

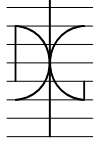

<p>Autor / Author: Jesus Orlando Castaño Tabares</p>	<p>Fecha / Date: Julio / 2009</p>	
<p>Título / Title: FLUENCIA Y RETRACCIÓN DE HORMIGÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS - Influencia Del Contenido De Áridos Reciclados En Las Deformaciones Diferidas Del Hormigón Estructural.</p>		
<p>Directores trabajo / Supervisors: Ing Dr. ALBERTO DOMINGO CABO Ing Dr. JOSE M^a MONZO BALBUENA</p>	<p>Código / Code No.</p>	<p>Nº páginas / Pages 299</p>
<p>Departamento / Department: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL</p>		
<p>Programa / Program: MASTER EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN</p>		
<p>Universidad / University: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA</p>		 <p>UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA</p>
<p>Palabras clave / Keywords: Hormigón de áridos reciclados, fluencia, retracción. Recycled aggregate concrete, Creep, Shrinkage.</p>		
<p>Códigos UNESCO: 3305,05 3305,06 3312,09</p>		

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS	3
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	7
ÍNDICE DE TABLAS	13
ÍNDICE DE ECUACIONES	16
ÍNDICE DE GRÁFICOS	18
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	25
ANTECEDENTES.....	25
ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.	27
ESQUEMA METODOLÓGICO.	28
CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE.....	31
2.1 INTRODUCCIÓN AL HORMIGÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS.....	31
2.2 ESTADO ACTUAL DEL RECICLADO DE ÁRIDOS EN ESPAÑA.....	32
2.3 ÁRIDOS RECICLADOS DE HORMIGÓN.....	35
2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS.	36
2.5 PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS.....	40
2.5.1 Granulometría.....	40
2.5.2 Forma y Textura Superficial.....	43
2.5.3 Mortero Adherido.....	45
2.5.4 Densidad.	46
2.5.5 Absorción.....	48
2.5.6 Resistencia a la Abrasión.	52
2.5.7 Contenido de Contaminantes e Impurezas.....	53

2.5.8	Aspectos de Durabilidad de los Áridos Reciclados.....	54
2.5.9	Áridos Reciclados de Calidad.....	56
2.6	REQUERIMIENTOS DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS	60
2.7	HORMIGÓN RECICLADO.....	69
2.8	PROPIEDADES DEL HORMIGÓN RECICLADO.....	72
2.8.1	Consistencia.....	72
2.8.2	Densidad Fresca y Contenido de Aire.....	76
2.8.3	Densidad.....	77
2.8.4	Resistencia a Compresión.....	77
2.8.5	Desarrollo de la Resistencia a Compresión.....	83
2.8.6	Modulo de Deformación.....	84
2.8.7	Relación Modulo De Deformación – Resistencia a Compresión.....	87
2.8.8	Relación Tensión - Deformación.....	89
2.8.9	Resistencia a Tracción.....	91
CAPITULO 3: DEFORMACIONES DIFERIDAS		97
3.1	RETRACCIÓN.....	98
3.1.1	Factores que Afectan la Retracción.....	98
3.2	TIPOS DE RETRACCIÓN	105
3.2.1	Retracción Térmica.....	105
3.2.2	Retracción Plástica.....	105
3.2.3	Retracción Autógena.....	106
3.2.4	Retracción Química.....	107
3.2.5	Retracción de Secado	108
3.2.6	Retracción por Carbonatación.....	109
3.3	MECANISMOS Y TEORÍAS DE LA RETRACCIÓN	110
3.4	FLUENCIA.....	113
3.5	TIPOS DE FLUENCIA.....	116
3.5.1	Fluencia Básica.....	116
3.5.2	Fluencia de Secado.....	117
3.6	MECANISMOS Y TEORÍAS DE LA FLUENCIA	119
3.7	FACTORES QUE AFECTAN LA FLUENCIA.....	124

3.8	RELACIÓN DEFORMACIÓN - TIEMPO.....	144
3.9	RELAJACIÓN.....	145
3.10	RECUPERACIÓN DE FLUENCIA.....	146
3.11	DEFORMACIONES DIFERIDAS DEL HORMIGÓN RECICLADO.....	152
3.11.1	Retracción del Hormigón Reciclado.....	152
3.11.2	Fluencia del Hormigón Reciclado.....	157
3.12	PREDICCIÓN DE DEFORMACIONES DIFERIDAS.....	161
3.12.1	ACI-209.....	162
3.12.2	CEB-FIP (Código Modelo 90).....	165
3.12.3	B3.....	169
3.13	PREDICCIÓN DE DEFORMACIÓN DESDE DATOS EXPERIMENTALES.....	173
CAPITULO 4: MÉTODOS Y NORMATIVA UTILIZADA.....		177
4.1	CARACTERIZACIÓN DE ÁRIDOS.....	177
4.2	PROPORCIONES DE MEZCLA.....	179
4.3	FABRICACIÓN DE PROBETAS Y CURADO.....	180
4.4	CARACTERIZACIÓN DE HORMIGÓN.....	181
4.5	METODOLOGÍA DE ENSAYOS DE RETRACCIÓN Y FLUENCIA DE HORMIGÓN.....	183
CAPITULO 5: EXPERIMENTACIÓN.....		189
5.1	ENSAYOS Y ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES.....	190
5.1.1	Densidad de las Partículas y Absorción.....	190
5.1.2	Granulometría.....	193
5.1.3	Mortero Adherido.....	200
5.1.4	Resistencia a la Abrasión.....	201
5.1.5	Coefficiente de Forma.....	201
5.1.6	Ensayos al Cemento.....	202
5.2	ENSAYOS AL HORMIGÓN.....	203
5.2.1	Consistencia.....	203
5.2.2	Densidad y Resistencia a Compresión.....	206
5.2.3	Evolución de la Resistencia a compresión.....	209
5.2.4	Modulo de Deformación.....	212
5.3	ENSAYO DE RETRACCIÓN POR SECADO.....	220

5.3.1	Retracción Hormigón a/c 0.5, Curado 7 Días, Ambiente Estándar	220
5.3.2	Retracción Hormigón a/c 0.5, Curado 28 Días, Ambiente Estándar	222
5.3.3	Retracción Hormigón a/c 0.5, Curado 28 Días, Ambiente 2	224
5.3.4	Retracción Hormigón a/c 0.65, Curado 7 Días, Ambiente Estándar	225
5.3.5	Retracción Hormigón a/c 0.65, Curado 28 Días, Ambiente Estándar	228
5.3.6	Retracción Hormigón a/c 0.65, Curado 28 Días, Ambiente 2	230
5.3.7	Influencia de las Proporciones de la Mezcla en las Deformaciones por Retracción. 231	
5.3.8	Influencia de las Condiciones y Duración del Curado en las Deformaciones de Retracción del Hormigón.	232
5.4	MODELOS DE PREDICCIÓN DE RETRACCIÓN	236
5.4.1	Modelación Numérica de Retracción del Hormigón Relación a/c 0.5	236
5.4.2	Modelación Numérica de Retracción del Hormigón Relación a/c 0.65	244
5.5	ENSAYO DE FLUENCIA	252
5.5.1	Fluencia de Hormigón Reciclado A/C 0.5 Condición Expuesta	252
5.5.2	Fluencia de Hormigón Reciclado relación a/c 0.5 Condición Sellada	255
5.5.3	Fluencia de Hormigón Reciclado Relación a/c 0.65 Condición Expuesta.....	257
5.5.4	Fluencia de Hormigón Reciclado relación a/c 0.65 Condición Sellada	260
5.6	EVALUACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN DE FLUENCIA	262
5.7	PREDICCIÓN DE LAS DEFORMACIONES DIFERIDAS A LARGO PLAZO, POR MEDIO LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE ENSAYOS A MEDIANO PLAZO.....	267
5.7.1	Retracción a Largo Plazo.	267
5.7.2	Fluencia a Largo Plazo	274
5.8	RELACIÓN PROPIEDADES DIFERIDAS - INSTANTÁNEAS	280
	CONCLUSIONES.....	282
	CONCLUSION FINAL	285
	LINEAS DE INVESTIGACION	286
	DIFUSION DE RESULTADOS DE INVESTIGACION	287
	BIBLIOGRAFÍA	288

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1, Áridos Naturales (izq.) y Áridos Reciclados (der.).....	35
Ilustración 2, Nivel de trituración y tasa de recuperación de áridos reciclados. (Nagataky 2004)	40
Ilustración 3, Gradación de AR ($T_{m\acute{a}x}$ 25mm), entre husos granulométricos ASTM C-33 (Hansen 1986)...	41
Ilustración 4, Gradación AR, husos granulométricos ASTM C-33 áridos finos (Hansen 1986)	41
Ilustración 5, Árido reciclado, diagrama de zonas interfaciales	45
Ilustración 6, Mortero adherido en AR de hormigones con diferente w/c (Hansen 1986).....	45
Ilustración 7, Relación entre la densidad y el tamaño máximo del árido reciclado (Sánchez 2005).....	48
Ilustración 8, Relación entre el tamaño máximo del árido y la absorción (Sánchez 2005)	49
Ilustración 9, Absorción de AR en función de la densidad (Kreigjer 1983)	49
Ilustración 10, Relación entre la densidad y la absorción del árido reciclado grueso (Sánchez 2005).....	50
Ilustración 11, Relación entre la densidad y la absorción del árido reciclado grueso (Ruhl 1997)	51
Ilustración 12, Capacidad de absorción del árido reciclado 24 horas – 10 minutos (Ruhl 1997).....	51
Ilustración 13, Refinamiento de áridos reciclados por método de calentar y frotar (Kasai 2006)	57
Ilustración 14, Refinamiento de áridos reciclado, método Cyclite.....	58
Ilustración 15, Efectos del proceso de refinamiento de áridos reciclados.....	58
Ilustración 16, Refinamiento de áridos reciclados, método Screw grinding Kasai 2006).....	59
Ilustración 17, Refinamiento de áridos reciclados, método Chain crusher (Y Kasai 2006).....	59

Ilustración 18, Pérdidas de manejabilidad en función del tiempo (Nealen 1997).....	73
Ilustración 19, Corrección de la consistencia del hormigón adicionando agua.....	74
Ilustración 20, Corrección de la consistencia del hormigón reciclado adicionando súper plastificante.....	74
Ilustración 21, Tasa de pérdida de cono del hormigón reciclado (Kou 2006)	75
Ilustración 22, Tasa de pérdida de cono del hormigón reciclado con 25% ceniza volante (Kou 2006)	75
Ilustración 23, Contenido de aire Relativo de mezclas de hormigón reciclado (Kuo2006)	76
Ilustración 24, Resistencia a compresión de hormigón original y reciclado (Ravindrarajah 1985)	78
Ilustración 25, Potencial de resistencia a compresión de hormigón reciclado, relacionado con la resistencia del hormigón de control (Sanchez 2005).....	80
Ilustración 26, Coeficiente de reducción de la resistencia del hormigón a compresión (Sánchez 2005)....	81
Ilustración 27, Relación resistencia a compresión - densidad del hormigón reciclado (Xiao 2005).....	82
Ilustración 28, Desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón reciclado (Ravindrarajah 2000) ...	83
Ilustración 29, Modulo elástico, hormigón de áridos reciclados de hormigón y cerámicos (Grübl 1999) ...	86
Ilustración 30, Modulo de deformación, función de la resistencia a compresión y densidad, por distintas expresiones propuestas (Xiao 2006)	88
Ilustración 31, Resistencia a compresión, mezclas de hormigón con áridos naturales, reciclados de hormigón y reciclados cerámicos) (Rühl 1999).....	89
Ilustración 32, Deformación bajo máxima tensión, mezclas de hormigón con áridos naturales, reciclados de hormigón y reciclados cerámicos) (Rühl 1999).....	90
Ilustración 33, Aumento de la deformación bajo máxima carga del hormigón reciclado según la cantidad y tipo de áridos utilizados (Rühl 1999).....	90
Ilustración 34, Relación resistencia a tracción indirecta - resistencia a compresión cúbica (Grubl 1998) ..	92
Ilustración 35, Resistencia a tracción en función de la resistencia a compresión.....	94
Ilustración 36, Resistencia a tracción en función de la resistencia a tracción del mortero (Kheder2005) ..	95
Ilustración 37, Tipos de deformaciones en función del tiempo (ACI Committee 209, 2005).....	97
Ilustración 38, Relación entre la retracción última del hormigón y el modulo elástico de los áridos	100
Ilustración 39, Efecto de relación a/c y el volumen de áridos sobre la retracción (Neville 1996).....	102

Ilustración 40, Relación estimada entre la relación a/c y el grado de hidratación. (Powers 1959)	102
Ilustración 41, Pérdida de humedad con el tiempo, para distintos tamaños de probetas	109
Ilustración 42, Representación del modelo de micro estructura de la pasta de cemento (Feldman 1968)	110
Ilustración 43, Fluencia y recuperación de fluencia, (ensayo por Smith 1917) (Neville 1970).....	114
Ilustración 44, Deformaciones diferidas en el hormigón, a) retracción en un espécimen sin carga, b) deformaciones en espécimen sujeto a carga y secado (Neville 1970)	117
Ilustración 45, Fluencia básica, retracción y fluencia por secado	118
Ilustración 46, Fluencia y retracción de hormigón de cemento Portland y con escoria (ensayo de Ross 1938) (Neville 1970).....	125
Ilustración 47, Fluencia específica de hormigón con diferentes cementos (ensayo de Hummel 1959, Neville 1970).....	126
Ilustración 48, Influencia de la sustitución de cemento por ceniza volante sobre la fluencia del hormigón (ensayo por Bamforth 1980) (Neville 1983).....	126
Ilustración 49, Fluencia específica, hormigón de cemento con alto contenido aluminoso (ensayo por Glanville 1939) (Neville 1970).....	127
Ilustración 50, Influencia de la finura del cemento en la fluencia del hormigón (ensayo por Davis 1937, (Neville 1970).....	127
Ilustración 51, Fluencia de hormigón de cemento expansivo a varios niveles de sustitución.....	128
Ilustración 52, Relación fluencia (c) – contenido de árido (g) (Neville 1964)	129
Ilustración 53, Fluencia de hormigón con diferentes tipos de áridos (ensayo por Troxell 1958) (Neville 1970).....	130
Ilustración 54, Relación entre la absorción y la rigidez del árido (Kordina 1960) (Neville 1983).....	131
Ilustración 55, efecto del módulo elástico del árido, sobre la relativa fluencia del hormigón (1 para árido con módulo elástico 69 GPa) (Paper, Concrete society 1973) (Neville 1983)	132
Ilustración 56, Efecto de la relación agua/cemento sobre la fluencia (Neville 1970)	133
Ilustración 57, Relación entre a/c y la fluencia, curva ajustada al contenido de pasta (Neville 1970)	133

Ilustración 58, Influencia de la humedad relativa sobre la fluencia del hormigón (ensayos de Troxel 1958) (Neville 1970).....	134
Ilustración 59, Influencia sobre la fluencia del hormigón, del tiempo de curado en agua antes de la aplicación de la carga (ensayos de L`Hermitte 1965) (Neville 1970).....	135
Ilustración 60, Efecto de la variación de humedad sobre la fluencia del hormigón (ensayo de Al-Alusi 1978) (Neville 1983).....	136
Ilustración 61, Pérdidas de pretensado de hormigón con diferentes áridos, cementos y condiciones de curado (ensayos de Hanson 1964) (Neville 1970).....	136
Ilustración 62, Fluencia de hormigón al aire libre y en laboratorio a 50% de humedad (Ensayo de L`Hermitte 1968) (Neville 1970).....	137
Ilustración 63, Influencia de la temperatura sobre la fluencia específica (Neville 1970).....	138
Ilustración 64, Relación entre la fluencia y la temperatura (Neville 1983).....	139
Ilustración 65, Influencia de temperatura y duración de la carga sobre la fluencia del hormigón (ensayo de Hickey 1967) (Neville 1983).....	139
Ilustración 66, Relación fluencia (1 min.), tensión/resistencia, t_0 5 días (Jones y Richart 1936)(Neville 1970).....	140
Ilustración 67, Influencia de la edad de aplicación de carga sobre la fluencia (Neville 1970).....	141
Ilustración 68, fluencia específica básica y total de hormigón cargado a distintas edades (Niyogi 1973) (Neville 1983).....	141
Ilustración 69, Influencia del tamaño del elemento en la fluencia de hormigón (ensayo de Weil 1959) (Neville 1970).....	142
Ilustración 70, Influencia de la anisotropía sobre la fluencia específica del hormigón (ensayo de Karapetian 1964) (Neville 1970).....	142
Ilustración 71, Influencia del vibrado sobre la fluencia del hormigón (ensayos de Avram 1967) (Neville 1970).....	143
Ilustración 72, Forma general de la curva deformación-tiempo para un material sujeto a fluencia (Neville 1983).....	144
Ilustración 73, Forma general de la curva deformación-tiempo para hormigón sujeto a niveles normales de tensión sostenida (Neville 1983).....	145

Ilustración 74, Relajación a deformación constante (Neville 1970)	145
Ilustración 75, elástica tardía y flujo, componentes de la fluencia. (Neville 1970)	146
Ilustración 76, Variación en el tiempo de la fluencia recuperable e irrecuperable (Neville 1970)	147
Ilustración 77 Diagrama de recuperación de fluencia (Neville 1970)	148
Ilustración 78, Principio de superposición de deformaciones de la recuperación de fluencia (Neville 1983)	148
Ilustración 79, Recuperación de fluencia de hormigón sellado, observada y prevista desde el principio de superposición (ensayo por McHenry 1943) (Neville 1983)	149
Ilustración 80, Influencia de la resistencia sobre la fluencia y recuperación de fluencia (Neville 1970) ...	150
Ilustración 81, Influencia del modulo elástico del árido sobre la recuperación de fluencia (ensayos de Kordina 1960 y Counto 1964) (Neville 1970)	150
Ilustración 82, Relación entre la recuperación de fluencia y el contenido pasta /árido (Ensayos de Roll 1964) (Neville 1970).....	151
Ilustración 83, Retracción por secado de hormigón reciclado distinto contenido de cemento (Nishbayashi 1988).....	154
Ilustración 84, Retracción de hormigón reciclado en función de la porosidad (Gómez-Soberon 2003)....	156
Ilustración 85, Relación retracción del hormigón de control y hormigón reciclado (Sánchez 2005).	156
Ilustración 86, Coeficiente de corrección de retracción para hormigón reciclado en función de la resistencia del hormigón de control (Sánchez 2005)	157
Ilustración 87, Incremento de fluencia entre hormigón reciclado y hormigón de control, corto tiempo (Roos 1998).....	158
Ilustración 88, Comparativa de fluencia específica entre hormigón reciclado y hormigón de control (Fernandez 2003)	160
Ilustración 89, Fluencia específica de hormigón reciclado en función del volumen de poros (Gómez- Soberón 2003)	160
Ilustración 90, Precisión de predecir la fluencia desde ensayos a corto tiempo (Neville 1983)	174
Ilustración 91, Ejemplo de actualización de predicción de retracción usando datos de ensayo a corto plazo y pérdida de humedad final estimada (Bazant y Baweja 2000)	175

Fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados

Ilustración 92, Fabricación y curado de probetas del estudio	181
Ilustración 93, Maquina servo-controlada de ensayo de probetas a compresión	182
Ilustración 94, Ensayo para determinar Modulo de Young	182
Ilustración 95, Registro de masa y deformación de probetas en ensayo de retracción.....	185
Ilustración 96, Bastidor de fluencia y detalle de acumulador hidroneumático de vejiga	186
Ilustración 97, Grupo de Bastidores y equipo informático para ensayo de fluencia.....	187
Ilustración 98, Detalle de bandas extensometricas adheridas a las probetas de hormigón.	187
Ilustración 99, Materiales en estudio: Grava, Gravilla, Arena y Gravilla Reciclada.(izq a der)	190

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1, Requisitos granulométricos norma japonesa del AR, hormigón de edificación (Kasai 1994)	42
Tabla 2, Requisitos granulométricos norma japonesa del AR, hormigón de obra pública (Kasai 1994).....	42
Tabla 3, Husos granulométricos para AR de hormigón según normas Belgas (Vincke 1994).	42
Tabla 4, Husos granulométricos para AR de hormigón según requerimientos Holandeses	43
Tabla 5, Coeficiente de los Ángeles de AR en función del tamaño de partículas (Ravindrarajah 1988) ...	52
Tabla 6, Coeficiente de los Ángeles de AR en función del tamaño de las partículas (Hansen 1983).....	52
Tabla 7, Coeficiente de los Ángeles, comparativo árido natural – árido reciclado	53
Tabla 8, Resultado de ensayos de áridos reciclados de calidad (Kasai 2006)	60
Tabla 9, Modulo elástico de hormigón con diferentes contenidos de áridos reciclados (Won 1999).....	85
Tabla 10, Resistencia a tracción de hormigón reciclado (Di Niro 1998)	93
Tabla 11, Coeficiente de reducción de resistencia a tracción de hormigón reciclado (Sánchez 2005)	95
Tabla 12, Efecto del Tamaño de los áridos sobre la retracción	100
Tabla 13, Influencia del tiempo de curado sobre la retracción (Furnas 1997)	104
Tabla 14, Retracción por secado de áridos reciclados (Poon 2002)	155
Tabla 15, Proporciones de Mezcla Hormigón Reciclado de resistencia elevada, relación a/c 0.5	180
Tabla 16, Proporciones de Mezcla Hormigón Reciclado convencional, relación a/c 0.65	180
Tabla 17, Densidad y absorción de agua de las partículas	191
Tabla 18, Requerimientos Normativos de densidad y absorción para áridos reciclados.....	192
Tabla 19, Modulo Granulométrico de los materiales.....	193

Fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados

Tabla 20, Contenido de Mortero de los áridos reciclados por fracción	200
Tabla 21, Desgaste en la maquina de los Ángeles de las gravillas natural y reciclada	201
Tabla 22, Coeficiente de forma de materiales utilizados	202
Tabla 23, Resultados de ensayos realizados al cemento	202
Tabla 24 Consistencia de hormigón reciclado en cono de Abrams	203
Tabla 25, Densidad y resistencia a compresión de hormigón reciclado 28 días	206
Tabla 26, Resistencia a compresión del hormigón reciclado	209
Tabla 27, Modulo elástico estático del hormigón reciclado	212
Tabla 28, Modulo elástico estático relativo del hormigón reciclado	213
Tabla 29, Modulo de Deformación previsto en función de la Densidad y la Resistencia a compresión. .	215
Tabla 30, Módulo elástico 120 días, probetas expuestas a secado	216
Tabla 31, Módulo elástico 120 días, probetas selladas	217
Tabla 32, Módulo elástico 120 días, relativo al modulo elástico 28 días.	219
Tabla 33, Retracción del hormigón reciclado a/c 0.50 - 28 y 120 días ($t_0=7$ días)	220
Tabla 34, Retracción absoluta y relativa del hormigón reciclado 0.50 - 28 y 100 días ($t_0=28$ días)	223
Tabla 35, Retracción hormigón reciclado a/c 0.5 - 28 y 100 días ambiente 2 ($t_0=28$ días)	225
Tabla 36, Retracción del hormigón reciclado a/c 0.65, 28 y 120 días ($t_0=7$ días)	227
Tabla 37, Retracción del hormigón reciclado a/c 0.65, 35 y 100 días ($t_0=28$ días)	229
Tabla 38, Retracción del hormigón reciclado a/c 0.65, 28 y 100 días ambiente 2 ($t_0=28$ días)	231
Tabla 39, Retracción a 100 días en el ambiente 2 relativa a la obtenida en ambiente 1, Hormigón 0.5 .	232
Tabla 40, Retracción a 77 días en el ambiente 2 relativa a la obtenida en ambiente 1, Hormigón 0.65 .	233
Tabla 41, Evaluación de modelos de predicción de retracción de hormigón a/c 0.5 en ambiente estándar, curado por 7 días	238
Tabla 42, Evaluación de modelos de predicción de retracción de Hormigón 0.5 en ambiente estándar, curado por 28 días	241
Tabla 43, Evaluación de modelos de predicción de retracción de Hormigón 0.5 en ambiente 2, curado por	

