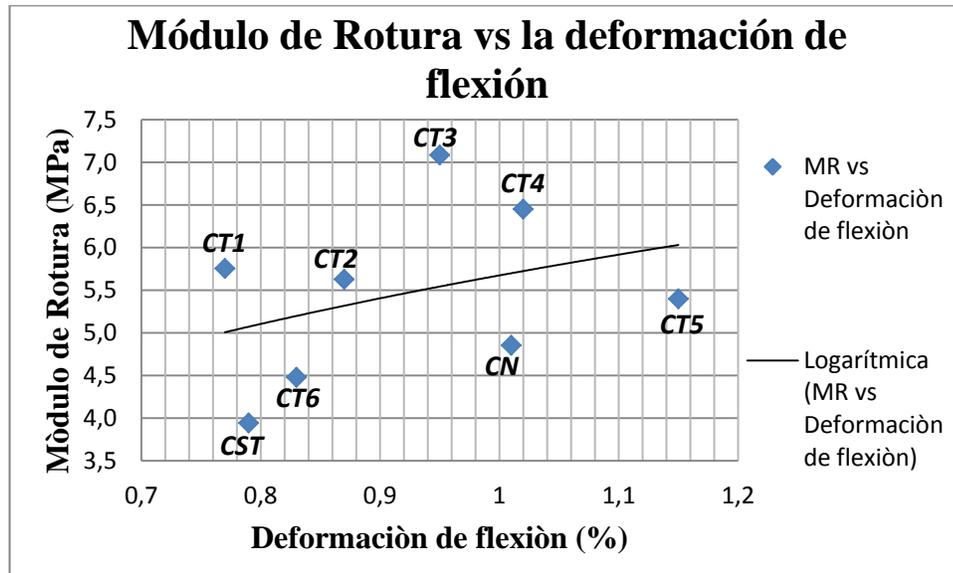


Grafico 24. Relación entre el Módulo de Rotura y la deformación de flexión. (Beltrán y Borrego,. 2014).

Analizando los puntos de dispersión que se encuentran en el gráfico 24, se puede observar una línea de tendencia la cual establece que a mayor módulo de rotura existe una mayor deformación de flexión.

Sin embargo el CT3 obtuvo un valor de MR más alto que otros como CT5, CT4 y CN, los cuales presentaban mayores deformaciones.

Los dos concretos que demostraron mejor desempeño y resistencia a la flexión, fueron tratados con cemento portland.

Las mezclas CT6 Y CT5 mostraron un menor MR, que las CT1 y CT2, las cuales presentaban un tratamiento de relación agua-cementante menor, como se puede evidenciar en el gráfico 25, mostrado a continuación:

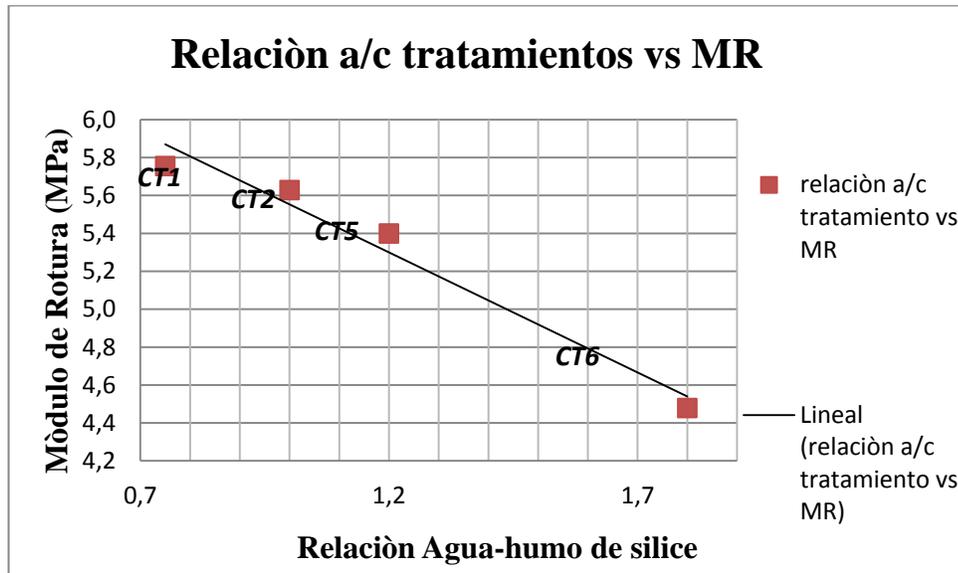


Grafico 25. Correlación entre el MR (Mpa) y relación agua-humo de sílice de tratamientos aplicados. (Beltrán y Borrego., 2014).