28 días	243
Tabla 44, Evaluación de modelos de predicción de retracción de Hormigón a/c 0.65 en ambiente estándar, curado por 7 días	244
Tabla 45, Evaluación de modelos de predicción de retracción de Hormigón 0.65 en ambiente estándar y curado por 28 días	249
Tabla 46, Evaluación de modelos de predicción de retracción de Hormigón 0.65 en ambiente 2, curado por 28 días	251
Tabla 47, Carga aplicada en ensayo de fluencia a hormigones de relación a/c 0.5	253
Tabla 48, Carga aplicada en ensayo de fluencia a hormigones relación a/c 0.65	257
Tabla 49, Retracción a 1 año, del hormigón reciclado	269
Tabla 50, Retracción a tiempo final, del hormigón reciclado como magnitud para el diseño	269
Tabla 51, Nivel de retracción alcanzada a 120 días	270
Tabla 52, Retracción a 1 año, del hormigón reciclado curado 28 días	271
Tabla 53, Retracción a tiempo final, del hormigón reciclado curado 28 días	273
Tabla 54, Coeficiente Ultimo de fluencia Hormigón reciclado relación a/c 0.5	275
Tabla 55, Fluencia Especifica 1 año y ultima, Hormigón reciclado relación a/c 0.5	275
Tabla 56, Coeficiente Ultimo de fluencia Hormigón reciclado relación a/c 0.65	276
Tabla 57, Fluencia Especifica 1 año y ultima, Hormigón reciclado relación a/c 0.65	276
Tabla 58, Resumen de fluencia experimental hormigón reciclado	277

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1, Relación densidad – resistencia a compresión cúbica, (Xiao 2005)	82
Ecuación 2, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión (Ravindrarajah 1985)	87
Ecuación 3, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión (Dhir 1999)	87
Ecuación 4, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión (Dillmann 1998).....	87
Ecuación 5, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión (Mellmann 1999).....	87
Ecuación 6, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión (ACI 318 2002).....	87
Ecuación 7, Modulo de deformación en función de la resistencia y densidad (Kakizaki 1988)	87
Ecuación 8, Modulo de deformación en función de la resistencia y densidad (Zilch y Roos 2001).....	87
Ecuación 9, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión y peso específico	88
Ecuación 10 Modulo de deformación, función de la resistencia a compresión cúbica (GB50010 2002)...	88
Ecuación 11, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión cúbica (Xiao 2006).....	89
Ecuación 12, Relación resistencia a compresión - Resistencia a tracción indirecta (Sanchez 2005).....	93
Ecuación 13, Relación resistencia a compresión - tracción indirecta, códigos	93
Ecuación 14, Relación Resistencia a compresión – tracción indirecta (Xiao 2006).....	94
Ecuación 15, Modelo de efecto de restricción de los áridos, lineal y logarítmica (Pickett 1956)	99
Ecuación 16, función hiperbólica formulada por Ross que describe la fluencia	115
Ecuación 17, función que describe la fluencia por Lorman.....	115
Ecuación 18, Modelo general de fluencia ACI - 209	163
Ecuación 19, Modelo de retracción por secado ACI - 209	164

Ecuación 20, Ecuación general de deformación de fluencia modelo CM 90	166
Ecuación 21, Ecuación general del modelo de retracción MC 90.....	168
Ecuación 22, modelo general de fluencia método B3.....	170
Ecuación 23, Modelo de fluencia básica método B3	171
Ecuación 24, Modelo de fluencia por secado método B3	171
Ecuación 25, Modelo de retracción por secado método B3.....	173
Ecuación 26, Relación entre la pérdida de humedad relativa del elemento a través del tiempo con la retracción a mediano plazo.....	174
Ecuación 27, Valor actualizado de retracción a termino medio a partir de ensayos a corto plazo.	175
Ecuación 28, Cantidad de mortero adherido	200

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Grafico 1, Condiciones ambientales del ensayo	184
Grafico 2, Condiciones ambientales del ensayo (Temperatura)	184
Grafico 3, Condiciones del ensayo (Humedad)	185
Grafico 4, Densidad de los áridos utilizados en el estudio.....	191
Grafico 5, Análisis Granulométrico Arena	194
Grafico 6, Análisis Granulométrico Grava Natural	195
Grafico 7, Análisis Granulométrico Gravilla Natural.....	196
Grafico 8, Análisis Granulométrico Gravilla Reciclada.....	197
Grafico 9, Granulometría de la mezclas de hormigón.....	198
Grafico 10, Huso granulométrico Belga y áridos reciclados utilizados en el estudio.	199
Grafico 11, Huso granulométrico Japonés y áridos reciclados utilizados en el estudio.	199
Grafico 12, Distribución del mortero adherido por fracciones de árido reciclado.....	200
Grafico 13, Demanda de plastificante del hormigón en función del contenido de áridos reciclados.....	203
Grafico 14, Consistencia del hormigón reciclado usado en el estudio.....	204
Grafico 15, Relación consistencia – demanda de plastificante de hormigones reciclados a/c 0,5	205
Grafico 16, Relación consistencia – demanda de plastificante de hormigones reciclados a/c 0,65	206
Grafico 17, Densidad del hormigón reciclado en función del nivel de sustitución de áridos reciclados....	207
Grafico 18, Relación Densidad – Resistencia a compresión	208
Grafico 19, Resistencia a compresión del hormigón reciclado 28 días.....	208

Fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados

Grafico 20, Evolución de la resistencia a compresión del hormigón reciclado relación a/c 0,65	209
Grafico 21, Evolución de la resistencia a compresión del hormigón reciclado relación a/c 0,5	210
Grafico 22, Evolución de la resistencia a compresión relativa hormigón relación a/c 0,65.....	211
Grafico 23, Evolución de la resistencia a compresión relativa hormigón relación a/c 0.5.....	211
Grafico 24, Modulo Elástico del Hormigón Reciclado	212
Grafico 25, Modulo de deformación relativo del hormigón reciclado (edad 28 días)	213
Grafico 26, Modulo de deformación del hormigón reciclado en función de la resistencia a compresión .	214
Grafico 27, Modulo de deformación, función de la densidad y la resistencia a/c 0.65.....	215
Grafico 28, Modulo de deformación, función de la densidad y la resistencia a/c 0.5.....	215
Grafico 29, Modulo de deformación hormigón reciclado 120 días, probetas expuestas a secado	216
Grafico 30, Modulo de deformación hormigón reciclado 120 días, probetas selladas.....	217
Grafico 31, Desarrollo del Modulo de Young hormigón reciclado relación a/c 0.5 en condiciones de curado diferentes	218
Grafico 32, Desarrollo del Modulo de Young hormigón reciclado relación a/c 0.65 en condiciones de curado diferentes	219
Grafico 33, Condiciones de humedad de las probetas de retracción hormigón 0.50.....	220
Grafico 34, Retracción Hormigón Reciclado H40, $t_0=7$ días, Ambiente Estándar.....	221
Grafico 35, Retracción hormigón a/c 0.5_7d en función del contenido de áridos reciclados gruesos, a edades de 28, 50 y 120 días.....	221
Grafico 36, Condiciones de humedad de las probetas en retracción hormigón a/c 0.5, $t_0=28$ días.....	222
Grafico 37, Retracción Hormigón Reciclado a/c 0.5, $t_0=28$ días, Ambiente Estándar.....	222
Grafico 38, Retracción hormigón a/c 0.5_28d en función del contenido de áridos reciclados gruesos, a edades de 28, 50 y 120 días.....	223
Grafico 39, Condiciones de humedad de las probetas en retracción hormigón 0.50, $t_0=28$ días, expuesto a ambiente de secado 2.....	224
Grafico 40, Retracción Hormigón Reciclado 0.5, $t_0=28$ días, Ambiente2 de secado.	225
Grafico 41, Condiciones de humedad de las probetas de retracción hormigón a/c 0.65.....	226

Fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados

Grafico 42, Retracción Hormigón Reciclado a/c 0.65, $t_0=7$ días, Ambiente Estándar.....	226
Grafico 43, Retracción hormigón a/c 0.5_28d en función del contenido de áridos reciclados gruesos, a edades de 28, 50 y 120 días.....	227
Grafico 44, Condiciones de humedad de las probetas en retracción hormigón a/c 0.65, $t_0=28$ días.....	228
Grafico 45, Retracción Hormigón Reciclado a/c 0.65, $t_0=28$ días, Ambiente Estándar.....	228
Grafico 46, Retracción hormigón a/c 0.5_28d en función del contenido de áridos reciclados gruesos, a edades de 28, 50 y 120 días.....	229
Grafico 47, Condiciones de humedad de las probetas en retracción hormigón a/c 0.65, $t_0=28$ días, expuesto a ambiente de secado 2.	230
Grafico 48, Retracción Hormigón Reciclado 0.65, $t_0=28$ días, Ambiente2 de secado.	230
Grafico 49, Influencia de las proporciones de la mezcla del hormigón reciclado curado 7 días.....	231
Grafico 50, Influencia de las proporciones de la mezcla del hormigón reciclado curado 28 días.....	232
Grafico 51, Relación retracción del hormigón reciclado relación a/c 0.5 con la duración del curado	233
Grafico 52, Relación retracción del hormigón reciclado a/c 0.65 con la duración del curado.....	234
Grafico 53, Efecto de duración del curado sobre la deformación de retracción.....	234
Grafico 54, Efecto de duración del curado sobre el secado del hormigón.....	235
Grafico 55, Retracción Hormigón 0.5-0%, curado 7 días, comparada con modelos de predicción	236
Grafico 56, Retracción Hormigón 0.5-20%, curado 7 días, comparada con modelos de predicción	237
Grafico 57, Retracción Hormigón 0.5-50%, curado 7 días, comparada con modelos de predicción	237
Grafico 58, Retracción Hormigón 0.5-100%, curado 7 días, comparada con modelos de predicción	238
Grafico 59, Retracción Hormigón 0.5-0% Ambiente 1, curado28 días, comparada con modelos de predicción	239
Grafico 60, Retracción Hormigón 0.5-20% Ambiente 1, curado28 días, comparada con modelos de predicción	239
Grafico 61, Retracción Hormigón 0.5-50% Ambiente 1, curado28 días, comparada con modelos de predicción	240
Grafico 62, Retracción Hormigón 0.5-100% Ambiente 1, curado28 días, comparada con modelos de	

predicción	240
Grafico 63, Retracción Hormigón 0.5-0% Ambiente 2, curado28 días, comparada con modelos de predicción	241
Grafico 64, Retracción Hormigón 0.5-20% Ambiente 2, curado28 días, comparada con modelos de predicción	242
Grafico 65, Retracción Hormigón 0.5-50% Ambiente 2, curado28 días, comparada con modelos de predicción	242
Grafico 66, Retracción Hormigón 0.5-100% Ambiente 2, curado28 días, comparada con modelos de predicción	243
Grafico 67, Retracción Hormigón a/c 0.65-0%, curado7 días, comparada con modelos de predicción ...	245
Grafico 68, Retracción Hormigón a/c 0.65-20%, curado7 días, comparada con modelos de predicción .	245
Grafico 69, Retracción Hormigón a/c 0.65-50%, curado7 días, comparada con modelos de predicción .	246
Grafico 70, Retracción Hormigón a/c 0.65-100%, curado7 días, comparada con modelos de predicción	246
Grafico 71, Retracción Hormigón a/c 0.65-0% ambiente 1, curado28 días, comparada con modelos de predicción	247
Grafico 72, Retracción Hormigón a/c 0.65-20% ambiente 1, curado28 días, comparada con modelos de predicción	247
Grafico 73, Retracción Hormigón a/c 0.65-50% ambiente 1, curado28 días, comparada con modelos de predicción	248
Grafico 74, Retracción Hormigón a/c 0.65-100% ambiente 1, curado28 días, comparada con modelos de predicción	248
Grafico 75, Retracción Hormigón a/c 0.65-0% ambiente 2, curado28 días, comparada con modelos de predicción	249
Grafico 76, Retracción Hormigón a/c 0.65-20% ambiente 2, curado28 días, comparada con modelos de predicción	250
Grafico 77, Retracción Hormigón a/c 0.65-50% ambiente 2, curado28 días, comparada con modelos de predicción	250
Grafico 78, Retracción Hormigón a/c 0.65-100% ambiente 2, curado28 días, comparada con modelos de predicción	251

Fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados

Grafico 79, Deformación Total por fluencia de hormigón reciclado a/c 0.5.....	252
Grafico 80, Coeficiente de fluencia de hormigón reciclado relación a/c 0.5.....	253
Grafico 81, Fluencia especifica de hormigón reciclado a/c 0.5.....	254
Grafico 82, Deformación por fluencia básica de hormigón reciclado relación a/c 0.5.....	255
Grafico 83, Coeficiente de fluencia básica de hormigón reciclado relación a/c 0.5	256
Grafico 84, Fluencia especifica básica de hormigón reciclado relación a/c 0.5.....	257
Grafico 85, Deformación total de fluencia de hormigón reciclado relación a/c 0.65	258
Grafico 86, Coeficiente fluencia de hormigón reciclado relación a/c 0.65.....	258
Grafico 87, Fluencia especifica de hormigón reciclado relación a/c 0.65	259
Grafico 88, Deformación de fluencia básica del hormigón reciclado relación a/c 0.65	260
Grafico 89, Coeficiente fluencia básica del hormigón reciclado relación a/c 0.65	261
Grafico 90, Fluencia especifica básica de hormigón reciclado relación a/c 0.65.....	261
Grafico 91, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.5_0%.....	262
Grafico 92, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.5_20%.....	263
Grafico 93, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.5_50%.....	263
Grafico 94, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.5_100%.....	264
Grafico 95, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.65_0%.....	264
Grafico 96, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.65_20%.....	265
Grafico 97, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.65_50%.....	265
Grafico 98, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.5_100%.....	266
Grafico 99, Perdida de masa relativa en el proceso de secado del hormigón control relación a/c 0.50..	267
Grafico 100, Retracción a un año, prevista por modelo B3 actualizado con valores experimentales, Hormigón reciclado relación agua/cemento 0.5, curado 7 días.	268
Grafico 101, Retracción a un año, prevista por modelo B3 actualizado con valores experimentales, Hormigón reciclado relación agua/cemento 0.65, curado 7 días.	268
Grafico 102, Influencia del contenido de áridos reciclados en la retracción del hormigón de relación a/c	

Fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados

0.5, curado por 7 días	269
Grafico 103, Influencia del contenido de áridos reciclados en la retracción del hormigón de relación a/c 0.65, curado por 7 días	270
Grafico 104, Factor de Corrección de la deformación por retracción en hormigones reciclados de resistencia convencional y resistencia elevada, curados por 7 días	271
Grafico 105, Retracción a un año, prevista por modelo B3 actualizado con valores experimentales, Hormigón reciclado relación agua/cemento 0.5, curado 28 días	272
Grafico 106, Retracción a un año, prevista por modelo B3 actualizado con valores experimentales, Hormigón reciclado relación agua/cemento 0.65, curado 28 días	272
Grafico 107, Factor de Corrección de la deformación por retracción en hormigones reciclados de resistencia convencional y resistencia elevada, curados por 28 días	273
Grafico 108, Efecto de la duración del curado sobre la retracción	274
Grafico 109, proyección de fluencia especifica a 1 año, hormigón reciclado a/c 0.5	275
Grafico 110, proyección de fluencia especifica a 1 año, hormigón reciclado a/c 0.65	276
Grafico 111, Fluencia básica de hormigón reciclado relación a/c 0,5 en función del contenido de áridos reciclados gruesos	278
Grafico 112, Fluencia básica de hormigón reciclado relación a/c 0,65 en función del contenido de áridos reciclados gruesos	278
Grafico 113, Fluencia total de hormigón reciclado relación a/c 0,5 en función del contenido de áridos reciclados gruesos	279
Grafico 114, Fluencia total de hormigón reciclado relación a/c 0,65 en función del contenido de áridos reciclados gruesos	279
Grafico 115, Factor de Corrección de la deformación por fluencia en hormigones reciclados de resistencia convencional y resistencia elevada.	280
Grafico 116, Relación entre la retracción 100d y la deformación instantánea	281
Grafico 117, Relación entre la fluencia especifica total 100d y la deformación instantánea	281

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

La utilización de muchos subproductos industriales en la construcción se ha desarrollado como ayuda a la sostenibilidad ambiental de dos formas, reutilizando materiales que de otro modo serán arrojados al ambiente, ocupando escasos lugares de vertedero y segundo minimizando la degradación de los recursos naturales al disminuir su extracción. Por tanto el reciclaje es la práctica predominante para la conservación del planeta, sobretodo en la industria de la construcción la cual genera grandes volúmenes de residuos

Aunque estos residuos de construcción y demolición RCD son normalmente compuestos de escombros de hormigón. Ladrillo, tejas, arena y polvo, madera, plástico, cartón y metal, los escombros de hormigón usualmente constituyen la mayor porción de los RCD y se ha observado que estos escombros de hormigón machacados, separados de contaminantes y tamizados, pueden utilizarse como sustituto de áridos naturales para la construcción, llamándolos áridos reciclados

ANTECEDENTES.

Hace poco más de un siglo se realiza el reciclado de áridos principalmente en la industria vial, una práctica ecológica y sostenible implementada por los romanos, cuando al reparar su gran red de caminos reutilizaban los adoquines de piedra.

El primer uso extensivo y bien documentado sobre la reutilización de materiales de demolición como áridos en hormigón fresco fue la época de posterior a la segunda guerra mundial, donde los escombros tras los bombardeos aéreos, particularmente en Reino Unido, Alemania (Graf 1948) y Rusia (Glrzhge 1946) investigaron sobre

las propiedades físicas del material que se usaron para la reconstrucción [1][2][3]. Aunque en los tiempos de la posguerra el material predominante fue escombros de mampostería.

En Japón se inicia la investigación sobre el uso de áridos reciclados, por la sociedad de edificadores contratistas (BSC project) y el ministerio de construcción como alternativas a la crisis del petróleo (1973). A partir de los años 80, en Estados Unidos, Europa y Australia se utilizan masivamente en la industria vial, mientras en España los índices de reutilización de áridos aun son muy bajos y el empleo en hormigón todavía mas escasos. Lo poco principalmente se aprovecha para estabilizaciones de bases y rellenos.

El incremento de la construcción en países desarrollados, los aumentos en las tasa de vertido de desechos, el agotamiento de lugares de vertido y la limitación de recursos naturales, han impulsado el desarrollo de tecnologías y estudios acerca del reciclado de áridos como necesidad prioritaria dentro de los planes de sostenibilidad y protección ambiental desarrollados a escala mundial. No solo promover su utilización en procesos de menor exigencia sino también abrir campos de aplicación en hormigón estructural.

ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.

Pretendiendo realizar una contribución en el desarrollo de la utilización de áridos reciclados de hormigón en la fabricación de hormigón para uso estructural, nos vemos animados a experimentar con los áridos, conocer sus propiedades y cualidades y evaluar las propiedades físico-mecánicas de mezclas de hormigón con distintos niveles de sustitución de la fracción gruesa por áridos procedentes del reciclado de hormigón, analizar la influencia de los áridos reciclados en la fluencia y retracción y predecir las deformaciones diferidas de los hormigones reciclados

por medio de ensayos a corto plazo, como medio de control del comportamiento en servicio de las estructuras de hormigón reciclado a corto y largo plazo.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

Basado en el alcance del proyecto se han definido unos objetivos principales:

- Revisión del estado del arte de áridos reciclados, características especiales e influencia sobre las propiedades físico mecánicas del hormigón, además del estado del arte correspondiente al estudio de deformaciones diferidas en el hormigón.
- Estudiar las principales propiedades de los áridos reciclados y del hormigón reciclado, para desarrollar herramientas que permitan la caracterización de los efectos de la utilización de áridos reciclados en hormigón de grado estructural.
- Realizar un estudio experimental de fluencia y retracción del hormigón a corto plazo, para realizar una comparativa con las propuestas recogidas de diferentes modelos y predecir el comportamiento diferido del hormigón reciclado.
- Estructurar propuestas de futuras líneas de investigación dirigidas al estudio del efecto de la sustitución de áridos reciclados en las deformaciones diferidas del hormigón.

ESQUEMA METODOLÓGICO.

– Capitulo 2

Provee una revisión el estado del arte más relevante, alrededor del reciclado de áridos, sus propiedades y una comparación con los áridos naturales, recogiendo conclusiones de investigaciones previas.

– Capitulo 3

Análisis del estado del arte referente al fenómeno de deformaciones diferidas del hormigón. Se definen los fenómenos de deformación diferida y los mecanismos que la explican, los factores que afectan la fluencia y retracción del hormigón y finalmente se abordan las investigaciones previas sobre este fenómeno en hormigones reciclados.

– Capitulo 4

Estructuración de la propuesta de investigación “deformaciones de fluencia y retracción de hormigón reciclado” a través de un estudio a corto plazo, explicando detalladamente el procedimiento a seguir en la investigación, los equipos a utilizar y normativa de ensayos.

– Capitulo 5

Describe la fase experimental, los ensayos realizados a los áridos y el hormigón reciclado, análisis de los resultados, ajuste de modelos de predicción de deformaciones diferidas y discusión de los resultados.

– Capitulo 6

Conclusiones del estudio y propuesta de continuidad de la investigación, con líneas encaminadas al análisis de deformaciones diferidas en hormigones reciclados.

CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE.

2.1 INTRODUCCIÓN AL HORMIGÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS.

Los áridos reciclados RA se obtienen después del proceso de machaqueo, gradado y limpieza de contaminantes, de residuos de construcción y/o demolición RCD (escombros), de forma que puedan ser utilizados en aplicaciones de ingeniería. Estos pueden contener hormigón, mampostería, metales maderas, plásticos y otros materiales, considerados contaminantes cuando se quiere obtener buen desempeño.

Poseen un campo de aplicación extenso, con potencial aprovechamiento en bases, subbases, rellenos, firmes, terraplenes, rompeolas, escolleras y espigones, bordillos, cunetas, adoquines, bases de tubería y bloques de mampostería entre otros. Su uso trae consigo una serie de ventajas, principalmente ambientales puesto que ayuda a mitigar el impacto de la explotación sobre los recursos naturales y de sostenibilidad al reducir la cantidad de material que va al vertedero. Además los procesos de demolición y procesamiento de áridos in-situ promueven el ahorro energético importante en la crisis que se vive a nivel mundial, abaratamiento del material al suprimir los costos de extracción y transporte, generación de empleo en las fases de separación de contaminantes y una gran ventaja es que es un material con amplio mercado y gran demanda.

La característica principal del árido reciclado por la cual se diferencia de los áridos naturales es la cantidad de mortero remanente sobre la superficie de los áridos originales después del proceso de reciclado, esta capa altamente porosa de mortero residual altera las propiedades del árido influenciando el desempeño del hormigón.

Los inconvenientes de su uso es la escasa normatividad y un uso aun muy restringido, no obstante en las últimas décadas han sido ampliamente estudiadas sus propiedades, observando que la fracción correspondiente a árido grueso puede ser utilizada satisfactoriamente como sustituto de los áridos naturales, alcanzando al menos dos terceras partes de resistencia a compresión y modulo elástico. [4]

En nuestro caso y para el desarrollo del presente estudio nos centraremos en la fracción gruesa de áridos reciclados procedentes de hormigón y su reutilización en hormigón estructural. Uso que actualmente genera una serie de restricciones, debido a los estrictos requerimientos de resistencia y durabilidad de los elementos, por lo que se debe estudiar exhaustivamente la influencia que producen sobre el hormigón, para poder aprovecharlos de forma segura y eficiente.

2.2 ESTADO ACTUAL DEL RECICLADO DE ÁRIDOS EN ESPAÑA.

La producción y gestión de los residuos de construcción y demolición RCD's en España, con las actuales tendencias reguladoras, atraviesan por una serie de cambios beneficiosos para la cuestión, aumentando la tasa de recuperación y reciclaje de una parte importante de RCD's, aunque siempre se enfrenta a un problema de cultura ciudadana hacia el reciclaje.

En la practica España esta a la cola en niveles de reutilización y reciclado de RCD's con un 10%, debido a que por mala gestión en las obras, suele ser mas costoso procesarlos y aprovecharlos que contaminar [5], mientras en países como Bélgica se alcanzan niveles del 87%, Reino Unido 45%, Francia un 15% y en la comunidad Europea un 28% [6].

Al igual que a nivel comunitario, en España existe actualmente una normativa estatal en materia de RCD's, Ley 10/98, cuyo objetivo, es prevenir la generación de residuos, establecer el régimen jurídico de su producción y gestión y fomentar su reducción, reutilización, reciclaje y otras formas de valoración, así como regular los suelos contaminados, con la finalidad de proteger el medio ambiente y la salud de las personas. El plan estratégico específico "Plan Nacional de Residuos de la Construcción y la Demolición PNRCD (2001-2006)", definió las líneas de actuación a seguir en la gestión de los RCD, y estableció los objetivos de valorización para este tipo de residuos, así como las infraestructuras e inversiones necesarias para llevarlo a cabo. Durante su vigencia y en el campo de hormigón estructural, en el (2002 - 2005) se instauró un grupo de trabajo a solicitud de la comisión permanente del hormigón, encargándolo de elaborar un documento que complementa la reglamentación actual de hormigón estructural (EHE) referente a áridos reciclados.

Ampliando los estudios del grupo 2/5, con recomendaciones específicas sobre la utilización del árido reciclado, se desarrolló el proyecto RECÑHOR, el cual a través de 6 instituciones universitarias e investigadoras, bajo la coordinación del Cedex, realiza un "Estudio prenormativo de la utilización de RCD", financiado por la Dirección General de Calidad Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente de España.

Pese a los adelantos en materia de reciclaje de áridos, según estudio del Instituto para la sostenibilidad de los Recursos ISR, se estima que todavía hoy en España más del 60% de los RCD que se generan se eliminan de forma incontrolada en escombreras, agujeros o vaguadas o son desperdigados a precio nulo (en algunos casos a unos céntimos de euro por tonelada), llevando mezclados en su masa residuos de todo tipo, incluso algunos potencialmente peligrosos.

La gestión de los RCD según el actual PNRCD II (2007 – 2015) comprende el conjunto de actividades encaminadas a dar a estos residuos el destino más adecuado, de acuerdo con sus características, para proteger la salud humana, los recursos naturales y el medio ambiente, siguiendo el llamado principio de jerarquía, (valorización frente a eliminación), definido en el artículo 1.1 de la Ley 10/1998, de Residuos:

- reducir la producción de residuos,
- reutilizar al máximo y reciclar lo que no se pueda reutilizar,
- seleccionar en origen los materiales reciclables o valorizables,
- valorizar energéticamente todo lo que no se pueda reutilizar o reciclar,
- depositar en vertedero controlado todos aquellos residuos que no tengan valor económico.

Siguiendo estos principios, el árido reciclado alcanza una valorización significativa si las iniciativas de reciclado/valorización son viables económicamente, algo que va unido al precio que se aplique a alternativas de tratamiento como el vertido. Esta política está particularmente bien establecida en Holanda y Dinamarca, ambas zonas con niveles de reciclaje superiores al 80% de sus RCD. [7]

El Plan PNRCD II fija una serie de objetivos cuantitativos como:

- Recogida controlada y correcta gestión del 95% de los RCD a partir de 2011
- Reducción o reutilización del 15% de RCD en 2011
- Reciclaje del 40% de RCD, a partir de 2011
- Valorización del 70% de los residuos de envases de materiales de construcción a partir de 2010

2.3 ÁRIDOS RECICLADOS DE HORMIGÓN.

Los áridos reciclados se ven como piedra machacada, sin embargo las propiedades físicas difieren de los áridos naturales, en general son más angulosas, con textura superficial más rugosa y formas angulosas y alargadas. Esto hace que requieran mas agua para producir buena manejabilidad.

Las características físicas permiten diferenciar de claramente los áridos naturales de los áridos reciclados de hormigón, cada partícula de árido reciclado en su mayor parte esta compuesta por árido original y mortero adherido [8].



Ilustración 1, Áridos Naturales (izq.) y Áridos Reciclados (der.).

Este mortero de cemento adherido, ligero y poroso, causa en los áridos reciclados que tengan menor peso específico y mayor absorción que áridos naturales de tamaño similar, por lo que desde mediados de los 70, muchos autores se han dedicado a describir los requerimientos mínimos para su utilización en hormigón y

estudiar las propiedades del hormigón producido con áridos reciclado, sin embargo se ha prestado menor atención en el uso de áridos reciclados en hormigón estructural y en aplicaciones de mayor importancia donde las deformaciones diferidas jueguen un papel importante.

2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS.

Cada normativa en los países realiza clasificaciones dependiendo de su composición, su posible utilización o el tipo de material contenido.

Estados Unidos Clasificación según composición:

- A. Residuos triturados procedentes de demoliciones. Son una mezcla de hormigón y residuos cerámicos triturados, clasificados y que contienen cierto porcentaje de otros elementos contaminantes.
- B. Residuos de demolición clasificados y limpios. Son una mezcla de hormigón y residuos cerámicos triturados, clasificados y sin presencia de otros elementos contaminantes.
- C. Residuos cerámicos limpios. Son restos de ladrillos triturados y clasificados que contienen menos del 5% de hormigón, materiales pétreos u otros contaminantes.
- D. Residuos de hormigón limpios. Son restos de hormigones triturados y clasificados que contienen menos del 5% de restos de ladrillo, materiales pétreos u otros contaminantes.

Estados Unidos Clasificación según uso:

- Áridos para rellenos en general. Las cuatro categorías de

composición pueden utilizarse con dicho fin.

- Áridos para drenajes. Las cuatro categorías son adecuadas para emplearse con esta finalidad.
- Áridos para bases y sub-bases de carreteras. Las categorías b, c y d son adecuadas para esos fines.
- Áridos para la fabricación de hormigón. Aunque las categorías b y c pueden emplearse en hormigones de dosificación es la categoría d la más adecuada para esta finalidad.

Clasificación según especificaciones del RILEM 1989

El árido reciclado se podría encajar en las tres siguientes clasificaciones según su origen:

- Tipo I: Áridos procedentes en su mayoría de escombros de mampostería (árido cerámico).
- Tipo II: Áridos procedentes en su mayoría de escombros de hormigón (contenidos < 10% de áridos cerámicos).
- Tipo III: Áridos compuestos de áridos naturales y reciclados (contenidos de árido natural >80% y <10% tipo I o <20% tipo II).

Clasificación en la norma japonesa

Realiza una clasificación de los áridos reciclados en función de su utilización para edificación u obra civil en tres tipos de calidad regulados, respectivamente, por las normas JIS A 5021, JIS A 5022 y JIS A 5023:

- Tipo H: Mayor calidad, hormigón en masa o armado con fin estructural.
- Tipo M: Para utilización en hormigón en masa o losas de hormigón.
- Tipo L: Para utilización en hormigones pobres

Clasificación de las especificaciones Belgas

Son similares a las del Rilem, clasificando los áridos reciclados con respecto a su origen:

- GBSB I: Procedentes de residuos cerámicos.
- GBSB II: Procedentes en mayoría de residuos de hormigón.

Clasificación de la Norma Inglesa BS 8500:02

Establece una clasificación según origen.

- RCA: Áridos procedentes de hormigón
- RA: Áridos procedentes de materiales cerámicos o mezcla de ambos.

Clasificación del Building Research Establishment

Este otro estamento del Reino Unido, ha producido guías sobre el uso de áridos reciclados, entre ellas el Digest 433, el cual realiza una clasificación conforme al RILEM.

- RCA I: Áridos procedentes de ladrillo,
- RCA II: Áridos procedentes de hormigón con contenido de ladrillo de 0 -10%
- RCA III: Áridos procedentes de hormigón y ladrillo, con contenidos de ladrillo de 0 - 50%.

Clasificación En Alemania por la norma DIN 4223,

Realiza una clasificación según el contenido de los residuos.

- Tipo 1: Áridos procedentes de hormigón >90%, con contenidos < 10% de clinker, ladrillo o arenisca calcárea.
- Tipo 2: Áridos procedentes de hormigón >70%, con contenidos <

30% de clinker, ladrillo o arenisca calcárea.

- Tipo 3: Áridos procedentes de residuos cerámicos >80%, con contenidos de materiales procedentes de hormigón <20%
- Tipo 4: Áridos procedentes de mezclas de RCD, con contenidos >80% de materiales procedentes de hormigón o productos cerámicos.

Clasificación en Holanda por la norma NEN 5905

- Tipo 1: Áridos reciclados de hormigón.
- Tipo 2: Mezcla Áridos reciclados de hormigón y árido cerámico.
- Tipo 3: Áridos reciclados cerámicos.

Clasificación En España

La nueva EHE en su anejo 15, define como hormigón reciclado (HR), el hormigón fabricado con árido grueso reciclado procedente del machaqueo de residuos de hormigón y recomienda limitar para su aplicación en hormigón estructural el contenido de árido grueso reciclado al 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso y resistencia característica no superior a 40 N/mm².

Quedan fuera de los objetivos de este anejo:

- Árido fino reciclado.
- Áridos reciclados de naturaleza distinta del hormigón.
- Áridos procedentes de estructuras con patologías que afectan a la calidad del hormigón tales como álcali-árido, ataque por sulfatos, fuego, etc.
- Hormigones fabricados con áridos reciclados procedentes de hormigones especiales: aluminoso, con fibras, con polímeros, etc.

2.5 PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

2.5.1 Granulometría

La granulometría de los AR esta relacionada con el sistema de trituración utilizada para su reducción, así pues que las machacadoras de impactos y conos producen mayor porcentaje de finos, por lo que varios autores recomiendan una trituración primaria con machacadoras de mandíbulas, las cuales producen un porcentaje de finos relativamente bajo.

Por lo general el árido producido tiene una buena gradación, con un porcentaje entre 70% y 90% de fracción gruesa [9], aunque si se desea árido reciclado de mayor calidad, se debe recurrir a trituración secundaria, minimizando la tasa de recuperación de árido grueso.

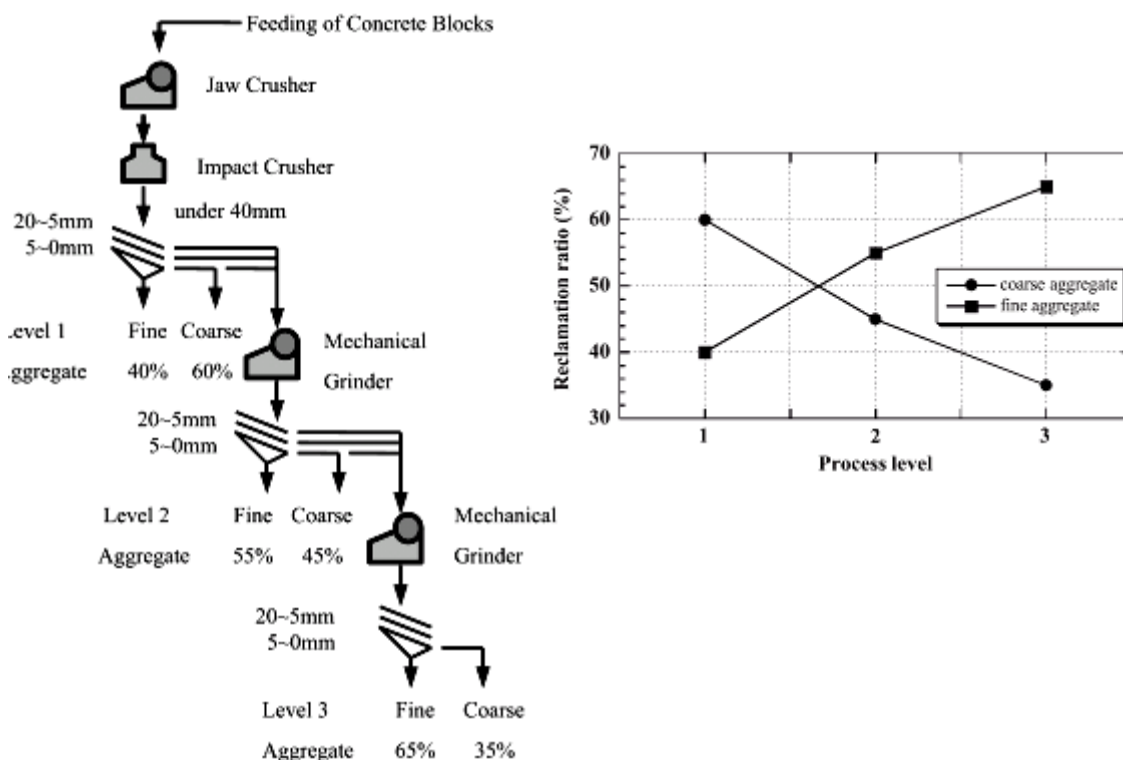


Ilustración 2, Nivel de trituración y tasa de recuperación de áridos reciclados. (Nagataky 2004)

Nagatky (2004) describe como al utilizar machacadoras de mandíbula y posteriormente una de impacto (machaqueo de primer nivel), la tasa de recuperación de árido reciclado grueso se reduce a 60%, mientras con procesos adicional se consiguen áridos reciclados gruesos de alta calidad con mínimo de mortero adherido, aunque la tasa de recuperación desciende a 35% [8].

Hansen (1986) reporta que la fracción gruesa por lo general cumple una gradación adecuada, cumpliendo con los husos granulométricos propuestos por ASTM, para uso de áridos gruesos en hormigón, Luego de tamizar los áridos en un tamiz 5mm y comparar la granulometría de los productos machacados con los requerimientos de ASTM C-33 para fracción fina de un árido tamaño máximo 25mm [10].

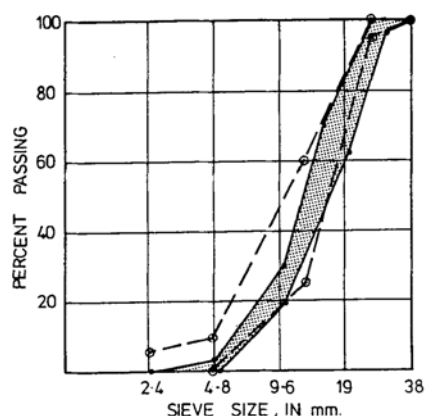


Ilustración 3, Gradación de AR ($T_{m\acute{a}x}$ 25mm), entre husos granulométricos ASTM C-33 (Hansen 1986)

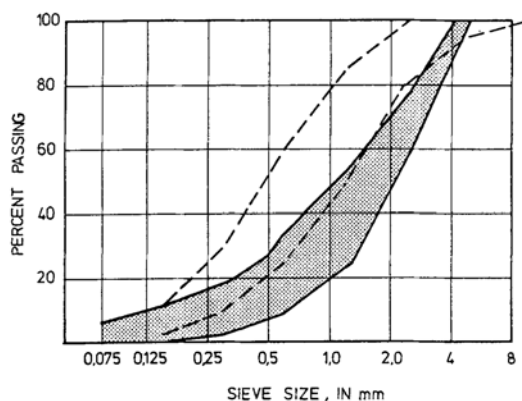


Ilustración 4, Gradación AR, husos granulométricos ASTM C-33 áridos finos (Hansen 1986)

La gradación de los productos machacados finos, producidos por debajo de 5mm, es algo mayor que los límites menores de requerimientos ASTM para granulometría de áridos finos, de lo que se concluye que el árido machacado es algo mayor y más angular que el deseable para una producción de buenas mezclas de hormigón.

Tamaño máx.. mm	Peso Que Pasa %					
	30	25	20	10	5	2.5
25	100	90 – 100	50 – 90	10 – 60	0 – 15	0 – 5
20	-	100	90 – 100	10 – 60	0 – 15	-

Tabla 1, Requisitos granulométricos norma japonesa del AR, hormigón de edificación (Kasai 1994)

Las normas japonesas recomiendan para la utilización de áridos reciclados, que su gradación se ajuste a los siguientes rangos [11].

Tamaño máx.. mm	Peso Que Pasa %								
	50	40	30	25	20	15	10	5	2.5
40	100	95 – 100	-	-	35 – 70	-	10 – 30	0 – 5	-
25	-	-	100	95 – 100	-	30 – 70	-	0 – 10	0 – 5
20	-	-	-	100	90 – 100	-	20 – 55	0 – 10	0 – 5

Tabla 2, Requisitos granulométricos norma japonesa del AR, hormigón de obra pública (Kasai 1994).

Las especificaciones Belgas, establecen los siguientes husos granulométricos para la utilización de áridos reciclados procedentes de hormigón [12].

Tamaño mm.	Peso Que Pasa %										
	63	31.5	22.4	16	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125
0 – 4	-	-	-	-	100	90–98	-	50–58	-	0–20	-
4 – 8	-	-	-	100	90–100	0–20	0–2	-	-	-	-
4 – 16	-	-	100	95–100	30–65	0–15	0–5	0–4	-	-	-
4 – 32	100	98–100	70–95	45–75	15–40	0–10	-	0–4	-	-	-
8 – 16	-	-	100	90–100	0–20	0–2	-	-	-	-	-
16 – 32	100	90–100	-	0–20	0–2	-	-	-	-	-	-

Tabla 3, Husos granulométricos para AR de hormigón según normas Belgas (Vincke 1994).

Los requerimientos Holandeses presentan la siguiente granulometría.

Tamaño fracción	Peso retenido							
	31.5mm	16mm	8mm	4mm	2mm	1mm	250µm	63 µm
0 – 4	-	-	-	0 – 10	25 – 31	50 – 62	80 – 87	96 – 100
4 – 16	-	0 – 5	57 – 67	85 – 100	95 – 100			99 – 100
4 – 31.5	0 – 5	32 – 44	70 – 75	90 – 100	-	-	-	99 – 100

Tabla 4, Husos granulométricos para AR de hormigón según requerimientos Holandeses.

Muchos autores no recomiendan la utilización de fracciones menores de 4 mm, en la preparación de nuevo hormigón, ya que esta es la que presenta mayores diferencias en sus características con respecto a la misma fracción de áridos naturales [13]. En el caso español la EHE, restringe a un 10% máximo de desclasificados, las recomendaciones del Rilem y Hong Kong fijan en un 5% máximo el contenido de áridos < 4 mm reciclados para hormigón, así que no es de preocupar los valores observados por Sánchez (2005) que oscilan entre 0,5% – 2%.

El árido reciclado al ser manipulado genera finos sobre fracciones gruesas ya clasificadas, No obstante, Sánchez (2005) en su estudio calcula este porcentaje entre un 0,27% y 1,14%, generalmente por debajo del 1% que establece como limite la normativa española para hormigón estructural, además de que las normativas extranjeras presentan limites entre 2% y 5% como máximo contenido de finos.

2.5.2 Forma y Textura Superficial

Zaharieva (2003) define la textura de los áridos reciclados como rugosa, angular y de formas alargadas, mientras los áridos naturales son tersos, compactos y redondeados, también se refiere al hecho de que estas características interactúan

de forma especial sobre el hormigón mezclado fresco, afectando la cantidad de agua necesaria para desarrollar manejabilidad. [14]

Como los áridos finos reciclados son también angulosas y rugosas, no es sorprendente que los hormigones producidos con áridos reciclados gruesos y finos tiendan a ser más consistentes e inmanejables, sin embargo adicionando una cierta cantidad de áridos naturales, combinando arena, es posible producir áridos finos reciclados que cumplan las granulometrías recomendadas, al mismo tiempo que se mejora la manejabilidad del hormigón.

Marmash (2000) reveló la afectación directa del sistema de trituración sobre el coeficiente de forma, asintiendo que las machacadoras de mandíbulas proporcionan áridos reciclados con forma más apropiada para hormigón que las machacadoras de impactos o cono. [15]

Generalmente el coeficiente de forma del árido reciclado es similar al del árido natural, según Sánchez (2005), en los estudios consultados encontró valores entre 0,17 a 0,35, normalmente superando el límite recomendado por la instrucción de hormigón estructural española de 0,2. Además encontró porcentaje de lajas entre un 7% - 9% satisfaciendo con bastante margen las recomendaciones de otras normativas que utilizan este método para determinar la forma del árido.

González (2008) determinó la forma del árido grueso empleando el método del índice de lajas, obteniendo valores menores en el árido reciclado, debido a que la acumulación de mortero en las caras planas de las partículas con forma de laja aumenta el espesor de las partículas. [16]

2.5.3 Mortero Adherido.

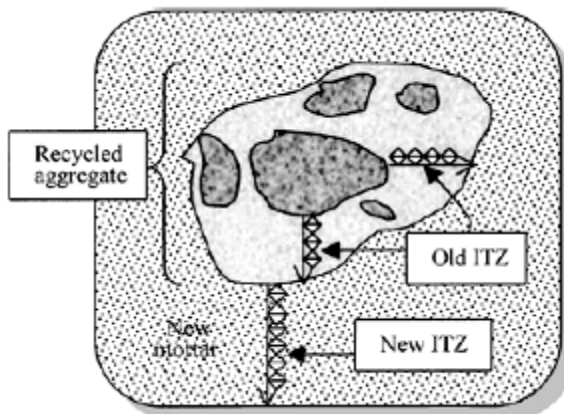


Ilustración 5, Árido reciclado, diagrama de zonas interfaciales

Cuando los desechos de demolición de hormigón son machacados, cierta cantidad de mortero permanece adherido a la piedra natural original en el proceso de reciclado. Es esta la cualidad que diferencia principalmente los áridos naturales de los áridos reciclados.

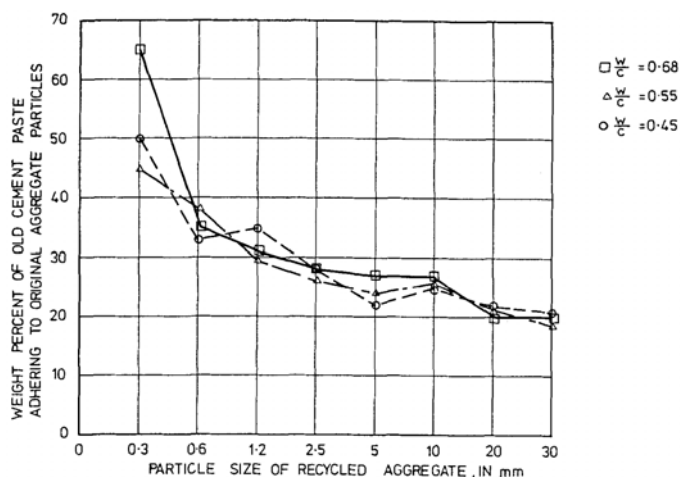


Ilustración 6, Mortero adherido en AR de hormigones con diferente w/c (Hansen 1986)

Hansen (1986) al calcular el volumen de mortero adherido, lo encuentra relacionado con el tamaño de la fracción de árido reciclado: índices del 60% del peso, corresponde a mortero adherido en fracciones menores, 4-8mm, para

fracciones de 8 a 16 mm, el porcentaje es del orden del 40% y para fracciones de 16 a 32 mm, el porcentaje es del orden del 30% [10]. Por lo que recomiendan usar preferiblemente solo la fracción gruesa de los áridos reciclados, ya que las altas cantidades de mortero presentes en fracciones finas, causa efectos desfavorables en la calidad del árido reciclado para su utilización en hormigón.

Ravindrarajah (1988) observó un contenido de 20% de mortero adherido para la fracción 20/30mm y un aumento considerable hasta el 45-65% para fracciones <0,3 mm. [17]

Más reciente en estudios de Vázquez (2002), el contenido de mortero para fracción 10/20mm alcanzó el 40,5%, y 49,5% para fracción 5/10mm [18]. Un poco alto para lo observado por Sánchez (2005) de 30,8% para fracción 4/16mm

2.5.4 Densidad.

La densidad del árido reciclado es menor que la de los áridos naturales, debido a la característica porosa del mortero adherido a su superficie [14].

La densidad de los áridos reciclados depende de aspectos como la resistencia del hormigón de origen, puesto que para una misma cantidad de mortero adherido, los áridos obtenidos de hormigones de mayor resistencia tendrán mayor densidad [19].

Hansen (1986), reporta que debido a las grandes cantidades de mortero adherido, al árido reciclado tiene densidad cerca de 5 a 10% menor que la del árido original. También la densidad cambia con el tamaño del árido, pues esta se reduce cuanto

el tamaño del árido se reduce, esto fue comprobado en el proceso de machaqueo, observando que en los tamaños inferiores hay mayor cantidad de mortero adherido ^[10], en esto influye también el tipo de machaqueo, gradado y energía usada.^[20]

Barra (1996) observó una gran diferencia en la densidad de la fracción gruesa, mientras el árido natural alcanza entre 2660 – 2680 kg/m³, en el árido reciclado desciende a 2240-2270 kg/m³.^[21]

Poon (2002) en un estudio realizado, los áridos naturales gruesos y finos presentan una densidad de 2570 y 2520 kg/m³ respectivamente, los áridos reciclados presentan una mayor diferencia, 2350-2470 kg/m³ los gruesos y 2260-2390 kg/m³ los finos.^[3]

Poon (2004) expresa que la densidad de los áridos reciclados generalmente se encuentra entre 2200 a 2400 Kg/m³ alrededor del 10% menos que los áridos naturales (alrededor de 2600 Kg/m³) ^{[22][16]}, aunque no se podrían clasificar como áridos ligeros, ya que por lo general superan los 2000 Kg/m³ según las especificaciones de áridos para hormigón UNE-EN 12620:2003. Esta densidad de los áridos reciclados se debe tener en cuenta en los diseños de mezclas antes de llevarlas a cabo, debido a que cualquier variación en la densidad de los materiales afectará las propiedades del hormigón.