De la gráfica anterior, al analizar la línea de tendencia se deduce que en las muestras estudiadas mostraron un mayor valor de MR (Mpa) cuando presentaron relaciones agua-cemento menores. En este caso dichos tratamientos fueron fabricados con humo de sílice.

CONCLUSIONES

1. Se logró evaluar la influencia del tratamiento con lechadas pobres sobre las propiedades físicas de los agregados reciclados, estableciendo una mejora notable en la densidad Bulk y en el porcentaje de absorción y resistencia por 10% de finos, con respecto al agregado sin modificación. También se logró establecer que existe un mejor desempeño en dichas propiedades cuando se permite un tiempo de estabilización, curado e hidratación de los materiales cementicios del tratamiento. De los datos obtenidos se pudo concluir que el tratamiento que presentó cambios más favorables en las propiedades fue el tratamiento 3 (T3).
2. En el concreto en estado fresco, se consiguió evaluar la influencia de los agregados reciclados tratados con lechadas pobres, por medio del ensayo de asentamiento, en donde se estableció que los tratamientos con humo de sílice aportan una mayor manejabilidad en el concreto. Por otro lado, debido a la alta absorción que presentan los agregados reciclados tratados y no tratados, la humedad inicial al momento de fabricar los concretos, es un parámetro influyente en la manejabilidad.
3. Se determinó el grado de afectación que genera la inclusión de agregados reciclados tratados y no tratados sobre propiedades mecánicas del concreto en estado endurecido, tales como resistencia a la compresión, tensión y módulo de elasticidad. En dichas propiedades el concreto que generó el mejor desempeño y mayor incremento fue el concreto con tratamiento 3 (CT3), el cual fue fabricado con lechada estándar de cemento portland con una relación agua-cementante de 1.2. Así mismo los tratamientos de humo de sílice con relaciones bajas generaron mayor resistencia que los fabricados con relaciones altas, esto debido a la mayor concentración del material cementante.

4. Debido a la variación que pueden presentar los agregados reciclados de escombros (ARE) y agregados reciclados de concreto (ARC), al momento de la fabricación del concreto, es de suma importancia la realización de diseños de mezcla específicos. Además, a causa de dicha variabilidad los resultados obtenidos en este trabajo de grado no se pueden generalizar, dado que dependen directamente de las características iniciales del material utilizado.

LINEAS DE INVESTIGACION

A continuación se presentan diferentes estudios que se recomiendan para lograr la profundización y así poder obtener unos resultados completos de la investigación:

- Comportamiento mecánico y durable de concreto con agregado reciclado tratado con lechadas pobres.
- Afectación en las propiedades del concreto en estado endurecido con agregado reciclado tratado con lechadas pobres a diferentes porcentajes de sustitución del mismo.
- Estudio característico de las propiedades del agregado reciclado y fabricación de lechadas pobres con diferentes relaciones agua-cementante.
- Influencia del contenido de agregado reciclado fino en las propiedades físicas y mecánicas del concreto reciclado.

REFERENCIAS

- A.A. di Maio., . 2007. “efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón.”
- Adams et al., 2013 "Applicability of the Accelerated Mortar Bar Test for Alkali-Silica Reactivity of Recycled Concrete Aggregates" recuperado de:
http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/ACEM/PAGES/ACEM20120030.htm
- Alvarez,. 2012. “concreto reciclado.” recuperado de <http://prezi.com/o5w3raulsl-7/concreto-reciclado/>.
- Ayman H,R.,. 2008. “influencia de la variación de las propiedades del árido reciclado en el hormigón endurecido.”
- Barra. M. 1996. “estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación en como hormigón estructural”. Tesis doctoral, universidad politécnica de Cataluña.
- Beltrán y Borrego., 2014 "comportamiento mecánico de concreto concreto con agregado reciclado tratado con lechadas pobres".
- Bureau., 2002. ““specifications facilitating the use of recycled aggregates.”
- C.J. Mendoza, y I.E. Martínez. 2005. “comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados”, november.

Castaño., 2009. “fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados - influencia del contenido de áridos reciclados en las deformaciones diferidas del hormigón estructural.”