Como observó Sánchez (2005) y según diferentes autores esta propiedad presenta una dispersión muy elevada debido a que la densidad del árido del hormigón de origen puede ser muy diferente para hormigones de distintas procedencias, no

obstante la densidad del árido reciclado es ligeramente superior en las fracciones más gruesas que en las más finas.

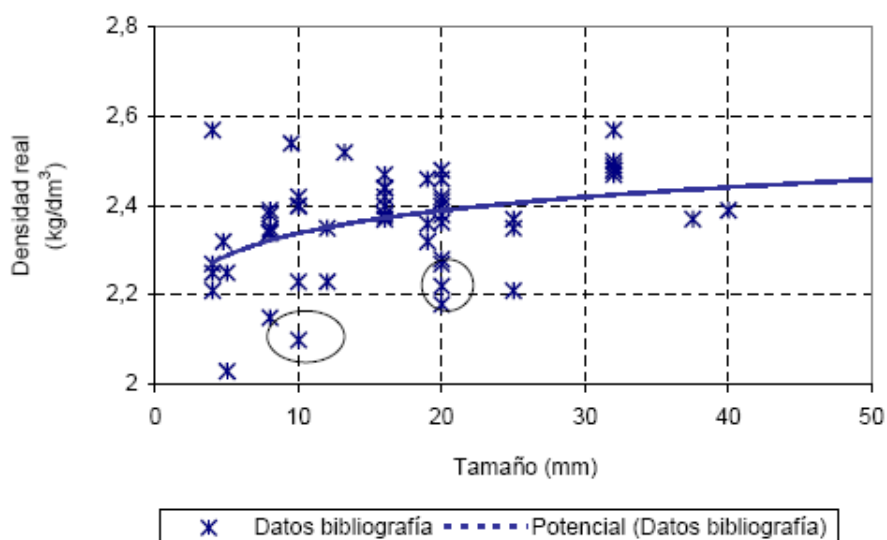


Ilustración 7, Relación entre la densidad y el tamaño máximo del árido reciclado (Sánchez 2005)

2.5.5 Absorción.

Es esta propiedad física la que presenta una mayor variación con respecto a los áridos naturales, debido a la naturaleza porosa y absorbente del mortero adherido. Mientras la absorción de los áridos naturales oscila entre 0% y 4% en los áridos reciclados aumenta considerablemente de entre un 3% a 13% generalmente superando el límite establecido en la normativa española de 5% y evidenciando la recomendación de evitar la fabricación de hormigón con árido fino reciclado.

Sánchez (2005) observa que la absorción del árido reciclado está alrededor de 4% a 10%, superando estos valores en fracciones finas del árido [23].

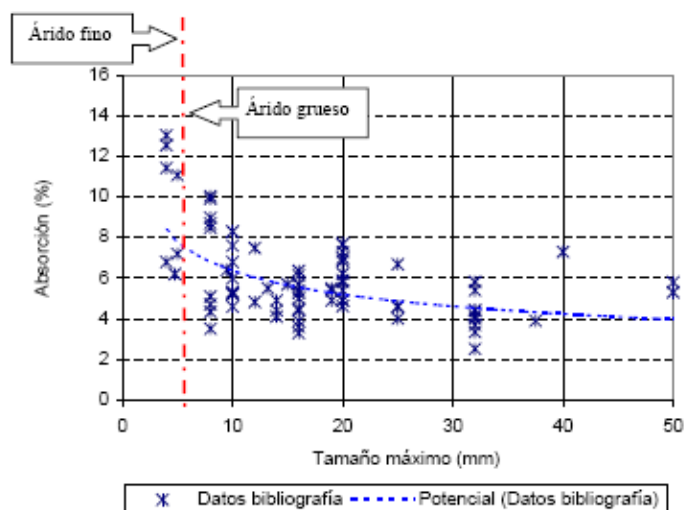


Ilustración 8, Relación entre el tamaño máximo del árido y la absorción (Sánchez 2005)

Kreigjer (1983) encuentra una relación parabólica entre la densidad del árido y su capacidad de absorción, cuando la densidad baja a causa del volumen de mortero adherido, la absorción aumenta considerablemente [24][3], influido también por la calidad del mortero. Hansen (1983) y Ravindrarajah (1987) manifiestan que los áridos reciclados procedentes de hormigones de elevada resistencia generalmente presentan menor absorción. [20][25]

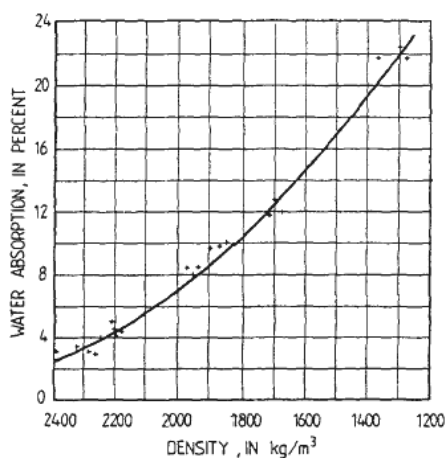


Ilustración 9, Absorción de AR en función de la densidad (Kreigjer 1983)

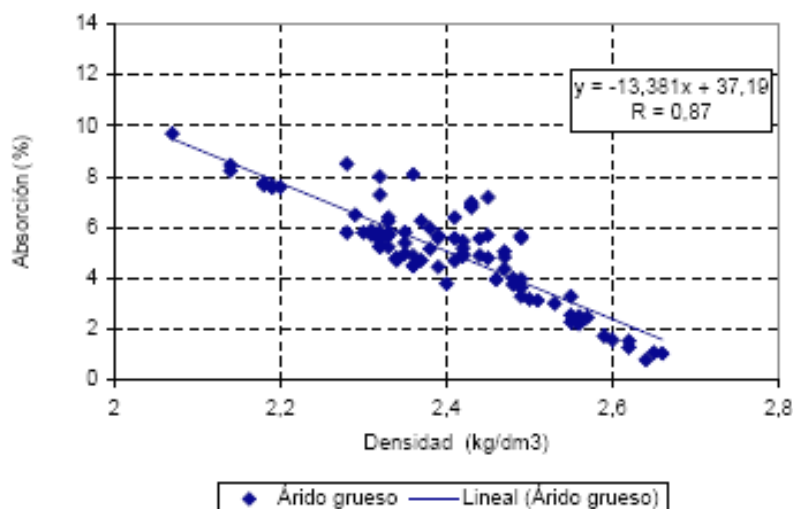


Ilustración 10, Relación entre la densidad y la absorción del árido reciclado grueso (Sánchez 2005)

En un estudio reciente realizado por Sánchez (2005) de la fracción gruesa se muestra muy buena correlación, permitiendo un control de calidad de los áridos a través de su densidad o absorción.

Debido a la alta absorción y el problema que esto genera en la manejabilidad del hormigón en estado fresco, algunos autores sugieren utilizar los áridos en estado presaturados para la producción de hormigón y mantener la calidad uniforme a lo largo de esta.

Ruhl (1997) ya había observado que la absorción del árido depende del tamaño del árido y del mortero adherido (caracterizado indirectamente por su densidad), y que el árido reciclado alcanza un nivel de absorción a los 10 minutos entre un 80-90% del alcanzado a las 24 horas.^{[26][27]} Información relevante pues Barra (1998) recomienda una saturación del árido reciclado entorno al 90% para obtener un mejor desempeño en el hormigón.^[28]

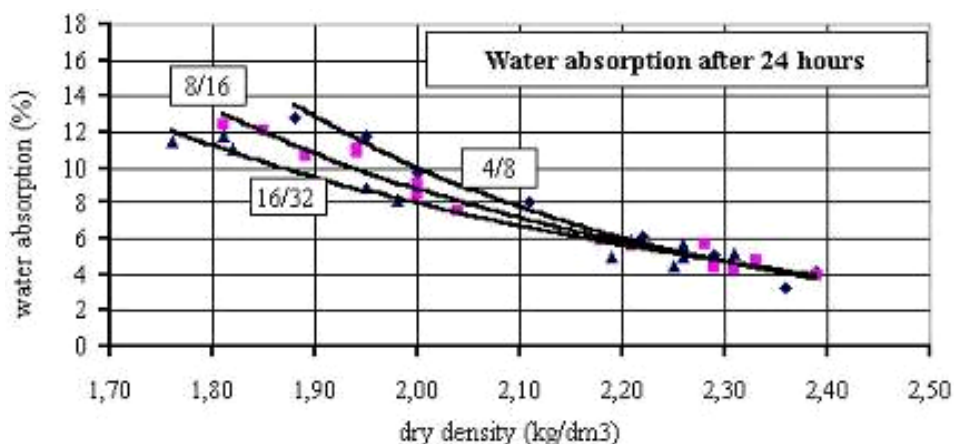


Ilustración 11, Relación entre la densidad y la absorción del árido reciclado grueso (Ruhl 1997)

Como se observa en el estudio de Ruhl (1997) al utilizar áridos reciclados de buena calidad, expresada en densidades superiores, se garantizan unos niveles bajos de absorción controlando de manera indirecta el contenido de mortero.

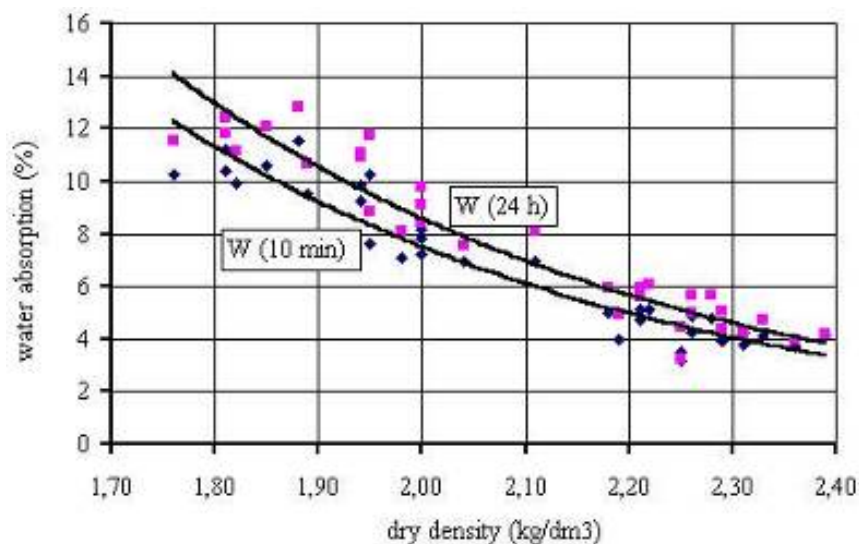


Ilustración 12, Capacidad de absorción del árido reciclado 24 horas – 10 minutos (Ruhl 1997)

Dhir (1999) observa que áridos procedentes de hormigones con resistencia elevadas presentan menor absorción que áridos procedentes de hormigones de resistencia mas bajas. [29]

Poon (2002) manifiesta en sus resultados una gran diferencia entorno a la absorción, mientras los áridos naturales gruesos y finos alcanzaron un 1.25% y 1.01% respectivamente, los áridos reciclados mostraban valores de 7.6% en la fracción gruesa y desproporcionado 14.21% para el árido reciclado fino.

2.5.6 Resistencia a la Abrasión.

El árido reciclado presenta generalmente un valor de coeficiente de los Ángeles de resistencia a la abrasión mayor que el árido natural, a causa del desprendimiento de las partículas de mortero adherido durante el ensayo [30][31].

Hansen y Narud (1983) y posteriormente Ravindrarajah (1988) observaron un mayor desgaste en las fracciones finas, causada por la mayor cantidad de mortero adherido. [20] [32]

Tamaño	> 19 mm	13,2-19mm	9,5.-13,2mm	4,75-9,5mm
Coef. L.A.	28,8	27,7	31,6	36,2

Tabla 5, Coeficiente de los Ángeles de AR en función del tamaño de partículas (Ravindrarajah 1988)

Tamaño	16 – 32 mm	8 – 16 mm	4 – 8 mm
Coef. L.A.	22,4	26,7	30,1

Tabla 6, Coeficiente de los Ángeles de AR en función del tamaño de las partículas (Hansen 1983)

Otro factor, y en el que coinciden otros autores es en que la abrasión en la maquina de los Ángeles es mayor cuando la resistencia del hormigón de origen es menor, debido a la menor resistencia del mortero adherido [20] [31]. Aunque en la mayoría de los casos los valores de coeficiente de los Ángeles se encuentran en

un rango de 25% a 40% [23], es difícil predecir el comportamiento del árido reciclado en el ensayo de abrasión, pues depende del tamaño de las partículas, la cantidad de mortero adherido, la calidad del árido original y la calidad del mortero. Puesto que la EHE limita a 40% el valor del coeficiente de desgaste de los áridos para su utilización en hormigón estructural, generalmente el árido reciclado cumple este requerimiento.

Autor	Fracción de árido	Árido natural	Árido Reciclado
Ravindrarajah (1987)	5mm – 37.5mm	18.1%	37%
Barra (1996)	12mm - 20mm	24.7%	31%
	6mm – 12mm	20.4%	29.5%
González (2002)	12mm - 25mm	27%	34%
Sánchez (2005)	4mm - 16mm	35.8%	38.9%

Tabla 7, Coeficiente de los Ángeles, comparativo árido natural – árido reciclado

2.5.7 Contenido de Contaminantes e Impurezas.

Los áridos reciclados presentan con frecuencia contenido de impurezas y contaminantes que perjudican notablemente las propiedades del hormigón fabricado con ellos. Los más comunes son, madera, plásticos, yeso, metales, vidrio, ladrillos, asfaltos y materia orgánica.

Uno de los mayores perjuicios es la disminución de resistencia al incorporar restos de asfalto o pinturas y aun más grave cuando concentra restos arcillosos. La presencia de contaminantes depende en gran medida del origen del árido reciclado por lo que se recomienda la demolición selectiva y procurar la utilización de escombros de hormigón. [33] [34]

Los restos de material cerámico desmejoran la respuesta frente a ciclos de hielo-deshielo y generan problemas de expansión cuando proceden de material refractario. El vidrio cuya densidad es similar a la del árido haciendo más difícil su

separación favorece la reacción álcali-árido, por su parte los restos de madera y/o papel provocan desconchados superficiales en el hormigón, mientras los restos arcillosos suelen provocar retracción y los restos de yeso puede originar un ataque por sulfatos.

2.5.8 Aspectos de Durabilidad de los Áridos Reciclados.

Áridos reciclados procedentes de hormigones de paso de alta montaña donde se utilicen sales fundentes, en contacto con agua de mar o aditivado con productos acelerante, pueden presentar contenido importantes de cloruros, de lo contrario los valores de los cloruros solubles en agua y los cloruros totales oscilan entre el 0,001% y el 0,005% según Rilem (1992), Di Niro (1996) ^[35] ^[36]

La instrucción española EHE determina un contenido máximo de cloruros solubles en agua del 0,05% tanto para el árido grueso como para el árido fino cuyo empleo se utilice en hormigón armado. Si los áridos se emplean en la fabricación de hormigón pretensado dicho límite máximo se reduce al 0,03% de la masa del árido seco. El contenido total de cloruros se limita al 0,4% del peso del cemento para hormigones que no contengan armaduras activas. y al 0,2% en peso del cemento para el hormigón pretensado. En otros países donde poseen normativas específicas establecen para los áridos reciclados las mismas limitaciones que para áridos naturales.

Otro aspecto importante referente a la durabilidad del hormigón reciclado es la cantidad de sulfatos que contiene el árido reciclado y que llega a ser importante

debido a que sumada a la correspondiente del árido natural aparece la del mortero adherido y en algunos casos la presencia de yeso.

Dichos sulfatos pueden provocar problemas de formación de ettringita (sulfato de aluminio tricálcico hidratado) y hidróxido de calcio libre, llevando consigo fuertes expansiones y pudiendo terminar en rotura del hormigón [37].

Este posible problema se controla al eliminar los tamaños más finos del árido reciclado por ende reduciendo la presencia de yeso.

Cuando se utilizan áridos reciclados la reacción Álcali-Árido y que provoca expansiones peligrosas en el hormigón, puede verse favorecida debido al mortero adherido que aumenta el contenido de alcalinos.

La instrucción inglesa Bre Digest 433 recomienda evaluar el contenido en álcalis que aportan los áridos reciclados cuando vayan a emplearse en la fabricación de hormigón, aunque debido a las dificultades que presenta el control del mismo se recomienda la utilización de cementos con adiciones de cenizas volantes o escorias.

Los áridos reciclados experimentan pérdidas de peso mayor que los áridos naturales como consecuencia de desprendimiento del mortero adherido al ser sometidos ciclos de hielo-deshielo, en muchos casos superando las limitaciones impuestas a los áridos naturales [38]

Kobayashi (1988) observa que de hormigones que presentan elevadas resistencias se obtienen áridos gruesos reciclados con mejor comportamiento a la helada. [39]

Mellmann (1999) observa que en hormigones reciclados procedentes de áridos utilizados en pavimentos de hormigón la pérdida de peso por tratamiento con

sulfatos ha sido del 0% al 2%, este mejor comportamiento frente a la helada es debido probablemente a la incorporación de aireantes en el hormigón y a la buena calidad del árido que suele emplearse con esta finalidad.

Dosho (2000) observó la importancia del proceso de obtención del árido, pues con una trituración primaria llevada a cabo mediante una trituradora de impacto los valores de pérdida de masa en el árido grueso estuvieron comprendidos entre el 23% y el 32%, cuando el procesado se realiza mediante dos trituraciones consecutivas dichos valores se redujeron a 6% - 18%.^[40]

2.5.9 Áridos Reciclados de Calidad.

Algunos autores con el objetivo de producir áridos reciclados que cumplan las más estrictas normas, han investigado sobre el proceso de machaqueo, observando que al utilizar métodos de refinamiento de los áridos reciclados, el mortero adherido es desprendido en mayor medida consiguiendo regenerar el árido hasta cumplir con los más estrictos requerimientos Japoneses para áridos reciclados de hormigón clase H (alta calidad), con densidad de partículas mayor a 2450 kg/m³ y una absorción menor al 3%^[41].

Hansen (1986) Utilizando áridos reciclados de hormigón de calidad uniforme, el coeficiente de variación de las propiedades entre mezclas de hormigón reciclado no difiere al del hormigón convencional.^[10]

Kawano (2002) al ensayar el hormigón hecho con estos áridos reciclados de alta calidad, notó que las propiedades y el desempeño no difieren al hormigón de

áridos naturales en términos de consistencia, resistencia, retracción de secado, resistencia al hielo deshielo y profundidad de carbonatación [42].

Kasai (2006) y Dosho (2007) [43] [44] definen el proceso de refinamiento de los áridos reciclados como los métodos de remoción del mortero adherido.

Método de concentración por gravedad.

En este método podrían encajar los métodos de limpieza de áridos por medio de agua (acuamator) o corrientes de aire.

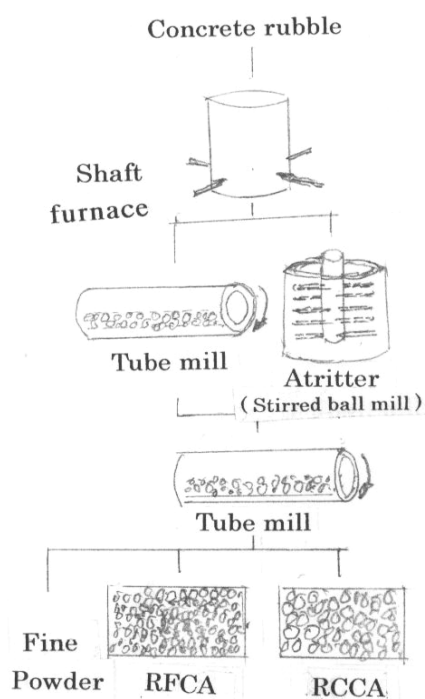


Ilustración 13, Refinamiento de áridos reciclados por método de temperatura y fricción (Kasai 2006)

Método de Calentar y frotar (Dhima 2000, Tateyashiki 2000, Kuroda 2003), desarrollado por Ube-Mitsubishi cement co ltd., la pasta de cemento es separada de la superficie del hormigón debido a las grietas generadas al calentar los

escombros de hormigón con un horno vertical por 40 a 60 minutos a una temperatura de 700°C aproximadamente, luego machacados y frotados en un molino tubular o de esfera.

Método de machaqueo mecánico (Cyclite) (Takeshida 2002), (Yanagibashi 2002), por medio de un rotor excéntrico en un tambor, el árido es molido y el mortero removido. Esta maquina desarrollada por Takenaka Komuten co.

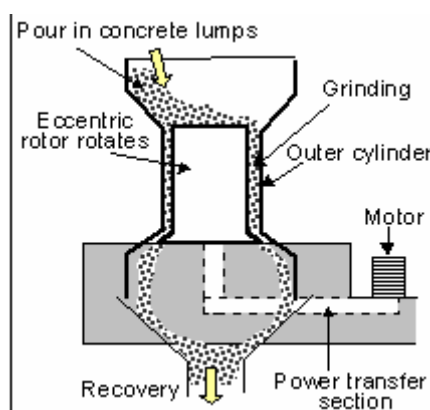


Ilustración 14, Refinamiento de áridos reciclado, método Cyclite

Con este método se puede incrementar la densidad del árido reciclado de un 2,25 a 2,5 y decrecer la absorción de un 5% a un 2,5% y la resistencia y retracción muy similar a la de un hormigón convencional.

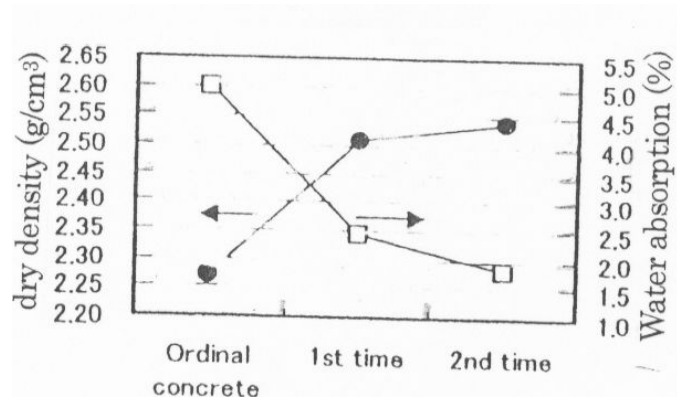


Ilustración 15, Efectos del proceso de refinamiento de áridos reciclados

Método de machaqueo de tornillo abrasivo (Sakazume 2002), produce áridos reciclados de alta calidad por medio de una maquina desarrollada por la Nuclear Power Engineering Organization con soporte del ministerio de economía e industria. Los áridos reciclados machacados son arrojados desde el puente de carga en dentro de un tubo circular, donde este es forzado por medio de un tornillo son fin hacia unos conos.

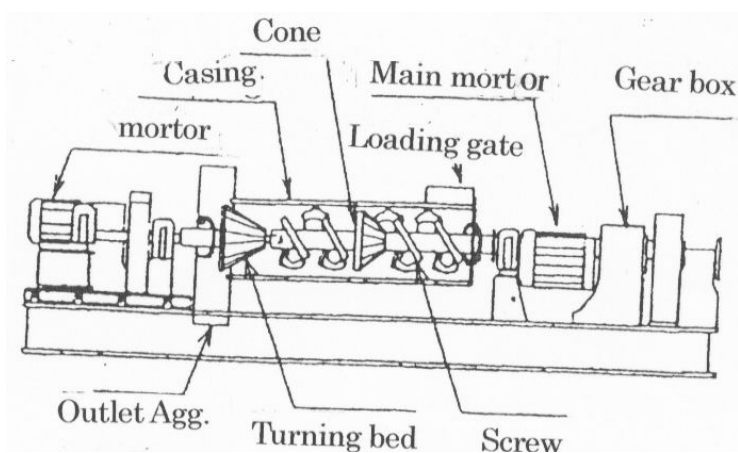


Ilustración 16, Refinamiento de áridos reciclados, método Screw grinding Kasai 2006)

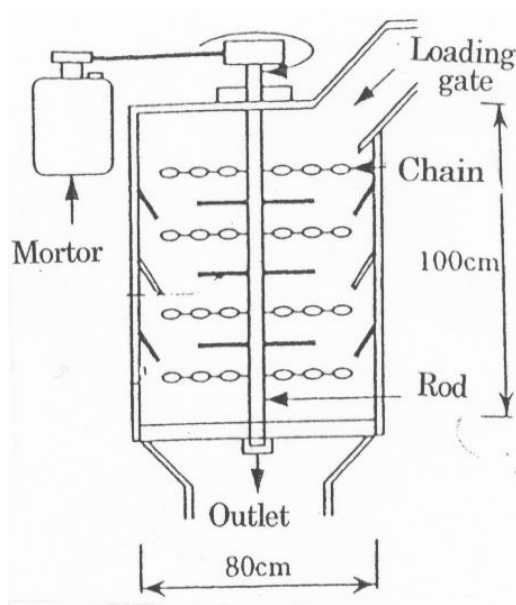


Ilustración 17, Refinamiento de áridos reciclados, método Chain crusher (Y Kasai 2006)

Método de machaqueo con cadenas (Ichikawa, Takenaka, Sahara, Yoshida 2003), produce áridos de buena calidad, al ser golpeados repetidamente por medio de cadenas atadas a un eje rotativo.

Aunque es de suma importancia el conseguir áridos reciclados de buena calidad, otro factor importante a tener en cuenta es el porcentaje de recuperación de árido grueso ya que es este factor el que nos indica el grado de aprovechamiento de los escombros y su posible aplicación en hormigón.

	Number of processing	Absolute dry density	Absorption ratio (%)	Soundness (%)	Mortar remaining ratio (%)	Recovery ratio (%)
Tokai power station	1	2.47	3.19	—	11.0	53.5
	2	2.51	2.53	—	7.8	46.8
	3	2.53	1.85	2.8	6.4	45.1
	4	2.55	1.55	—	4.0	43.7
Inside of Tokyo area	1	2.32	5.42	—	28.2	49.2
	2	2.47	2.95	—	25.3	38.9
	3	2.51	2.60	—	20.3	33.7
	4	2.55	1.84	—	16.3	30.6

Tabla 8, Resultado de ensayos de áridos reciclados de calidad (Kasai 2006)

2.6 REQUERIMIENTOS DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

Hoy en día se realizan un gran número de programas e iniciativas a nivel mundial, principalmente Comunidad Europea, Norte América, Australia y Japón, para reducir y reutilizar los desechos de construcción y demolición, por consiguiente es objeto de amplios estudios la realización de ciertas recomendaciones, normas, especificaciones y tasas (estímulos y desincentivas), para el adecuado uso de los áridos reciclados.

Estados Unidos.

Muy bajos requerimientos a los áridos como:

Un contenido de finos pasantes por el tamiz ASTM 200 $< 5\%$ y abrasión en la maquina de los Ángeles $< 50\%$. Para ser utilizados en la producción de hormigón, se exige que posean la dureza adecuada para conseguir la resistencia a compresión deseada, que no provoquen reacciones indeseables con otros componentes de la mezcla y que su granulometría y forma sean las adecuadas para obtener una buena docilidad con ellos.

El comité 555 de ACI trabaja en la elaboración de un documento para normalizar la utilización de áridos reciclados en hormigón. Mientras tanto y en ausencia de normativa nacional, las jurisdicciones regionales han creado requerimientos propios y promocionan el reciclaje en la construcción de carreteras.

La administración federal de carreteras (FHWA) y United States Geological Survey (USGS), conducen investigaciones sobre viabilidad de reutilización de desechos C&D, revisando la practica del reciclaje en Estados Unidos y reduciendo las barreras para reciclar.

Japon. (Technical report TR A 0006) (JISEC 2000) ^[42]

Japón tiene un temprano desarrollo en la legislación acerca del reciclado, bajo el programa "Recycle 21" lanzado por el ministerio de construcción en 1992 y aunque se alcanzan niveles de reciclado del 96%, prácticamente la totalidad de los áridos reciclados son usados como material de subbase de carreteras.

Debido a que la normativa actual JIS A 5308, no permite la utilización de áridos reciclados, el Instituto Japonés del hormigón, en respuesta a las recomendaciones del JIS Civil Engineering Committee 1998, forma un comité que lanza en el año 2000 un borrador del JIS technical report "Recycled concrete using 31 Recycled

Aggregates” (TR A 0006), que permite el uso de áridos reciclados de hormigón independientemente del JIS A 5308, de acuerdo a los siguientes requerimientos de calidad:

Densidad seca $>2200 \text{ Kg/m}^3$ para árido reciclado grueso y fino. Absorción $< 7\%$ para áridos gruesos y $<12\%$ para finos. Perdida por lavado $<1\%$ para árido grueso y $<8\%$ para árido fino. Contenido impurezas de densidad menores a 1950 Kg/m^3 (yeso, terrones de arcilla) $<10 \text{ Kg/m}^3$. Contenido de impurezas con densidad menores a 1200 Kg/m^3 (asfalto, plástico, pintura, tela, papel, madera) $<2 \text{ Kg/m}^3$. Contenido de partículas finas, $< 10\%$

Áridos reciclados clase (H) JIS A 5021 presenta unos requerimientos mas altos como: Densidad seca $>2500 \text{ Kg/m}^3$ para árido reciclado grueso y fino. Absorción $< 3\%$ para áridos gruesos y $<3\%$ para finos. Abrasión $< 35\%$. Contenido de cloruros $< 0,04\%$.

(JISEC, 2000)

Hormigón estructural, $f'c$ nominal 18 MPa. Para Hormigón reforzado, $f'c$ nom 12 MPa, T_{\max} 20 - 25, cono 15cm, cloruros $<0.6 \text{ kg/m}^3$ Y para Hormigón no estructural, $f'c$ nominal 10 MPa, T_{\max} . 20 o 25, cono 15 cm

Además prevé que los áridos se deben utilizar presaturados como medida de control de docilidad y se debe utilizar cemento de escoria de alto horno o con ceniza volante para contrarrestar reacciones álcali-árido.

Holanda (NEN 5905:1997) (NEN-EN 1097:1994)

En Holanda se tiene un avanzado grupo de políticas económicas y regulaciones altamente integradas para incrementar el reciclado de desechos C&D, en la normas NEN se tienen algunas recomendaciones para la utilización de áridos reciclados en hormigón dependiendo de su composición.

Densidad seca $>2100 \text{ Kg/m}^3$. en mas del 90% del material en tipo I, 50% en tipo II
Composición $>95\%$ de hormigón, menos del 5% de otros materiales como piedra natural, hormigón ligero, materiales cerámicos, ladrillos o mortero y menos del 1% de material bituminoso.

Contenido de partículas blandas y friables $< 0.1\%$. El contenido de carbonato de calcio debe ser $< 25\%$ para fracciones de 0 a 4 mm y $< 10\%$ para fracciones por encima de 4mm. Contenido de sulfatos $<1\%$. Contenido de materia orgánica $< 0.5\%$ para la fracción 0-4 mm y $<0.1\%$ para tamaños mayores a 4mm. Índice de lajas $< 30\%$. Abrasión de los Ángeles tipo I < 40 , Tipo II < 50 ,

Para un nivel de sustitución $<10\%$ de áridos reciclados no es necesario ningún cambio en las normas de diseño.

Para sustituciones del 100% de reciclado y aumento de la cantidad de cemento en 40 kg/m^3 se permite una resistencia a compresión en probeta cúbica de entre 17,5 – 22,5 Mpa, aumentando hasta 27,5 – 45 Mpa cuando se realiza un aumento de cemento de 50 kg/m^3 no obstante no hay limitaciones cuando se realizan sustituciones por de bajo del 20%.

Bélgica. NBN B11-255

Recomiendan para la utilización de áridos reciclados, Densidad seca $>2100 \text{ Kg/m}^3$. Absorción $< 9\%$. Contenido de impurezas con densidad $< 2100 \text{ Kg/m}^3$ debe ser $<10\%$. Contenido de impurezas con densidad $< 1600 \text{ Kg/m}^3$ debe ser $<1\%$. El contenido de impurezas con densidad $< 1000 \text{ Kg/m}^3$ y de materia orgánica $< 0.5\%$. Contenido de finos ($<63\mu\text{m}$) $<3\%$. Contenido de sulfatos (SO_3) $<1\%$ y contenido de cloruros $< 0.06\%$

El uso de los áridos GBSB I en hormigón es permitido hasta en un 100% de la fracción gruesa con resistencia hasta 16, para GBSB II uso en hormigones con

máximo de resistencia 30 y sin límite de resistencia para hormigones con un máximo de 20% de sustitución.

RILEM (Rilem 1989) (Rilem 1994) [45]

En orden para cumplir con los límites para todos los áridos en las normas europeas armonizadas, el Rilem sigue controles adicionales de densidad e impurezas.

Densidad seca $>2000 \text{ Kg/m}^3$ para tipo II y $>2400 \text{ Kg/m}^3$ para tipo III. Absorción $<10\%$ en el tipo II y $<3\%$ en el tipo III. Contenido de impureza con densidad $< 2100 \text{ Kg/m}^3$ debe ser $<10\%$. Contenido de impureza con densidad $< 1600 \text{ Kg/m}^3$, (metal, vidrio, betún, materiales blandos) $\leq 5\%$ para tipo I y $\leq 1\%$ para tipo II y III. Contenido de materia orgánica, (densidad $<1000 \text{ Kg/m}^3$) $\leq 1\%$ para tipo I y $\leq 0,5\%$ para tipo II y III.

Contenido de finos ($<63\mu\text{m}$) $<2\%$. Contenido de sulfatos solubles en agua $<1\%$.

El uso de los áridos Tipo III en hormigón es permitido para cualquier aplicación como los áridos naturales, para el Tipo II uso en hormigones con resistencia hasta C60 sobre probeta cúbica, para Tipo I uso en hormigones con máximo de resistencia cúbica C37 y condiciones de exposición menores, reduciéndose a C20 con áridos de densidad menor a 2000 Kg/m^3 .

También recomienda que se debe poner atención a aspectos relacionados con la durabilidad del hormigón reciclado armado. En el caso de utilización de áridos reciclados en estructuras en las cuales las propiedades de deformación sean importantes se sugieren ensayos para obtener datos mas precisos.

Hong Kong (BS 812) (WBTC 12-2002) (BS 882) [46] [47]

En Hong Kong debido a su limitada experiencia con el uso de áridos reciclados, se ha adoptado una prudente propuesta.

Después de diferentes análisis de campo y ensayos de laboratorio, el gobierno ha formulado unas especificaciones que engloban el uso de los áridos reciclados en la producción de hormigón (WBTC N°12 de 2002).

Para aplicaciones de menor grado permite utilizar 100% de árido grueso, pero no se permite la utilización de áridos finos reciclados, para resistencias hasta 20 Mpa, se puede usar en plataformas, materas, muros de hormigón en masa y estructuras menores de hormigón. Para aplicaciones por encima de 35 MPa, se permite un máximo de 20% de sustitución de árido grueso reciclado y el hormigón puede ser utilizado para aplicaciones generales excepto estructuras de contención de agua.

Algunos de esos requerimientos son los siguientes:

Densidad seca ≥ 2000 Kg/m³, Absorción $< 10\%$ Contenido de metales, plásticos, arcilla, asfalto, vidrio, alquitrán $< 1\%$. Contenido de impurezas con densidad < 1000 Kg/m³ debe ser $\leq 0.5\%$. Índice de lajas ≤ 40 . Contenido de finos ($< 75\mu\text{m}$) $< 4\%$. Contenido de arena ($< 4\text{mm}$) $< 5\%$. Contenido de sulfatos < 1 . Contenido de cloruros $< 0.05\%$

Alemania DIN 4226-100, DIN EN 12620, EN 1744, EN 933

Kohler (1997) señala que la prevención y reciclado de desechos en Alemania están enfocados principalmente sobre la legislación, pero el gobierno no juega un papel importante en la investigación y mercadeo de material reciclado. Algunas recomendaciones son: Densidad seca ≥ 2000 Kg/m³, Absorción $\leq 10\%$ para árido tipo 1, y $\leq 15\%$ para árido tipo 2. Contenido de impureza mineral (ladrillo, hormigón ligero, estuco, cemento, escoria o piedra pómez) $\leq 2\%$ para tipo 1, $\leq 3\%$ para los tipo 2. Contenido de materiales bituminosos ≤ 1 . Contenido de impurezas no minerales y orgánicas ≤ 0.5 . Contenido de finos ($< 63\mu\text{m}$) $< 4\%$. Contenido de arena ($< 4\text{mm}$) $< 5\%$. Contenido de cloruros $< 0.04\%$. Desgaste ensayo de los

Ángeles <40 tipo 1 y <50 tipo 2

Dinamarca ^[48]

El gobierno Danés juega un papel muy importante en la promoción del reciclado, a través de investigaciones, impuestos y especificaciones para el reciclado. Desarrollan especificaciones usando acercamientos concensuados entre proveedores, agencias ambientales, colaboradores y contratistas, ensayos de campo, pruebas de material reciclado y evaluaciones a largo tiempo de desempeño.

El uso de asfalto reciclado este bien establecido, con sustituciones del 50% para bases y 30% para superficie de rodadura, incluso es difícil encontrar sustituciones por debajo del 15%.

En Dinamarca se provee de ciertas recomendaciones de masa específica de los áridos reciclados según la clase:

Clase GP1 > 2200 Kg/m³ Contenidos bajos de mampostería.

Clase GP2 > 1800 Kg/m³ Contenidos de hormigón y mampostería.

GP1 puede ser utilizado para hormigón armado o en masa en ambientes pasivos o moderados con resistencia de hasta 40 Mpa.

GP2 puede ser utilizado para hormigón armado o en masa en ambientes pasivos con resistencia de hasta 20 Mpa.

Reino Unido (BRE Digest 433) (BS 812) ^[49]

Crawford (2001) reporta lo bien definido que tiene reino unido el paquete de normas para el uso de áridos (BS 812, BS 882, BS 6543) y con la adopción de la normativa europea para áridos, que incluye áridos reciclados, se siguen desarrollando especificaciones.

El DETR y la Highways Agency revisaron en 1997 las especificaciones para trabajos de carreteras para remover los impedimentos para usar áridos reciclados, requiriendo de un procedimiento formal de control de calidad, el resultado fue publicado por la fundación investigadora de la construcción (BRE), como BS EN 9002.

El BRE a elaborado guías sobre el uso del árido reciclado incluidos en el Digest 433, con procedimientos complementarios, especificaciones y consejos prácticos de diseño contenidos en la normativa inglesa, comprendiendo el uso de hormigón machacado, mampostería y mezclas de áridos reciclados y naturales.

El BRE Digest sugiere:

Contenido de impurezas con densidades $< 1000 \text{ Kg/m}^3$, debe ser $\leq 0.5\%$,

Contenido de materiales bituminosos, impurezas no minerales y orgánicas $\leq 1\%$,

Contenido de finos ($<63\mu\text{m}$) $<5\%$, Contenido de sulfatos $\leq 1\%$

Australia AS 1141.6

CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) elaboró una guía nacional para la utilización de hormigón reciclado en aplicaciones no estructurales. En dicha guía los áridos reciclados se clasifican en áridos reciclados de clase 1 y de clase 2. Los primeros son los que se utilizan en la fabricación de hormigón ya que las limitaciones establecidas en sus propiedades físicas están muy próximas a las de los áridos naturales. Los áridos reciclados de segunda clase se utilizan como material de relleno y como bases y sub-bases en carreteras y pavimentación.

Algunas exigencias del HB 155-2002: "Guide to the use of recycled concrete and masonry materials". Standards Australia, para ambos tipos de áridos:

Densidad seca $\geq 2100 \text{ Kg/m}^3$, Absorción < 6 , Contenido de impurezas incluido

ladrillo $\leq 2\%$, Índice de machacabilidad <30 y máxima pérdida por lavado $< 1\%$

España ^[6]

Excluye los áridos finos reciclados para la fabricación de hormigón, y presupone que con la limitación de nivel de sustitución $<20\%$, las propiedades finales del hormigón reciclado apenas se verán afectadas en relación a las que presenta un hormigón convencional. Aunque advierte que para sustitución de porcentaje superiores a la recomendada se deben realizar estudios específicos y experimentación complementaria en cada aplicación.

Algunas recomendaciones son:

Densidad seca $\geq 2000 \text{ Kg/m}^3$, Absorción $\leq 7\%$, Contenido de material cerámico $\leq 5\%$, Contenido de partículas ligeras, materiales bituminosos e impurezas no minerales $\leq 1\%$, Coeficiente de los Ángeles ≤ 40 , Partículas de arcilla $< 0.6 \%$, Contenido de arena ($<4\text{mm}$) $< 5\%$, máximo contenido de desclasificados 10% y Contenido de cloruros $< 0.04\%$

La granulometría, el coeficiente de forma y el índice de lajas del árido reciclado serán adecuados para su empleo en hormigón estructural.

2.7 HORMIGÓN RECICLADO

Este se define como el hormigón producido usando áridos reciclados procedentes de hormigón o la combinación de estos con otro tipo de áridos, las propiedades de este nuevo hormigón difieren de las propiedades de hormigón de áridos naturales debido a la alta absorción y baja densidad, se recomiendan para la producción de hormigón la exclusiva utilización de la fracción gruesa, lo cual produce un hormigón de una calidad conforme de la que alcanzaría con la utilización de áridos naturales, más notable en unas propiedades que otras, según (ravindrarah 1987, Hendriks 1998, Dhir 1999, Otsuki 2003, Poon 2004, Sanchez 2005) cuando esta sustitución no supera el 20% de áridos reciclados procedentes de hormigón o el 10% de áridos cerámicos, la variación de las propiedades es despreciable.

Por economía y cohesión del hormigón fresco, algunos investigadores han encontrado que la relación óptima de áridos finos / gruesos reciclados es similar a la de los hormigones convencionales, otros incluso concluyen que áridos finos reciclados deberían ser usados en algunos casos para producir nuevo hormigón, pues se ha encontrado que el uso de entre 10 -30% de reciclados finos sobre el peso del total de finos en la mezcla resulta beneficioso, no implicando que la sustitución total de áridos finos no pueda ser utilizada para la producción de un nuevo hormigón.

Como se describe anteriormente la utilización de mayores porcentajes de áridos reciclados para producir nuevo hormigón, causa una serie de alteraciones en las propiedades físicas, mecánicas y químicas, en su estado fresco, estado endurecido y comportamiento bajo distintos ambientes.

Dhir (1999) expone que las dosificaciones de esta clase de hormigones se realiza de igual forma que para los hormigones tradicionales, teniendo en cuenta algunas ligeras modificaciones. [29]

- Cuando se diseña con áridos reciclados de calidad variable, se debe emplear una desviación estándar mayor para determinar una resistencia media objetivo sobre las bases de una resistencia característica requerida.
- Cuando se utiliza el árido reciclado grueso con arena natural, se puede asumir que la relación agua /cemento requerida para cierta resistencia a compresión del hormigón reciclado será la misma requerida para hormigón convencional, si en la mezclas de ensayo se ve una resistencia menor, se realiza un ajuste a la relación agua / cemento.
- Para una mezcla de áridos reciclados obtenga el mismo cono, necesita un contenido de agua libre 10 lt /m³ mayor que la del hormigón convencional.
- Si el contenido de áridos reciclados se incrementa, el contenido de cemento también necesita ser mayor para mantener la misma relación agua/cemento.

Las propiedades físicas y mecánicas del hormigón reciclado vienen influenciadas por la condición de humedad del árido.

- Cuando se mezclan los materiales en la hormigonera con los áridos en condiciones no-saturadas, estos absorben grandes cantidades de agua y partículas de cemento, que dará como resultado una densificación del árido y un debilitamiento de la zona de transición

que conduce a disminución en la resistencia.

- Si los áridos reciclados son previamente saturados antes de la mezcla, ocurrirá una movilización de agua a la pasta fresca. Esto aumenta la relación agua/cemento en la zona de transición, aumentando el índice de vacíos y reduciendo la resistencia.
- Los procesos en los cuales el árido reciclado es previamente mezclado con parte del agua (semi-saturación), la superficie húmeda del árido provoca una retención de partículas de cemento formando una excelente adherencia pasta/árido, a causa de que el árido no está totalmente saturado seguirá absorbiendo agua de la mezcla, que posteriormente será movilizad a favoreciendo el curado interno, mejorando las características de la matriz al hidratar as partículas remanentes de cemento sin hidratar.

Knight (1998) para mantener la resistencia a compresión en un hormigón con sustitución del 50% del árido natural por árido reciclado requirió un incremento del cemento del orden del 5 a 6%.^[50] según el Rilem (1992) este incremento puede aumentar hasta un 15% cuando se sustituye el árido grueso y fino por áridos reciclados.^[51]

Sagoe-Crentsil (1998) expresa la conveniencia de realizar ensayos previos para determinar la cantidad de agua libre necesaria para obtener determinada consistencia o la relación agua libre/cemento para obtener la resistencia^[33].

La relación árido fino/grueso nos permite obtener la cohesión deseada en el hormigón reciclado, Sagoe-Crentsil (1998) determino su valor próximo al que

presentan los hormigones convencionales aunque durante el amasado del hormigón la cantidad de finos aumenta provocando un incremento de la relación árido fino/grueso por encima del valor óptimo correspondiente.

2.8 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN RECICLADO.

2.8.1 Consistencia.

Explicando el hecho en la alta absorción del árido reciclado, los autores están de acuerdo que el árido reciclado posee una docilidad menor que el hormigón de áridos naturales ^[52] ^[53], por su naturaleza porosa retiene agua de amasado y va disminuyendo la manejabilidad gradualmente a una tasa mayor que el hormigón con áridos naturales, este fenómeno se ve acrecentado sobretodo en sustituciones de áridos reciclados por encima del 50%. ^[54]

Hansen (1983) y posteriormente otros, concluyen que el hormigón hecho con áridos reciclados gruesos necesita un 5% más de agua que el hormigón convencional para obtener la misma docilidad, aumentando hasta un 15% cuando se incrementa la sustitución de áridos reciclados finos ^[4] ^[20] ^[25] ^[29]. Si los áridos reciclados se utilizan en condiciones secas, la manejabilidad del hormigón se ve gravemente reducida debido a su relativamente alta capacidad de absorción.

Experiencias muestran que los áridos reciclados continúan absorbiendo agua después de la mezcla, Poon (2004) propone solucionarlo utilizando los áridos reciclados en estado saturado ^[4] con mecanismos similares a los utilizados en silos

de pre-saturación de áridos estructurales ligeros, manteniendo así fija la relación agua cemento efectiva con respecto a distintos niveles de sustitución.

Algunos autores desde Nealen (1997) hasta Etxeberria (2007), recomiendan conservar la manejabilidad de la mezcla usando los áridos en estado saturado o alto grado de humedad [55] [56]. Aunque Barra (1998) en un estudio más especializado sobre la afectación del grado de humedad de los áridos recomiendan un nivel de humedad de entre 80% al 90% para conseguir una interfase efectiva entre los áridos y la nueva pasta. [28]

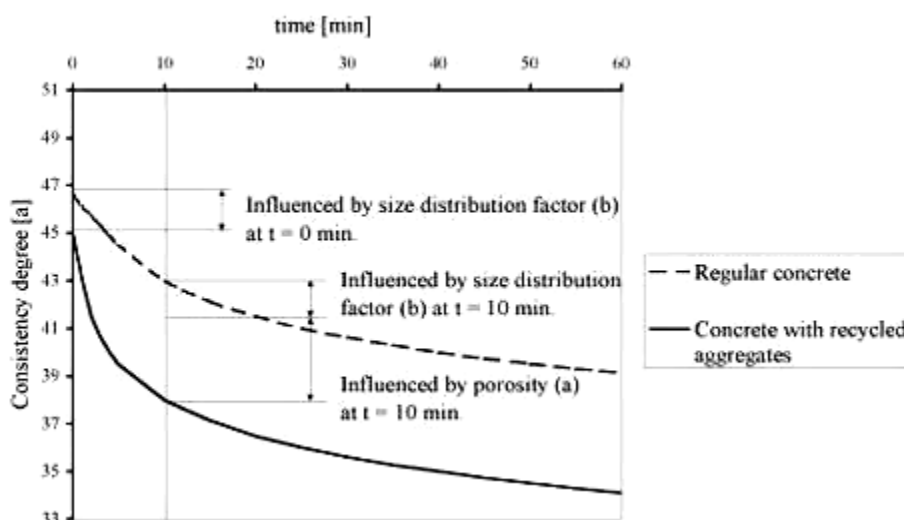


Ilustración 18, Pérdidas de manejabilidad en función del tiempo (Nealen 1997)

Si bien esta pérdida de manejabilidad se debe inicialmente al desprendimiento del mortero adherido, se incrementa debido a la mayor absorción de los áridos reciclados y sigue aumentando con el pasar del tiempo [14], Rashwam (1997) además culpa a la forma angulosa y textura porosa de los áridos reciclados, del aumento en la consistencia [57].