Casuccio M, y Giaccio., et al., 2008. *construction and building materials*. vol. vol. 22. failure mechanism of recycled aggregate concrete.

Delgado., s.f. *el humo de sílice o la razón primordial de los hormigones de altas resistencias y/o altas prestaciones (capítulo)*. Recuperado de:http://www.academia.edu/2120433/el_humo_de_silice_o_la_razon_primordial_de_los_hormigones_de_altas_resistencias_y_o_altas_prestaciones_capitulo_.

Eddy.h., 2014. “agregados de concreto reciclado.” *agregados de concreto reciclado. / notas de concretos*. accessed april 14. recuperado de : <http://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/agregados-de-concreto-reciclado.html>.

Eguchi et al., 2007 Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061806001450>

Evangelista., 2007. *mechanical behaviour concrete made with fine recycled concrete aggregates*. vol. vol 29. cement and concrete composites.

Fonteboa., 2002. “hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante”. Universidad de da Coruña, e.t.s.i. caminos, canales y puertos, departam ento de tecnología de la construcción.

Leon de los rios., 2012. “nuevos procesos constructivos- concreto reciclado.”

Grübl P y Rühl M. 1999. “evaluation of modulus of elasticity of concrete with recycled aggregates”, no. darmstadt concrete - annual journal.

Guzmán., 2001. *Tecnología del concreto y del mortero*. Pontificia universidad javeriana.

Guzmán, 2010. “estudio de las propiedades fundamentales de elementos prefabricados de hormigón no estructurales, con incorporación de árido reciclado en su fracción gruesa y fina.” universidad politécnica de Madrid. Recuperado de: <http://ebookbrowse.net/tesis-master-ana-de-guzman-baez-pdf-d417748778>.

Hansen ., 1986. “recycled aggregates and recycled aggregate concrete (second state-of-the-art report developments 1945-1985.”

Hansen T,C., 1983. “strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate.”

Hansen, 1985. *recycled aggregates and recycled aggregate concrete: second state-of-the-art report, developments 1945-1985*. rilem tc-37-drc.

ICONTEC., 1992. “método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto ntc 396.” Recuperado de: http://www.ecopetrol.com.co/documentos/47992_anexo_no._6_ntc396.pdf.

ICONTEC., 1994. “ntc 1776 método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados.” Recuperado de: <http://es.scribd.com/doc/188981548/ntc-1776-metodo-de-ensayo-para-determinar-por-secado-el-contenido-total-de-humedad-de-los-agregados>.

ICONTEC., 1995. “ntc 129. Ingeniería civil y arquitectura. Práctica para la toma de muestras de agregados.” Recuperado de: <http://es.scribd.com/doc/206180146/ntc-129>.

ICONTEC .,2000. “ntc 174.concretos especificaciones de los agregados para concreto.”

ICONTEC., 2000. “ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto ntc 673.” Recuperado de: http://www.ecopetrol.com.co/documentos/47994_anexo_no.8_ntc673.pdf.

ICONTEC., 2004. “método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios) ntc 2871.” Recuperado de: <http://tienda.icontec.org/brief/ntc2871.pdf>.

ICONTEC., 2006. “método de ensayo para determinar el modulo de elasticidad estático y la relación de poisson en concreto a compresión ntc 4025.” Recuperado de: <http://tienda.icontec.org/brief/ntc4025.pdf>.

INVIAS., 2007. “evaluación de la resistencia mecánica de los agregados gruesos por el método de 10% de finos i.n.v. e – 224 – 07.” Recuperado de: ftp://ftp.ucauca.edu.co/facultades/fic/ingcivil/especificaciones_normas_inv-07/normas/norma%20inv%20e-224-07.pdf.

INVIAS., 2007. “gravedad específica y absorción de agregados gruesos i.n.v. e – 223 – 07.” Recuperado de:

ftp://ftp.ucauca.edu.co/facultades/fic/ingcivil/especificaciones_normas_inv-07/normas/norma%20inv%20e-223-07.pdf.

INVIAS., 2007. “gravedad específica y absorción de agregados finos i.n.v. e – 222.”

Recuperado de

http://ftp.unicauca.edu.co/facultades/fic/ingcivil/especificaciones_normas_inv-07/normas/norma%20inv%20e-222-07.pdf.

INVIAS., 2007d. “densidad del cemento hidráulico i.n.v.e- 307.” Recuperado de:

ftp://ftp.ucauca.edu.co/facultades/fic/ingcivil/especificaciones_normas_inv-07/normas/norma%20inv%20e-307-07.pdf.