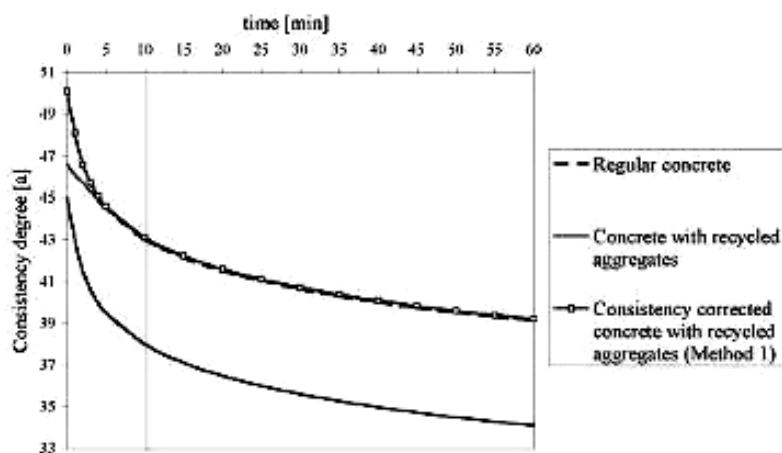


Ilustración 19, Corrección de la consistencia del hormigón adicionando agua

Para la corrección de consistencia de hormigón de producción industrial se recomienda el uso de súper plastificantes, evitando afectación de la resistencia pues otros métodos como compensar la absorción, es de difícil control y la saturación previa de áridos contrae problemas logísticos.

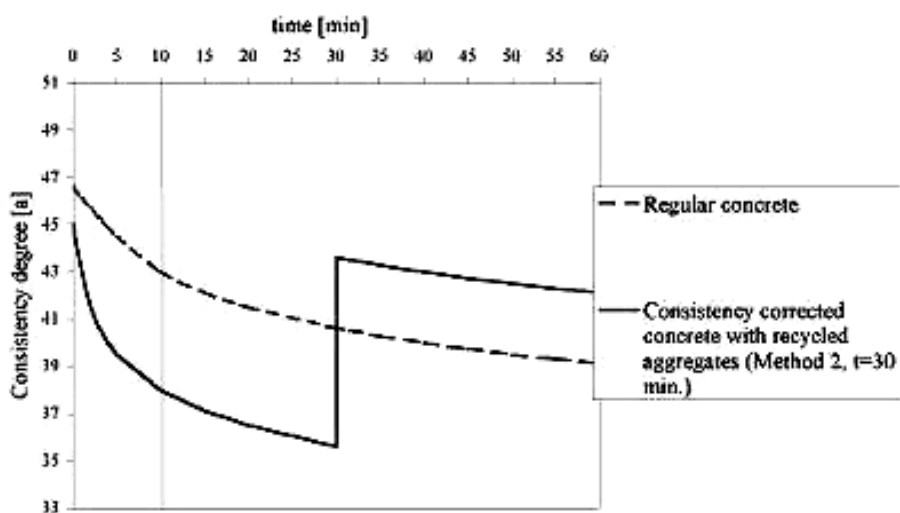


Ilustración 20, Corrección de la consistencia del hormigón reciclado adicionando súper plastificante

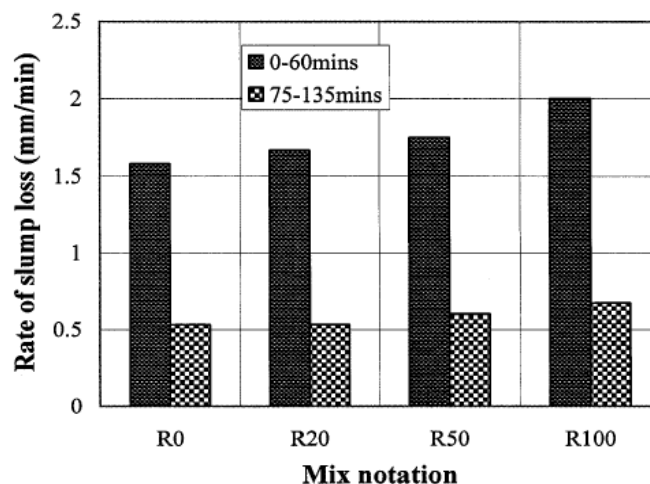


Ilustración 21, Tasa de pérdida de cono del hormigón reciclado (Kou 2006)

Kou (2006), en estudios realizados en Hong Kong, observo como la pérdida de fluidez del hormigón reciclado se incrementa al aumentar el nivel de sustitución. Además se observa como la pérdida de fluidez tiene una tasa bastante alta principalmente la primera hora, contrario a lo que sucedió cuando se adicionó un 25% de ceniza volante como sustituto del cemento.

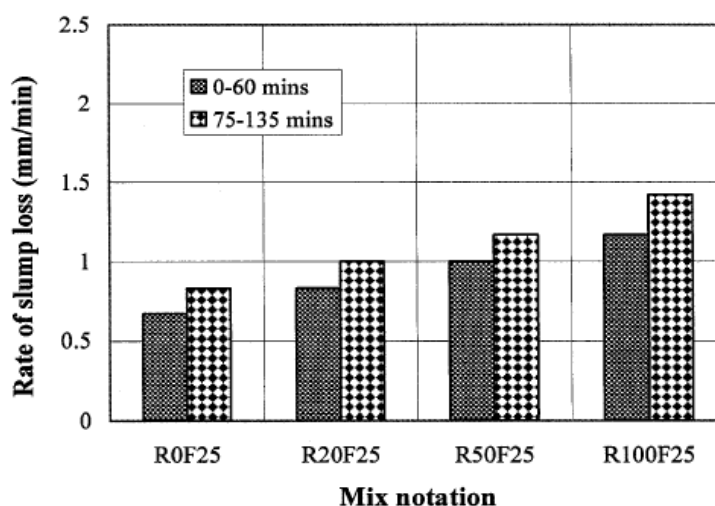


Ilustración 22, Tasa de pérdida de cono del hormigón reciclado con 25% ceniza volante (Kou 2006)

2.8.2 Densidad Fresca y Contenido de Aire.

El nuevo hormigón en estado fresco tendrá una menor densidad que el hormigón normal debido a la cantidad de mortero y pasta de cemento adherida a los áridos reciclados, esta disminución de densidad puede estar en torno de entre 5 – 15% de la densidad de hormigones de control con áridos convencionales. Adquiriendo valores entre 2,13 y 2,40 kg/dm³. [58]

Hansen (1986) observó que el contenido de aire ocluido del hormigón reciclado puede ser ligeramente mayor que el correspondiente hormigón hecho con áridos naturales. [59]

Kuo (2006) en un estudio con hormigón reciclado, hormigón reciclado con 25% de ceniza volante y hormigón reciclado con 35% de ceniza volante concluye que el contenido de aire ocluido aumenta un 0,2% para una sustitución del 20%, aumenta un 0,3% para sustituciones del 50% y un 0,5% para sustituciones totales. [60]

En los estudios de Kuo se observa como al disminuir la relación agua cemento de 0,55 a 0,45 el porcentaje de aire ocluido aumenta y el efecto es más evidente.

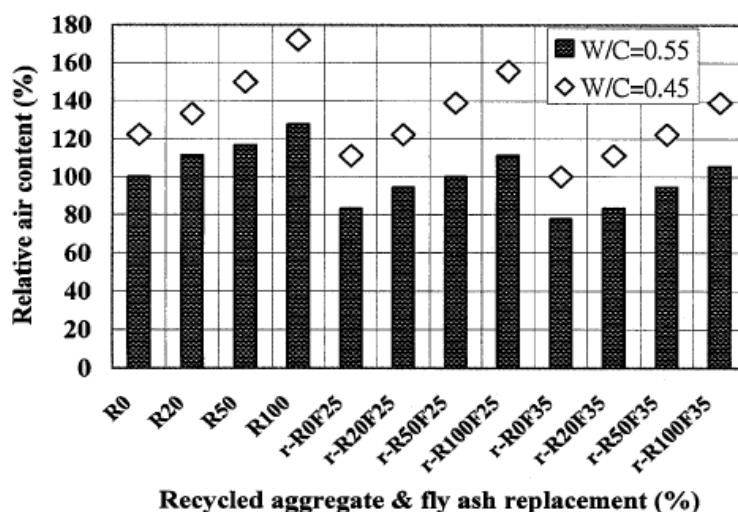


Ilustración 23, Contenido de aire Relativo de mezclas de hormigón reciclado (Kuo2006)

2.8.3 Densidad.

La menor densidad del árido reciclado hace que la densidad del hormigón reciclado endurecido sea inferior a la del hormigón convencional. Estudio realizado por Sánchez (2005) muestra que el descenso de la densidad es despreciable cuando la sustitución del árido grueso es del 20%, cuando la sustitución es del 50% la densidad experimenta una reducción media del 2% y aumenta a un valor medio del 3,5% cuando se sustituye la totalidad del árido grueso.

2.8.4 Resistencia a Compresión.

Comúnmente el hormigón presentará una resistencia 5% a 10% menor que la del correspondiente hormigón convencional ^[10], Kikuchi (1993) reporta pérdidas mayores que ocurren cuando se sustituye parte de la arena por áridos reciclados finos. ^[61]

Estas pérdidas de resistencia a la compresión son causadas a su vez por aspectos como:

- Menor resistencia mecánica de los áridos reciclados.
- Una mayor absorción podría causar que exista cemento sin hidratar.
- La nueva matriz no queda en contacto con el árido sino con el mortero adherido.

Frondistou-Yannas (1977) reportó en su estudio que la resistencia a compresión del hormigón reciclado fue de entre 4 a 14% inferior que el del hormigón de referencia con las mismas características. ^[62]

Ravindrarajah (1985) presenta como a partir de áridos procedentes de hormigones cuya resistencia era de 30 N/mm², se pudo fabricar hormigones reciclados, sustituyendo el árido grueso, con resistencias superiores a los 35 N/mm² al reducir la relación agua-cemento. Expone, como con áridos reciclados procedentes de hormigones de elevada calidad, el hormigón reciclado podrá presentar resistencias incluso superiores a las del hormigón de control. [63]

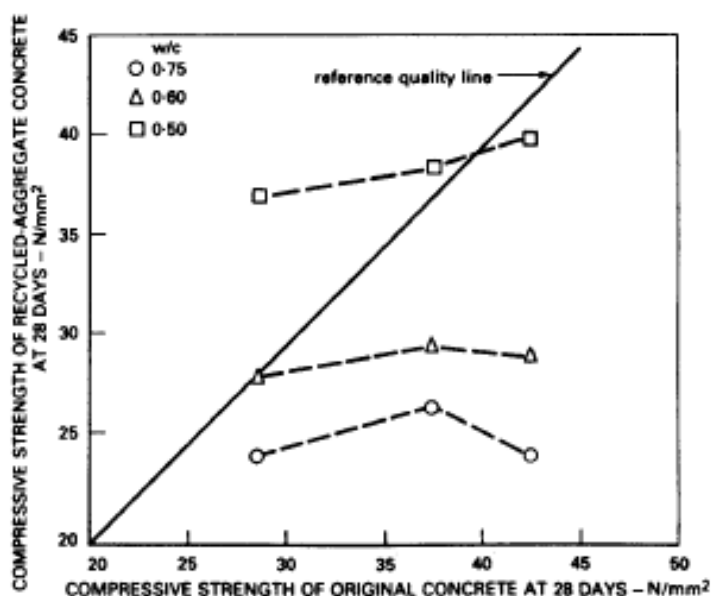


Ilustración 24, Resistencia a compresión de hormigón original y reciclado (Ravindrarajah 1985)

Nishbayashi (1988) relaciona en su estudio el contenido de mortero adherido con la resistencia a compresión del hormigón reciclado. La reducción de resistencia experimentada en un hormigón fabricado con árido reciclado con 35,5% de mortero adherido fue del 15%, mientras que en el mismo hormigón, fabricado con el mismo tipo de árido reciclado pero conteniendo un 67,6% de mortero adherido, la caída de resistencia fue del 30%. [64]

Kasai (1988) al sustituir un 30%, 50% y 100% del árido grueso por áridos reciclado

obtuvo disminuciones en la resistencia a compresión de 2-3%, 5-6% y 10-23% respectivamente. [65]

Hansen (1992) referencia un grave problema de la utilización de los áridos reciclados y es su alta heterogeneidad, lo que causa que el coeficiente de variación de la resistencia a compresión alcance valores hasta de un 25%. [66]

Kikuchi (1993) comparo la resistencia a compresión de un hormigón H40 con hormigones reciclados a los cuales aumento el contenido de agua y cemento para mantener la docilidad, obteniendo los siguientes mermas: 5% al sustituir la totalidad de árido grueso reciclado, 5% al sustituir un 15% de áridos finos y gruesos por reciclados y una disminución del 12.5% al sustituir un 30% de áridos finos y gruesos por reciclados [61].

Posteriormente Tavakoli (1996) también aumentando el contenido de agua y cemento obtuvo desde -3% hasta un +1.5% para un total de la sustitución del árido grueso, llegando a la conclusión de que la resistencia a compresión del hormigón de áridos reciclados puede ser igual o mayor que la del hormigón original si el hormigón reciclado se hace con la misma o menor relación agua / cemento que el hormigón original. [31]

Barra (1996) hace hincapié en el decrecimiento en la resistencia, que representa la incorporación de áridos reciclados en condiciones seca o saturada comparados con hormigón hecho con áridos semi-saturados además del beneficio que se observa desde el punto de vista de la durabilidad. [67]

González (2002) obtuvo aumentos en la resistencia a compresión entre 3% y 5% en un hormigón reciclado con sustitución del 50% de ardo grueso, al aumentar un 12% la cantidad de agua y cemento.

En el estudio realizado por Sánchez (2005) se observa una tendencia de reducción de la resistencia en el hormigón reciclado con respecto al hormigón de control, a medida que la resistencia a compresión aumenta, siendo a partir de 40 MPa cuando la diferencia se hace más evidente. [23]

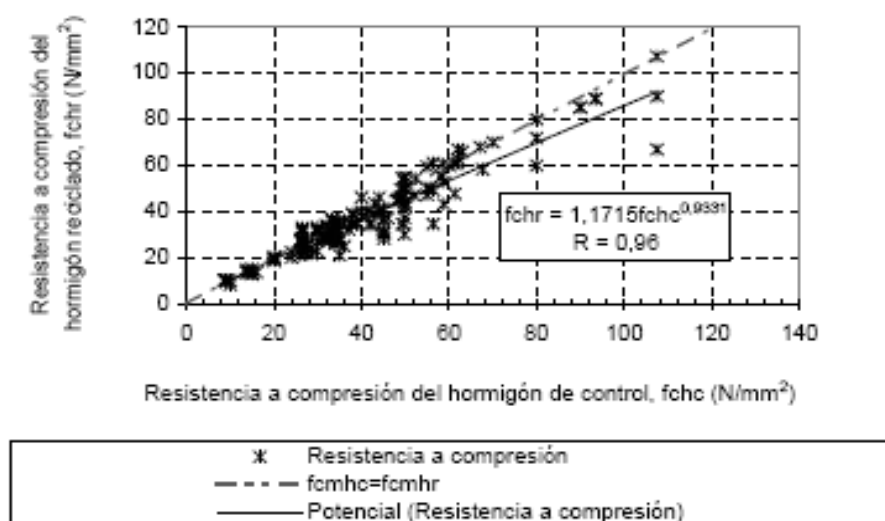


Ilustración 25, Potencial de resistencia a compresión de hormigón reciclado, relacionado con la resistencia del hormigón de control (Sánchez 2005)

Tam (2005) observó que las pérdidas de resistencia suelen situarse alrededor del 5%, cuando la sustitución de áridos naturales por reciclados es del 20%, y aumenta conforme aumenta la sustitución, llegando a valores hasta del 30% [68] cuando se ha sustituido el árido grueso en totalidad, aunque la mayoría de los estudios el decrecimiento no supera el 20%, como es el caso de -12% Turanti (1993), -20% Yanagi (1994) [69], -9% Barra (1996), -8% Ajdukiewicz (2001) [70], -

12% Gómez (2002) [71], -10% Otsuki (2003) [72], -17% Kou (2004) [73], -15% Sánchez (2005), Xiao (2005) [74], -20% Tsung (2006) [75], -4% Etxeberria (2007) [76].

Debido a que la calidad de los áridos reciclados, es inferior, se espera que el hormigón producido con estos tenga una resistencia a la compresión menor, pero pueden ocurrir ciertos fenómenos, que causen un aumento en la resistencia del hormigón reciclado con respecto al hormigón de control como son:

- Cuando se mantiene la misma dosificación, el hormigón reciclado absorbe mayor cantidad de agua y la relación a/c efectiva es menor.
- Cuando la relación a/c es alta
- Cuando los áridos reciclados proviene de hormigones de alta resistencia y se utilizan para producir hormigones reciclados de bajo desempeño. [77]
- Cuando para conseguir igual manejabilidad se adiciona agua y cemento conservando la misma relación a/c.
- Contenidos de cemento sin hidratar en los áridos reciclados.

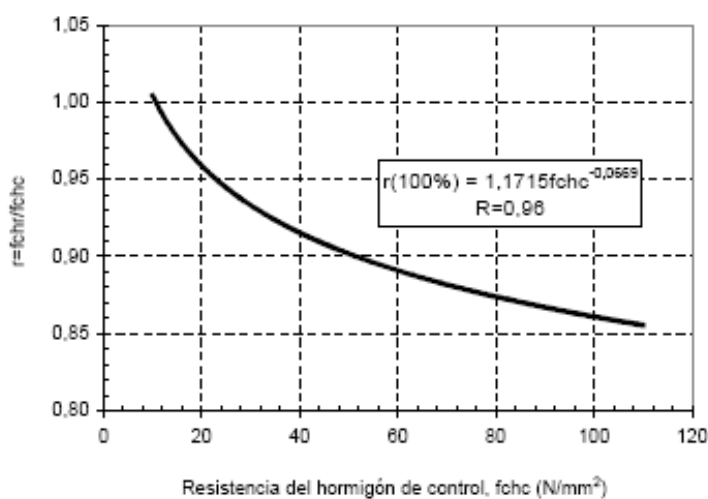


Ilustración 26, Coeficiente de reducción de la resistencia del hormigón a compresión (Sánchez 2005)

A medida que aumenta la resistencia del hormigón de control, aumenta el factor de reducción de resistencia, para el hormigón reciclado.

González-Fonteboa (2002) al estudiar el comportamiento estructural del hormigón reciclado observo la mayor influencia de la velocidad de rotura, pues al reducir la velocidad de rotura de la estándar (8.66 KN/s) a una mas lenta (0.06 KN/s) obtuvo descensos del orden del 9% sobre la resistencia del hormigón. [30]

Xiao (2005), observa que la resistencia a compresión se relaciona de forma lineal con la densidad, al analizar datos de algunos autores, a través de la siguiente expresión. [78]

$$f'c = 0,069\rho - 116,1$$

Ecuación 1, Relación densidad – resistencia a compresión cúbica, (Xiao 2005)

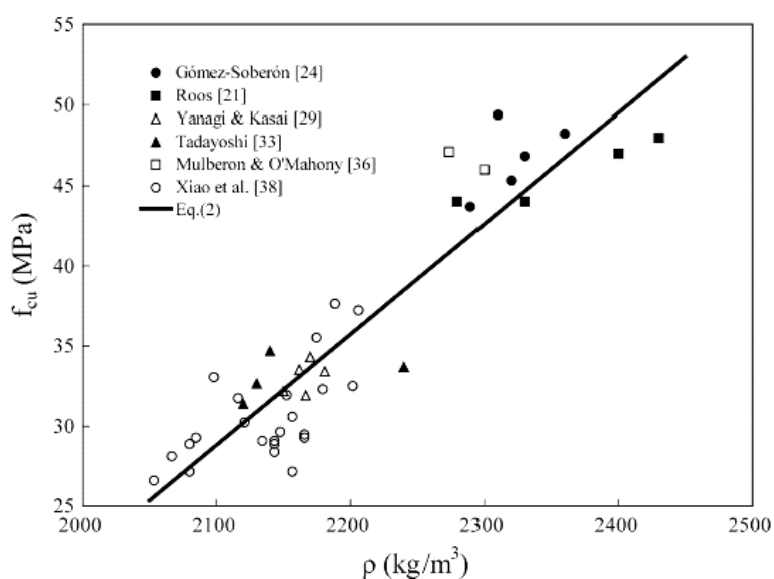


Ilustración 27, Relación resistencia a compresión - densidad del hormigón reciclado (Xiao 2005).

Poon y Chan (2006) al sustituir un 20% de la arena por restos de ladrillo la

resistencia a compresión a 28 días disminuyó en un 12,3%, en el caso de residuos de baldosas la disminución de resistencia aumenta a un 15,4%. [79]

Evangelista (2007) substituyó únicamente el árido fino por árido fino reciclado, obteniendo resultados desde disminución de resistencia de 3,4% en el porcentaje de substitución del 20% hasta un 7,6% cuando se substituye el 100% [80].

2.8.5 Desarrollo de la Resistencia a Compresión.

En una investigación conducida por Rohi (1998) se concluyó que el hormigón con 100% áridos reciclados incrementa un 2% menos la resistencia de 7 días, a los 28 días, con respecto al 16% incrementado en el mismo tiempo por un hormigón convencional. Esto pudo ser debido a la capacidad de absorción de los AR o la mala adherencia de los áridos con la pasta.

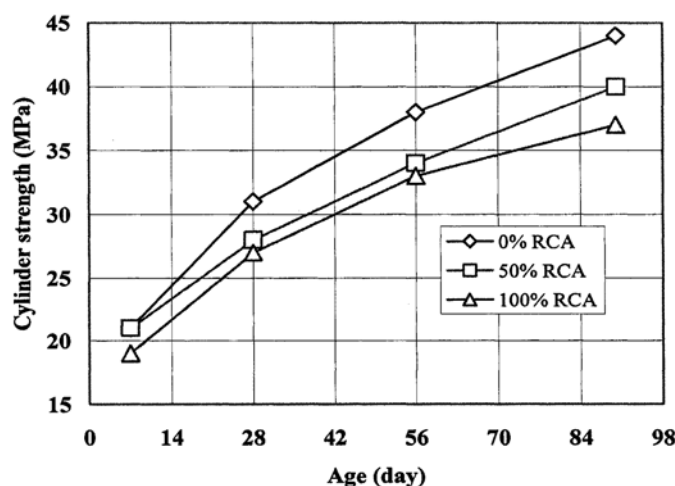


Ilustración 28, Desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón reciclado (Ravindrarajah 2000)

Ravindrarajah (2000) encontró que a los 28 días el hormigón convencional alcanza un 5,4% mayor resistencia a compresión que el hormigón con 50% áridos reciclados y un 8,9% mayor que cuando se sustituye el 100% del árido reciclado grueso. [81]

2.8.6 Modulo de Deformación.

Debido a que el hormigón es un material heterogéneo y sus propiedades dependen en gran medida de sus componentes, el modulo de deformación del hormigón reciclado se ve afectado por el bajo modulo de deformación del mortero adherido al árido reciclado.

Frondistou (1977) advertía que este es el efecto mas significativo de la utilización de árido reciclado, pues la reducción del modulo elástico, alcanza hasta el 40% comparado con el hormigón de referencia, explica por la gran dependencia del menor modulo elástico del árido reciclado. [62]

La JSCE (Japan Society of Civil Engineering) explica esta reducción del modulo elástico en la textura superficial más rugosa de los áridos reciclados y las pequeñas micro fisuras que puede presentar el mortero adherido.

Ravindrarajah (1988) reporto una disminución del 20% en el modulo de elasticidad al sustituir la fracción fina, disminución del 30% al sustituir la fracción gruesa y un valor de disminución del 35% al sustituir ambas fracciones [82], acorde con los resultados obtenidos anteriormente por Hansen (1986), con reducciones del

modulo elástico del nuevo hormigón entre 15% - 40%, alcanzando módulos mas bajos cuando se utilizan áridos reciclados finos [10].

Topcu (1997) el cual reporta que al sustituir la totalidad del árido grueso natural por árido grueso reciclado el modulo elástico alcanza un valor entorno al 80% del hormigón convencional [52].

Otros autores que realizaron sustituciones de la totalidad del árido grueso por reciclado obtuvieron valores entre 15% al 40% menor de modulo elástico; Nishibayashi (1988) encontró reducciones entre 15-35%, Hansen (1992) reveló una gran dispersión en los valores de modulo elástico con reducciones de 15% a 50%, Kikuchi (1998) obtuvo reducción de 5 a 20%, Sánchez (2005) observo también valores grandes de disminución de hasta 40%, Etxeberria (2007) disminución del 15% y Casuccio (2008) entre 13% a 18% [83].

Won (1999) Explica este fenómeno con el llamado “efecto mortero”, puesto que el hormigón reciclado posee mayor porción volumétrica de mortero que el hormigón preparado con áridos naturales. [84]

Natural Aggregate (%)	Recycled Aggregate (%)	28 day Compressive Strength (MPa)	28 days Elastic Modulus (GPa)	Relative E-value
100	0	37	27.7	1.00
75	25	40	29.4	1.06
50	50	34	26.1	0.94
25	75	40	26.6	0.96
0	100	38	18.0	0.65

Tabla 9, Modulo elástico de hormigón con diferentes contenidos de áridos reciclados (Won 1999)

Grubl, Rhül y Bühner (1999) evalúan el modulo elástico de hormigón de áridos

naturales (NZ) y con sustituciones parciales y totales de áridos reciclados de hormigón (BB) y áridos reciclados cerámicos (ZI), como se observa en el gráfico a medida que se sustituyen áridos naturales por reciclados el módulo elástico disminuye, y en mayor medida cuando los áridos son de origen cerámico. [85]

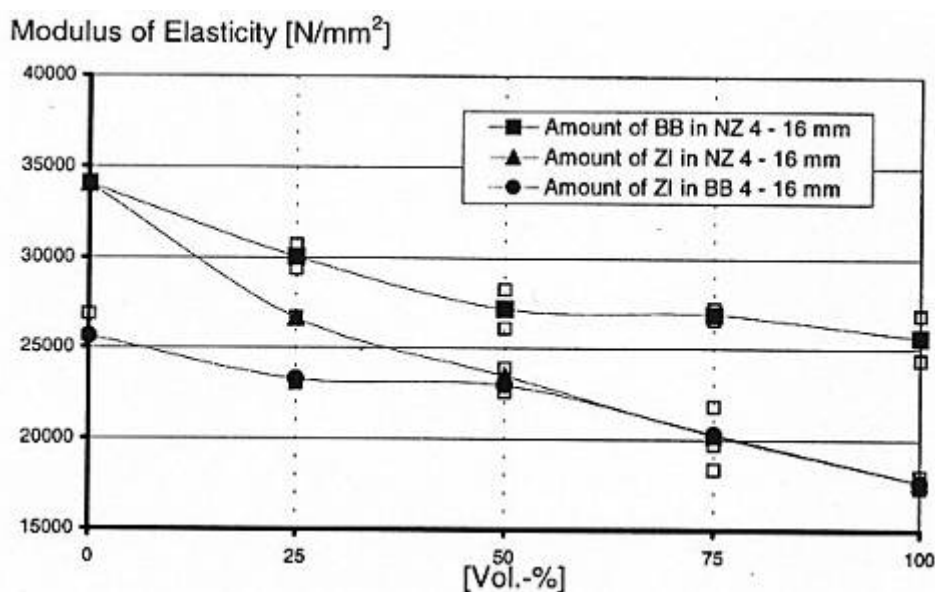


Ilustración 29, Módulo elástico, hormigón de áridos reciclados de hormigón y cerámicos (Grübl 1999)

Grübl también concluye que los modelos de predicción del módulo elástico sobrestiman los resultados, sobre todo para nivel de sustitución alta.

Evangelista (2007) encontró disminuciones del orden de 4% y 19% en el módulo elástico del hormigón para sustituciones del 30% y 100% del árido fino respectivamente [80].

2.8.7 Relación Modulo De Deformación – Resistencia a Compresión.

Algunos autores proponen ecuaciones sencillas que expresan el modulo de Young en función de la resistencia a compresión de probeta cúbica. [29] [63] [86] [87]

$$E_c = 7770 f_{cu}^{0,33} \text{ Mpa}$$

Ecuación 2, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión (Ravindrarajah 1985)

$$E_c = 370 f_{cu} + 13100 \text{ Mpa}$$

Ecuación 3, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión (Dhir 1999)

$$E_c = 634,43 f_{cu} + 3057,6 \text{ Mpa}$$

Ecuación 4, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión (Dillmann 1998)

$$E_c = 378 f_{cu} + 8242 \text{ Mpa}$$

Ecuación 5, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión (Mellmann 1999)

$$E_c = 4127 f_{cu}^{0,5} \text{ Mpa}$$

Ecuación 6, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión (ACI 318 2002)

Otros autores expresan el modulo elástico relacionando la resistencia a compresión con la densidad.

$$E_c = 1,9 \times 10^5 \left(\frac{\rho}{2300} \right)^{1,5} \sqrt{\frac{f_c}{2000}} \text{ Mpa}$$

Ecuación 7, Modulo de deformación en función de la resistencia y densidad (Kakizaki 1988)

$$E_c = 9100 (f_{cu} + 8)^{1/3} \left(\frac{\rho}{2400} \right)^2 \text{ Mpa (para sustituciones de fracción fina)}$$

Ecuación 8, Modulo de deformación en función de la resistencia y densidad (Zilch y Roos 2001)

El instituto de arquitectura Japonés [88]

$$E_c = 2,1 \cdot 10^5 \cdot \left[\frac{\gamma}{2,3} \right]^{1,5} \cdot \sqrt{\frac{f_c}{200}} \quad (\text{kg/cm}^2) \text{ y } (\gamma) \text{ de } 1,9 \text{ a } 2,3 \text{ t/m}^3.$$

Ecuación 9, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión y peso específico

$$E_c = \frac{10^5}{2,8 + \frac{40,1}{f_{cu}}} \text{ Mpa}$$

Ecuación 10 Modulo de deformación, función de la resistencia a compresión cúbica (GB50010 2002).

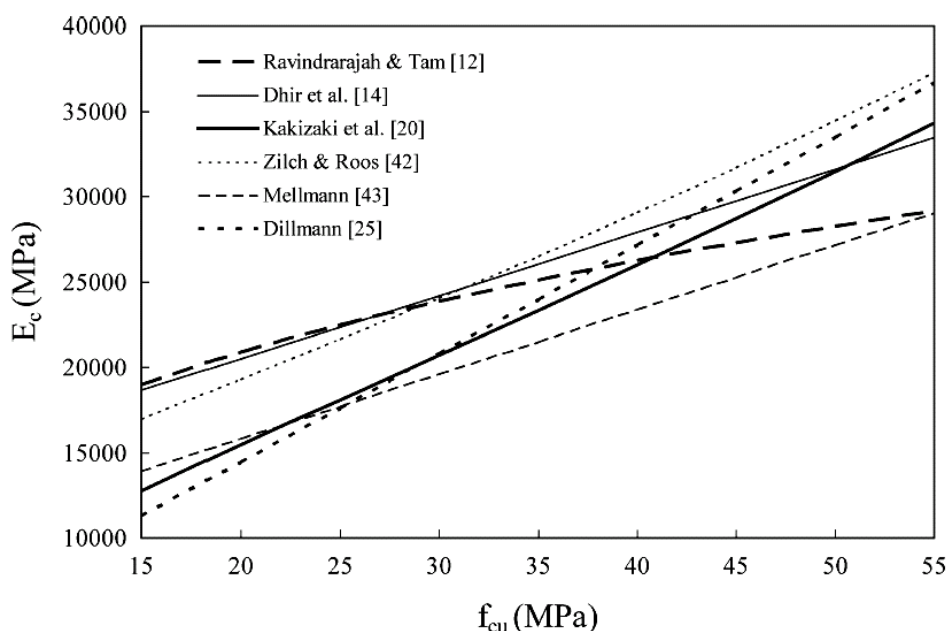


Ilustración 30, Modulo de deformación, función de la resistencia a compresión y densidad, por distintas expresiones propuestas (Xiao 2006)

Xiao y otros (2006) relacionan estas dos propiedades, después de realizar una recopilación de datos de distintos autores y compararlas con los resultados previstos por otras expresiones, concluyen que la expresión del ACI subestima el modulo elástico sobretodo cuando la resistencia a compresión es bajo, así plantea y recomienda la siguiente relación [78], partiendo del código chino, GB50010-2002 el cual sobrestima los resultados y también la planteada por Ravindrarajah y Tam

(1985).

$$E_c = \frac{10^5}{2,8 + \frac{40,1}{f_{cu}}} \text{ Mpa}$$

Ecuación 11, Modulo de deformación en función de la resistencia a compresión cúbica (Xiao 2006).

2.8.8 Relación Tensión - Deformación.

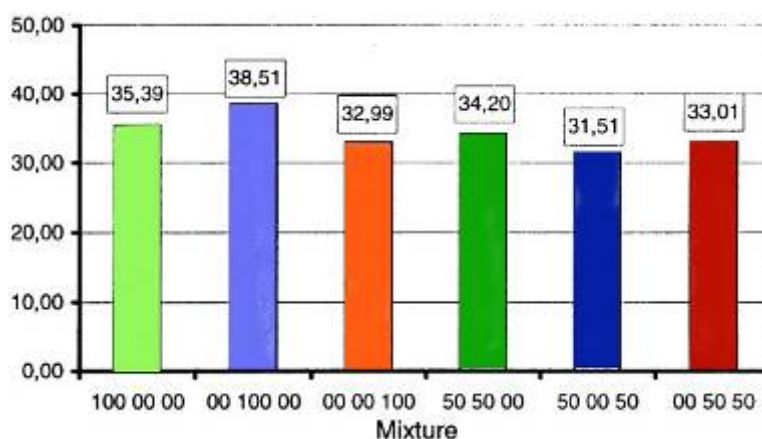


Ilustración 31, Resistencia a compresión, mezclas de hormigón con áridos naturales, reciclados de hormigón y reciclados cerámicos (Rühl 1999)

En investigaciones en Alemania por Rühl (1999), se utilizo áridos reciclados de hormigón y de origen cerámico, sustituyendo la fracción gruesa de una mezcla, se realizo un ensayo de tensión – deformación, aunque no se observo un comportamiento claro de la resistencia a compresión relacionado con el tipo de áridos, la deformación registrada bajo máxima tensión depende en gran medida del tipo de áridos. [89]

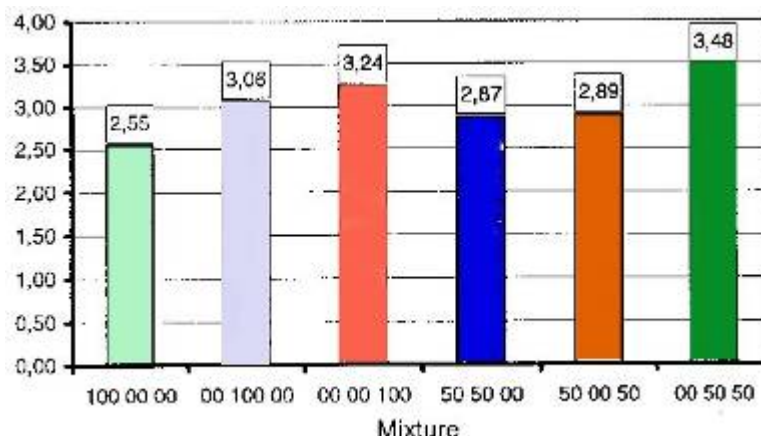


Ilustración 32, Deformación bajo máxima tensión, mezclas de hormigón con áridos naturales, reciclados de hormigón y reciclados cerámicos) (Rühl 1999)

En el grafico se observa como la deformación bajo máxima tensión, aumenta con la sustitución de áridos reciclados de hormigón 12,5% cuando se sustituye un 50% y hasta un 20% para sustituciones totales de la fracción gruesa.

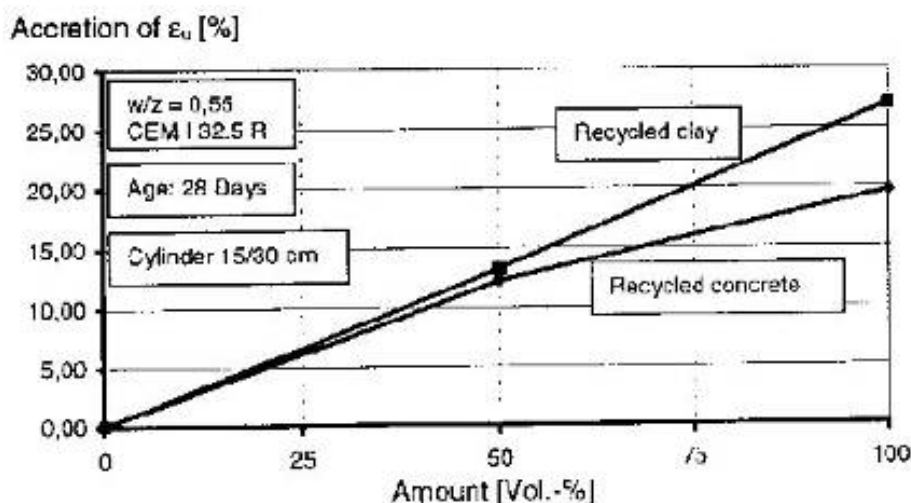


Ilustración 33, Aumento de la deformación bajo máxima carga del hormigón reciclado según la cantidad y tipo de áridos utilizados (Rühl 1999)

Este incremento en la deformación cuando se sustituyen por áridos reciclados de origen cerámico alcanza hasta un 27% cuando se sustituye la totalidad de la

fracción gruesa por áridos reciclados de origen cerámico.

2.8.9 Resistencia a Tracción.

Gonzalez-Fonteboa (2005) expresa que la resistencia a tracción es una de las propiedades que parece estar menos afectada por la sustitución de los áridos naturales por áridos reciclados [58].

Según Won (1999) para la misma relación agua-cemento, la sustitución de árido fino natural por hormigón machacado fino no cambia la resistencia a tensión.[84]

Por otro lado la resistencia a flexión puede ser ligeramente menor que la de una mezcla similar usando áridos convencionales, mientras disminuye hasta un 20% cuando se utilizan áridos reciclados finos. [63][90]

Cuando la sustitución es del 100% del árido grueso las pérdidas de resistencia a tracción oscilan en rangos del 6-20% y en casos puntuales hasta del 30% como lo reportado por Hansen (1992) cuando sustituyó la totalidad de los áridos finos y gruesos por reciclados.

Mientras que cuando la sustitución es inferior al 50% las diferencias pasan a ser inapreciables, prueba de esto es lo reportado por Di Niro (1998) con una reducción del 3.2%, González (2002) muestra una variación de +1% a -2%, Sánchez (2005) reporta una variación de -1%.

Ravindrarajah y Tam (1987) muestra que no hay reducción en la resistencia a

tensión cuando se sustituye árido reciclado grueso y apenas una disminución de 7% cuando se sustituye áridos reciclados gruesos y finos, no obstante la reducción de la resistencia a tracción es del 6% y 10% respectivamente y mucho mas marcada en la resistencia a cortante con una disminución de 26% y 32% respectivamente [91]

Hansen (1986) ya reportaba una disminución de cerca del 30% en la resistencia última a flexión comparada con el hormigón de referencia. [10]

Soroushian y Tavakoli (1996) observan que la resistencia a tracción y flexión del hormigón reciclado puede ser menor o mayor que la resistencia que el hormigón convencional dependiendo de la relación agua cemento y del periodo de mezcla seca de los áridos. [31]

Grubl (1998) en sus estudios relaciona la resistencia a tracción indirecta como un 8% de la resistencia a compresión cúbica del hormigón, mientras que en el hormigón reciclado la resistencia a tracción indirecta se encuentra en un rango entre el 4% y 8%.

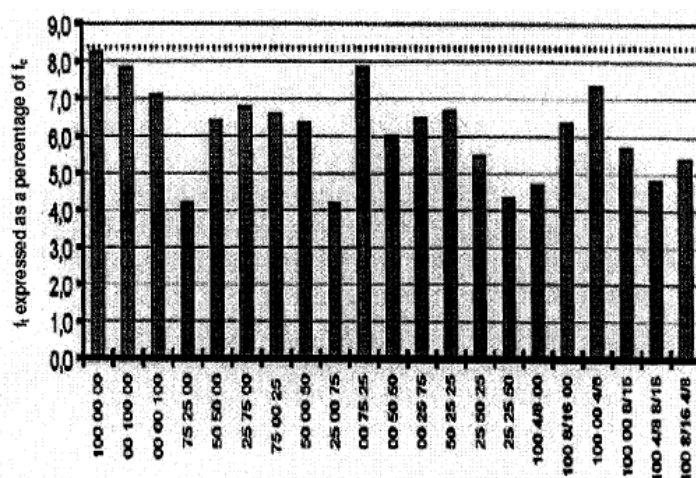


Ilustración 34, Relación resistencia a tracción indirecta - resistencia a compresión cúbica (Grubl 1998)

Di Niro (1998) muestra como la resistencia a tracción del hormigón se encuentra entre un 7% a 9% de la resistencia a compresión, variando el contenido de árido reciclado grueso [92].

Gómez (2002) observa que para sustituciones menores al 50% no hay variación en la resistencia a tracción, mientras para sustitución total de la fracción gruesa disminuye hasta en un 11%.

% OF Recycled Aggregates	28 day Compressive Strength (MPa)	28 day Tensile Strength (MPa)	% of tensile strength of Concrete with All natural Aggregate	Ratio of Tensile strength and Compressive Strength
100 (Presoaked)	32.1	2.67	68.1	0.083
100	36.3	2.71	69.1	0.074
70	36.6	2.86	73.0	0.078
50	38.0	2.67	68.1	0.072
30	43.0	3.79	96.7	0.088
0	44.95	3.92	100	0.087

Tabla 10, Resistencia a tracción de hormigón reciclado (Di Niro 1998)

En un estudio español [23] concluye que la relación que establece la EHE entre la resistencia a compresión y tracción indirecta del hormigón convencional es válida también para los hormigones reciclados, aunque se ajusta aun mas, cuando se corrige a un 75% de la resistencia a tracción.

$$f_{ct,m} = \frac{0,33\sqrt{f_{ck}^2}}{0,9}$$

Ecuación 12, Relación resistencia a compresión - Resistencia a tracción indirecta (Sanchez 2005)

Propuestas por códigos:

$$ACI : f_{sp} = 0,49 f_{cu}^{0,5} \text{ Mpa}, \quad GB : f_{sp} = 0,19 f_{cu}^{0,75} \text{ Mpa}$$

Ecuación 13, Relación resistencia a compresión - tracción indirecta, códigos

Otro estudio reciente [78], relaciona directamente la resistencia a tracción indirecta, con la resistencia a compresión, como una expresión intermedia entre la propuesta por el ACI que sobrestima la resistencia a compresión diametral y el código chinas que por el contrario la subestima.

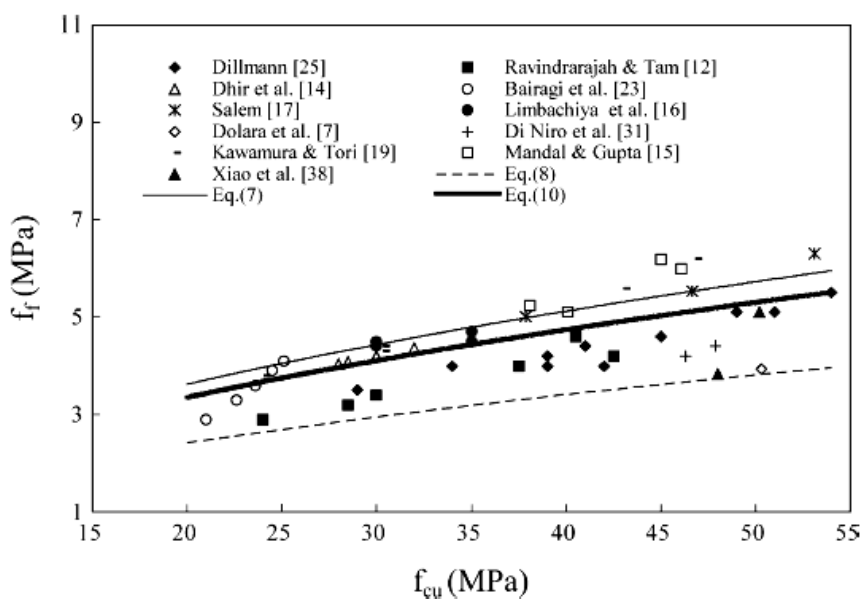


Ilustración 35, Resistencia a tracción en función de la resistencia a compresión.

$$f_{sp} = 0.24 f_{cu}^{0.65}$$

Ecuación 14, Relación Resistencia a compresión – tracción indirecta (Xiao 2006)

También se ha planteado la relación entre la resistencia a tracción del mortero y la resistencia del hormigón. [93]

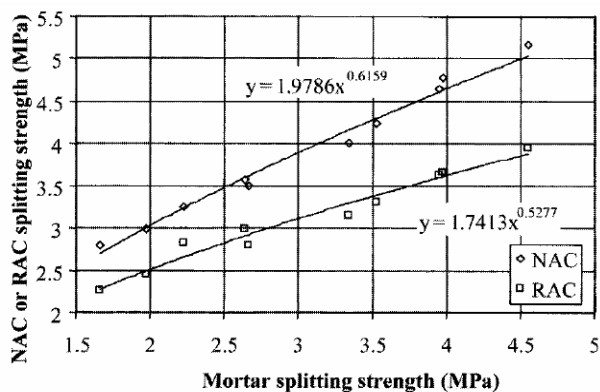


Ilustración 36, Resistencia a tracción en función de la resistencia a tracción del mortero (Kheder2005)

Kheder (2005) presenta en este estudio como la resistencia a tracción del hormigón con áridos naturales siempre es mayor que la del mortero, mientras que el hormigón reciclado presenta mayor resistencia tracción que el mortero en mezclas de baja resistencia, contrario a cuando las mezclas son de mayor resistencia, en cuyo caso la resistencia a tracción del mortero es la que prevalece.

Algunas recomendaciones internacionales coinciden en no realizar corrección alguna en la resistencia a tracción para hormigones reciclados fabricados en las mismas condiciones y con los mismos parámetros, mientras Sánchez (2005) encontró que medida que aumenta la resistencia del hormigón, mayor es el grado de variación en sustituciones del 100% del árido grueso.

Resistencia a tracción Mpa del hormigón de control	Sustitución 20%- 50%	Sustitución 100%
	Coeficiente de reducción	
2.5	0.98	0.97
3	0.98	0.88
3.5	0.98	0.81

Tabla 11, Coeficiente de reducción de resistencia a tracción de hormigón reciclado (Sánchez 2005)

Las variaciones de la resistencia a flexo-tracción en los hormigones reciclados son

similares a las experimentadas en la resistencia a tracción, con reducciones importantes solo cuando el porcentaje de sustitución supera el 50% del árido grueso.

Ravindrarajah (1985) para una sustitución del 100% del árido grueso reportó una disminución entre el 1% y el 10%, posteriormente en (1987) reportó mayores disminuciones con valores entre el 12% y 15%. En (1988) las disminuciones reportadas fueron entre el 15% y el 29% pues sustituyó la totalidad de los áridos.

[25] [63] [82]

CAPITULO 3: DEFORMACIONES DIFERIDAS

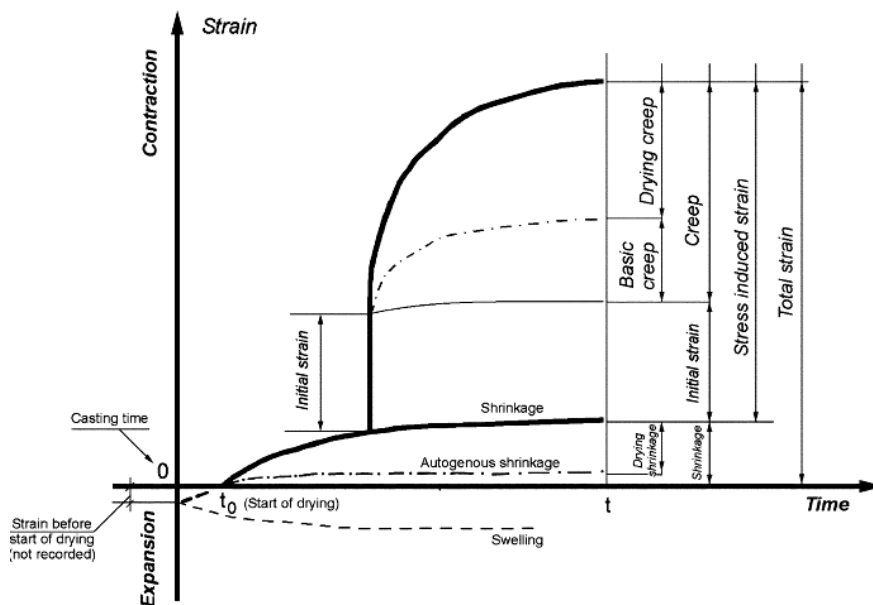


Ilustración 37, Tipos de deformaciones en función del tiempo (ACI Committee 209, 2005)

El hormigón como los demás materiales usados en ingeniería presenta deformaciones instantáneas bajo carga, además de otros tipos de deformación debido al envejecimiento y a su naturaleza higroscópica, entre ellos los esfuerzos y deformaciones inducidas por el secado. Esta deformación a cualquier edad, puede descomponerse en tres fases: deformación elástica la cual se la respuesta instantánea bajo la carga, la retracción la cual esta compuesta de autógena y por secado y fluencia la cual tiene porciones de fluencia básica y fluencia por secado.