Kikuchi M y Ehara K. 1993. “the total evaluation of recycled aggregate and recycled concrete.” in *demolition and reuse of concrete and masonry: proceedings of the third international rilem symposium*, pp. 367–378. crc press.

kreijger.,1983. “hergebruik van bouw-en sloopafval als toeslagmateriaal in beton.”

Limbachiya y roberts., 2004. *construction demolition waste*. thomas telford.

Etxeberria y vazquez.,2007. *materials and structures*. rilem 2006.

Marmash., 2011. The properties of recycled precast concrete hollow core slabs for use as replacement aggregate in concrete.

Recuperado de :<http://etheses.nottingham.ac.uk/3501/>

Martínez S y mendoza, E. 2006. “comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados.” *ingeniería, investigación y tecnología* 7 (3): 151–64.

Nealen A., 1997. “consistency aspects in the production of concrete using aggregates from recycled demolition material.” *darmstadt concrete, annual journal* 12.

Oikonomou., 2005. “recycled concrete aggregates.”

Schmidt y nealen., 1999. “concrete made from recycled aggregate: experiences from the building project ‘waktspirales.’” <http://www.b-i-m.de/public/tudmassiv/damcon99gruebl.htm>.

Poon, Kou y. Lam. 2002. “use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks.” *construction and building materials* 16 (5): 281–89. doi:10.1016/s0950-0618(02)00019-3.

Velazquez.,2004. ““ *concreto reciclado* ””. México: instituto politécnico nacional.

Rashwam S, abourizk S., 1997. “research on an alternative method for reclaiming leftover concrete.” *concrete international* no 7.

Ravindrarajah., 1998. *methods of improving the quality of recycled aggregate concrete*. Vol. 2. ed. y. kasai; pp. 575-584+a49.

Rice w., 2013. *standard methods for the examination of water & wastewater*. Recuperado de: <http://www.standardmethods.org/store/shoppingcart.cfm>.

Ruhl M. 1997. “water absorption capacity of recycled demolition rubbish”. darmstadt concrete.

Rueda., 2011. “tipología de áridos reciclados en Cataluña y su aplicabilidad”. Tesis de maestría, Cataluña: universidad politécnica de Cataluña.

Sánchez De Juan m. 2005. “estudio sobre utilización de áridos reciclados en hormigón estructural”. Tesis doctoral, universidad politécnica de Madrid.

Saus, m y C.defagot1. 2006. “estudio de hormigones elaborados con residuos de ladrillerías y de demolición.”

Secretaria distrital de ambiente., 2011. “resolución 2397.” recuperado de:<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/norma1.jsp?i=42762>.

Solar., 2012. “ingeniería civil: agregados para el concreto.” *ingeniería civil*. Recuperado de: <http://fatimalaymedelsolar.blogspot.com/2012/10/agregados-para-el-concreto.html>.

Spaeth y Tegguer. 2014. “improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments.” *international journal of sustainable built environment*.

T. Yen., 1986. “strength and workability of recycled aggregate concrete.”

Tam, vw. y., c. m. Tam. 2007. “assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach.” *journal of materials science* 42 (10): 3592–3602. doi:10.1007/s10853-006-0379-y.

- Tam, v. gao, y c.m. tam. 2005. “microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach.” *cement and concrete research* 35 (6): 1195–1203. doi:10.1016/j.cemconres.2004.10.025.
- Topcu I.B. 1997. *cement and concrete research*. vol. vol 27. physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete.
- Vanegas., 2008. “estudio experimental de las propiedades mecánicas del concreto reciclado para su uso en edificaciones convencionales”. Pontificia universidad javeriana.
- Vázquez E.,. 2002. “hormigón de áridos reciclados: retracción.” in brasil.
- Wainwright,. 1994. “rilem recommendation,specifications for concrete with recycled aggregates.”
- Zaharieva, et al. 2003,roumiana, françois buyle-bodin, Frédéric skoczylas, and eric wirquin. 2003. “assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete.” *cement and concrete composites* 25 (2): 223–32. doi:10.1016/s0958-9465(02)00010-0.
- Zhao, Zhihui, shoude wang, Lingchao lu, and Chenchen gong. 2013. “evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar.” *construction and building materials* 43 (june): 191–96. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.01.032.