La fluencia y la retracción son comúnmente discutidos al tiempo porque son influenciados por los mismos factores en caminos similares: ambos son originados en la pasta de cemento y ambos tienen cambios similares con el tiempo. No obstante, la fluencia es una deformación esfuerzo dependiente contrario a la retracción, razón por la cual se analizan por separado.

3.1 RETRACCIÓN

La retracción es el decrecimiento del volumen de hormigón con el tiempo, síntoma del cambio en el contenido de humedad del hormigón y cambios físico-químicos ocurridos sin esfuerzos atribuibles a acciones externas al hormigón.

Esta deformación inelástica del hormigón, aunque fue observada con anterioridad, su importancia fue reconocida solo cuando White (1911), en un artículo de la American Society for Testing Materials, escribió sobre el desarrollo de tensiones en el hormigón a causa de la retracción.

La retracción es un fenómeno indeseable aunque inevitable en el hormigón que se encuentra expuesto por debajo de la condición de saturación, se encuentra ligada a fenómenos patológicos de las construcciones, siendo una de las principales causas de fisuración, afectando directamente la durabilidad del hormigón, apariencia y pérdida de tensión en miembros pretensados.

Uno de los estudios más anticipados reportando deformaciones tiempo-dependientes en el hormigón cargado y sin carga, fue el de McMillan (1915). Desde ahí hasta nuestros días, la relación retracción-fluencia sigue siendo un punto de preocupación desde el punto de vista teórico y del diseño estructural.

3.1.1 Factores que Afectan la Retracción.

La retracción depende de factores como: contenido de pasta de cemento, relación agua /cemento, proporciones de la mezcla, características de los áridos, grado de

compactación, tiempo, temperatura y humedad del curado, temperatura ambiental, humedad relativa, geometría del elemento, adiciones y aditivos.

Es conocido que los áridos tienen un efecto restrictivo sobre la retracción del hormigón, probablemente fue Carlson (1937) el primero en sugerir este resultado [94]. Como fase inerte definieron al árido, Pickett (1956) y L'Hermite (1960), definiendo la matriz cementicia como la fase responsable de los cambios volumétricos del hormigón. [95][96]

Pickett, desarrolló un modelo del efecto de restricción de los áridos partiendo de una esfera de árido embebido en una esfera de pasta de cemento.

$$S = S_0(1 - g)^\alpha \quad \Rightarrow \quad \log\left(\frac{S_0}{S}\right) = \alpha \cdot \log\left(\frac{1}{1 - g}\right)$$

Ecuación 15, Modelo de efecto de restricción de los áridos, lineal y logarítmica (Pickett 1956)

Esta ecuación relaciona, la retracción lineal del hormigón (S), con la retracción lineal de la matriz cementicia (S_0), a través del volumen relativo de árido (g).

(α) Corresponde a una constante que representa el efecto de restricción, que toma según Carlson valores entre 1.6 y 2.3, para grava y áridos calizos respectivamente.

Powers (1961) aplica el concepto de efecto restrictivo del árido al cemento, considerándolo como filler, siendo más importante en hormigones con muy baja relación agua/cemento, en los cuales el cemento no será hidratado totalmente. [97]

Shah (1994) observa que un mayor contenido de áridos y con buenas características, como dureza, baja absorción, densidad alta, y superficie rugosa,

favorecen el control paralelo de la retracción y la fluencia, puesto que restringen las deformaciones que se presenten en la pasta de cemento. [98]

Furnas (1997) observa el efecto del tamaño del árido en la retracción por secado de un hormigón de relación a/c 0.4, al aumentar el tamaño de la fracción la retracción fue notablemente reducida.[99]

	Fracción Granulométrica (mm)						
	Pasta	0,3 – 0,6	0,6 – 1,2	1,2 – 2,4	2,4-4,8	4,8 – 9,5	9,5 - 19
Retracción 1 año (x10⁻⁶)	2710	1190	1240	1220	1160	940	690

Tabla 12, Efecto del Tamaño de los áridos sobre la retracción

Mindess (2003) Observa que un tamaño máximo de árido mayor, provee un mayor efecto restrictivo de la retracción [100]. Esto es razonable pues es posible utilizar más volumen de áridos cuando se utiliza un tamaño máximo de árido mayor.

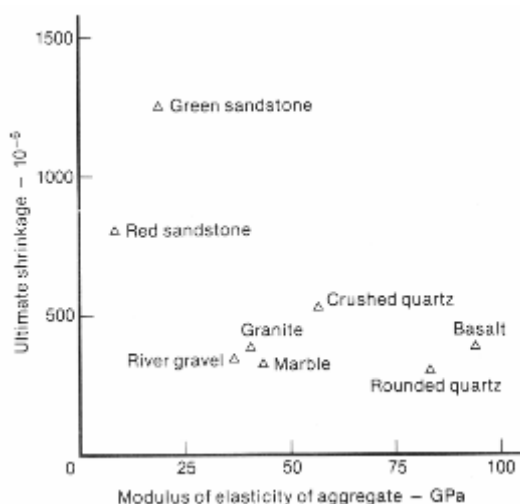


Ilustración 38, Relación entre la retracción ultima del hormigón y el modulo elástico de los áridos (Neville 1970)

Neville (1970) observa que al usar áridos de menor rigidez generalmente causan

mayor retracción del hormigón. En estudios modernos, Moon (2005) expresa que la retracción además del volumen relativo de árido y la rigidez del mismo, depende también de la relación de Poisson del árido, la forma del árido y el espacio entre partículas. [101]

Tras el efecto de los áridos, el segundo factor en importancia que ejerce gran influencia sobre la retracción es la relación agua/cemento, para relaciones agua/cemento bajas la retracción disminuye. Estos efectos están unidos principalmente al cambio sobre la relación pasta/árido de las mezclas.

Smadi (1987) observa que baja relación agua/cemento para obtener resistencias mayores, permite un decrecimiento de la retracción, pues resulta en estructuras menos porosas de mayor rigidez [102], además las relaciones agua cemento altas permiten que un exceso de agua permanezca en el hormigón después de la hidratación, traduciéndose en potencial de retracción por secado.

Tazawa (1995) revelo que la retracción autógena de una mezcla con relación a/c 0.4 fue $100 \mu\epsilon$, lo que representaba el 40% del total de la retracción total ($250 \mu\epsilon$), por otro lado la retracción autógena de una mezcla con relación a/c 0.17 fue $700 \mu\epsilon$, equivalente al 100% de la retracción total. [103]

Neville (1996) presenta una relación entre el efecto del volumen de árido, la relación agua/cemento y la retracción, observando que el efecto sobre esta del contenido de áridos es mas importante cuando la relación agua/cemento disminuye drásticamente, posiblemente por el cemento no hidratado, como explicaba Powers (1959) para relaciones a/c menores a 0.4, mas del 50% del cemento no es hidratado sin necesidad de agua adicional externa. [104].

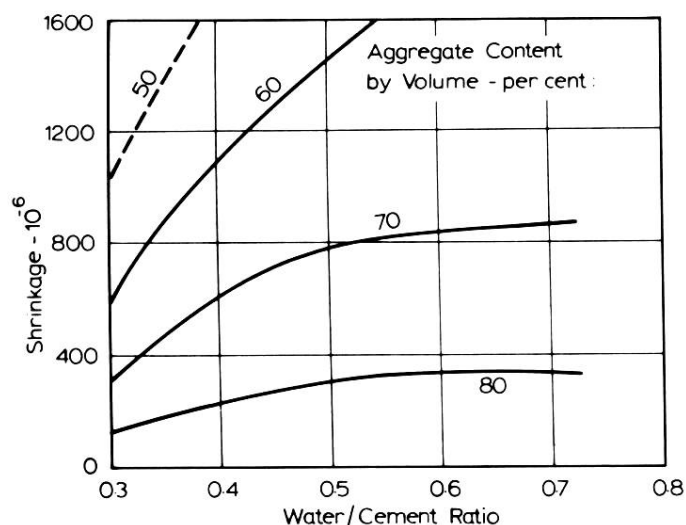


Ilustración 39, Efecto de relación a/c y el volumen de áridos sobre la retracción (Neville 1996)

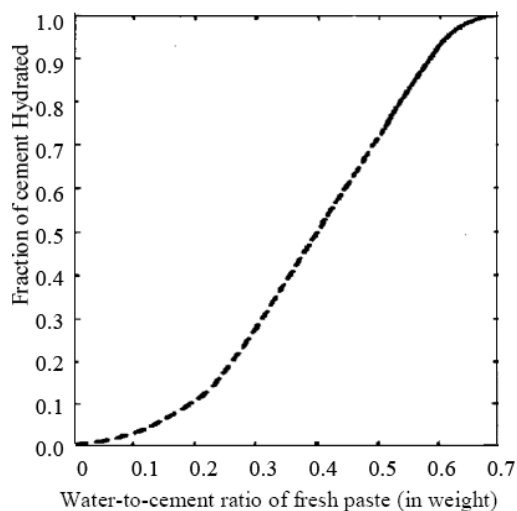


Ilustración 40, Relación estimada entre la relación a/c y el grado de hidratación. (Powers 1959)

Smadi (1987) observa como el hormigón con contenidos elevados de cemento como es el caso de hormigones de alta resistencia presentan mayor retracción.^[102]

Chern (1989); Furnas (1997) observan que la parcial sustitución de cemento con materiales puzolánicos como cenizas volantes y escorias tiende a incrementar la

retracción por refinamiento de la pasta de cemento. La utilización de escorias con menor gravedad específica que el cemento Pórtland hace que el volumen de pasta aumente y por consiguiente la retracción. [103]

Brooks & Neville (1992) asevera que los materiales cementantes suplementarios que refinan la estructura de poro del hormigón generalmente incrementaran la retracción, sin embargo, no es posible generalizar, pues la sustitución de cenizas volantes, escoria de alto horno y humo de sílice, tiene efectos diferentes sobre la retracción y dependen del nivel de sustitución, composición química y finura. [104]

De Larrard (1994) igualmente, observa que el incremento de humo sílice causa el refinamiento de la estructura de poro del hormigón desarrollando una permeabilidad muy baja que disminuye la tasa de secado y consecuentemente una ligera disminución de la retracción por secado, por otro lado incrementan las tensiones de capilaridad por tanto la retracción autógena del hormigón aumenta. [105]

Belaribi (1997) reporto después de ensayos a un año, que morteros con sustitución parcial de cemento por materiales cementantes de origen calcáreo presentaron 4% menos deformación de retracción que especímenes de control solo con cemento, la disminución fue del orden de 23% cuando los materiales cementantes utilizados fueron de origen silicio. [106]

Shah (1994) explica que el tipo de cemento tiene una incidencia fuerte sobre la retracción, pues los cementos de endurecimiento rápido, debido a su fineza demandan mayor cantidad de agua, lo que implica que retraigan más [98]. Expresa

además que la cantidad de cemento en la mezcla de hormigón también influye en la retracción durante la hidratación, mayor contenido de cemento acelera la tasa de hidratación y por tanto más pérdida temprana de humedad.

Brooks (1989) Observa que el efecto del plastificante en la retracción no es concluyente, pues así como pueden aumentar la retracción, cuando se utilizan para disminuir la cantidad de agua, tienden a disminuir la retracción [107]

La retracción es el resultado de la migración de agua entre el hormigón y el ambiente, las condiciones de curado y almacenaje afecta fuertemente la retracción. Collins (1989) concluye que el valor de la retracción es inversamente proporcional al tiempo de curado húmedo. [108]

Tazawa (1995) observa que un curado húmedo prolongado mejora la hidratación, cambia la estructura de poro y mantiene una alta humedad relativa interna en el hormigón [109]. Bentz (1999) expresa que la retracción decrece con largos periodos de curado. [110]

Árido Quartzito 19mm	Retracción ($\times 10^{-6}$)					
Edad	14	28	90	180	360	500
Curado 28 días	-	-55	55	158	250	308
Curado 14 días	-23	-15	40	200	310	445

Tabla 13, Influencia del tiempo de curado sobre la retracción (Furnas 1997)

Boukendakdji y Brooks (2000) encontró que el curado al vapor decrece la retracción por secado del hormigón de cemento Pórtland y con cemento de escoria en un 14% y 23% respectivamente. [111]

Mark (1999) obtuvo resultados más favorables con el curado acelerado pues observó reducciones significativas de la retracción por secado de hasta un 75% menos que con un curado a temperaturas estándar ^[112].

Mokhtarzadeh (2000) confirma que al aumentar la temperatura de curado de 50°C a 65°C la retracción por secado disminuye considerablemente. ^[113]

3.2 TIPOS DE RETRACCIÓN

3.2.1 Retracción Térmica.

Llega a ser importante durante los primeros días después de la colocación del hormigón donde el calor producido por la hidratación del cemento aumenta la temperatura del hormigón, durante el enfriado subsiguiente, el hormigón experimenta acortamiento térmico que crea esfuerzo tensor en el hormigón, si el movimiento es restringido el esfuerzo puede fácilmente dominar la baja resistencia a tracción del hormigón a temprana edad produciendo grietas.

3.2.2 Retracción Plástica.

Ocurre en el hormigón fresco, el mecanismo más común es la evaporación de agua de la superficie del hormigón plástico, sin embargo, la pérdida de agua a través de sub-bases o encofrados puede agravar los efectos de evaporación superficial.

En el hormigón fresco las partículas están completamente rodeadas de agua, si esa agua se remueve del sistema, se forman meniscos entre las partículas, que

generan presión capilar negativa, lo cual hala de las partículas de cemento a la vez, los esfuerzos de capilaridad tienden a reducir el volumen de pasta de cemento. La presión capilar continúa ascendiendo tanto como se pierda agua de la superficie del hormigón, cuando las presiones alcanzan valores críticos, el agua que permanece en el hormigón se reorganiza para formar discretas zonas con vacíos entre ellas donde ocurre retracción plástica.

Esta es fácilmente distinguible por su disposición aleatoria, puesto que el hormigón con una resistencia mínima libera la tensión a través de fisuras, con características de cercanía entre si y poca profundidad, “piel de cocodrilo”

3.2.3 Retracción Autógena.

Es un resultado del auto desecación del hormigón. Cuando no es añadida agua adicional al hormigón a través del curado, el hormigón comienza a consumir químicamente el agua durante la hidratación.

Tradicionalmente, la retracción autógena ha sido vista como si fuera de importancia secundaria normalmente englobada dentro de la retracción por secado, estimada en un 5% del valor máximo que alcanza la de secado, se suele despreciar ^[114], aunque en las mezclas modernas con fillers y reductores de agua de alto desempeño puede ser una influencia dominante sobre el agrietamiento.

Para hormigones convencionales, la retracción autógena es relativamente baja con valores típicos de 40 $\mu\epsilon$ a edades tempranas y de 100 a 150 $\mu\epsilon$ a largo plazo. Sin embargo incrementa con el aumento de la tasa de hidratación, uso de cemento de alto contenido en C₃A (aluminato tricalcico), cementos mas finos, el uso de algunos materiales cementantes suplementarios, menor relación agua cemento, uso de

superfinos como humo sílice, aditivos reductores de agua y una estructura de poro fina. [109]

Lynam (1937) y Davis (1940) fueron los primeros en definir y medir la retracción autógena. Lyman señaló que la retracción autógena no se debió a ningún efecto térmico ni pérdidas de humedad en el aire.

Hoy en día la estructura de la pasta de cemento a cambiado drásticamente, con el uso de reductores de agua, y materiales cementantes suplementarios, lo cual a aumentado la retracción autógena considerablemente haciéndola incluso mayor en algunos casos que la retracción térmica.

3.2.4 Retracción Química.

Es la que acompaña a la hidratación del cemento Pórtland, Le Chatelier alrededor del 1900 estableció que el volumen de los productos formados durante la hidratación del cemento Pórtland es considerablemente menor que la suma del volumen del agua y el cemento (entre el 8 y 12%). Este fenómeno conocido como la contracción Chatelier's es la causa de la retracción química.

Mientras la pasta de cemento es fluida, la retracción química es totalmente convertida a un cambio de volumen externo. En otras palabras la pasta fluida no es capaz de soportar los vacíos internos creados por la retracción química y se contrae.

Cuando los hidratos se filtran y los primeros caminos sólidos se forman en la pasta endurecida, la rigidez incrementa y las burbujas de gas comienzan a agruparse y desarrollar en poros mayores.

Estos aumentos de la formación de meniscos agua-aire y las caídas de humedad relativa interna se conoce como ley de Kelvin y la presencia de meniscos causante de esfuerzos de tensión en los poros del fluido (Ley de Laplace).

La caída de humedad relativa resulta en un cambio en el espesor de la capa de agua absorbida sobre las superficies sólidas. Esto acompañado por cambios en la tensión superficial de los sólidos y en las desencajadas presiones del agua absorbida entre las superficies sólidas. A este temprano estado de hidratación, la rigidez de la pasta es tan baja y el comportamiento viscoso tan pronunciado que el mas ligero esfuerzo actuando sobre el sistema resulta en una gran de formación.

La retracción química es de cerca de 6 a 7 ml/100g de cemento reaccionado, resulta no solo de la hidratación del principal mineral, clinker sino también de las reacciones secundarias, incluyendo formación de ettringita (sulfa-aluminato de calcio). Una mayor retracción se encuentra en la reacción del humo de sílice con hidróxido de calcio, cerca de 20 ml/100g de humo sílice reaccionado.

3.2.5 Retracción de Secado

Se diferencia de la retracción autógena en que la pérdida de agua no es usada en la reacción del cemento, se pierde al ambiente.

Pickett en (1946) propone un modelo sobre la retracción de secado que relaciona el cambio de volumen del hormigón en proporción a su pérdida de agua. Posteriormente se refina y aparecen los tres mecanismos principales de retracción de secado: Esfuerzo capilar, presión de ruptura y tensión superficial.

Cada mecanismo es dominante en un diferente rango de humedad relativa. El mas relevante rango de humedad relativa para condiciones de campo es entre 45% a

90%, en este el esfuerzo capilar es el más dominante.

Cuando el agua evapora, los esfuerzos de tensión que fueron confinados por la tensión superficial del agua son transferidos a las paredes de los poros capilares (<50nm), resultando en retracción del hormigón. [115]

La remoción capilar y agua absorbida es incrementalmente mas difícil cuando el agua esta fuertemente oprimida a la pasta de cemento hidratado. Consecuentemente, la perdida de agua presenta un decrecimiento con el tiempo.

Para hormigones convencionales bajo condiciones estándar (23°C y humedad relativa del 50%), la retracción por secado medida sobre probetas entre 75 y 150 mm, generalmente se encuentra en rangos de 400 a 800 $\mu\epsilon$ después de dos años.

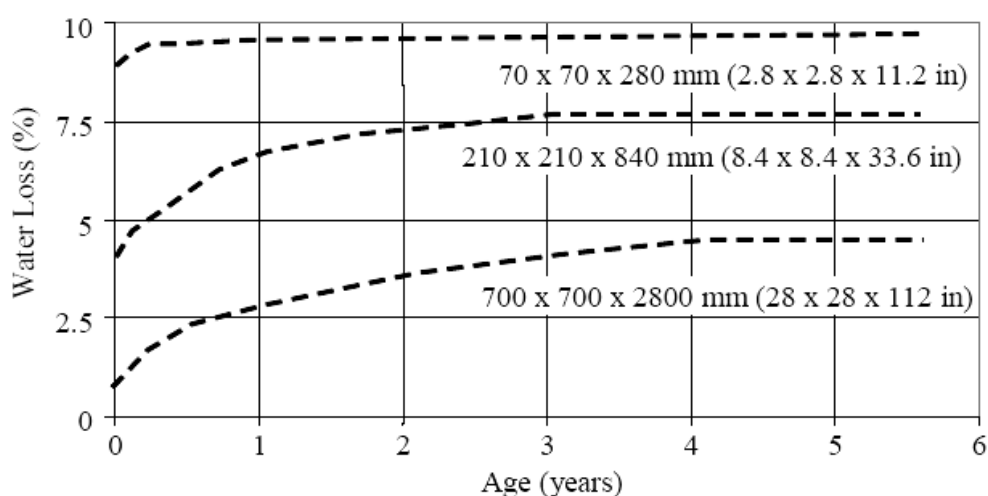


Ilustración 41, Perdida de humedad con el tiempo, para distintos tamaños de probetas

3.2.6 Retracción por Carbonatación.

Se presenta cuando queda cierta proporción de material cementante sin hidratar,

susceptible de reaccionar con el dióxido carbónico del aire, produciendo carbonato de calcio, combinación química que tiene un carácter contractivo, por lo cual el espesor de hormigón afectado por él, disminuye su volumen inicial, generándose la denominada retracción por carbonatación.

Las deformaciones por retracción de carbonatación son muy pequeñas y despreciables, en general, el espesor afectado es pequeño, alcanzando sólo un par de milímetros en la zona cercana a la superficie en contacto con el aire. Sin embargo, por el confinamiento que produce el hormigón interior adyacente, esa capa queda sometida a tensiones de tracción, pudiendo presentarse fisuración.

El punto al cual el hormigón puede reaccionar con el CO_2 es una función de la humedad relativa, a altas humedades relativas los poros cercanos a la superficie son principalmente llenos con agua, previniendo el ingreso de CO_2 y limitando la reacción.

3.3 MECANISMOS Y TEORÍAS DE LA RETRACCIÓN

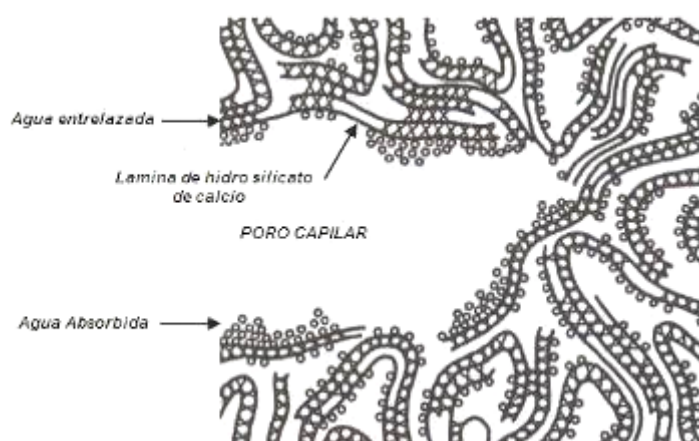


Ilustración 42, Representación del modelo de micro estructura de la pasta de cemento (Feldman 1968)

Cada uno de los mecanismos de la retracción por secado, están relacionados con la migración del agua en la pasta de cemento, el cambio en el volumen de retracción del hormigón no es el mismo para cada uno de ellos, debido a la diferencias en como firmemente el agua esta adherida a la micro estructura.

Inicialmente, el *agua capilar* es relativamente fácil de remover, la fuerza de secado requerida es inversamente proporcional al tamaño del poro. Por consiguiente primero el agua es retirada del poro grande seguido por los mayoritarios poros pequeños. [110]

Segundo, el *agua absorbida*, la cual esta físicamente adherida a la gran área superficial presente en los hidratos de silicato de calcio, las paredes del poro capilar o superficie u otro producto de hidratación tales como ettringita. Esta agua es mas difícil de remover que el agua capilar.

Tercero hay *agua entrelazada*, usualmente adherida a dos o más laminas de hidratos de silicato de calcio. El agua entrelazada es mas difícil de remover por que esta unida a dos superficies de hidratos de silicato de calcio y solo una capa de moléculas de agua.

Finalmente, hay un cuarto tipo llamada *agua químicamente adherida*, presente en cualquier producto de hidratación, esta es removida solo a altas temperaturas donde los productos de hidratación se descomponen.

La remoción de la pasta de cemento hidratado, del agua capilar, absorbida y entrelazada es incrementalmente más difícil, consecuentemente, la perdida de agua presenta una tasa decreciente con el tiempo.

Esfuerzo Capilar.

Cuando el agua es removida de los poros capilares, se crea una interfase liquido-gas que induce un esfuerzo. Esto crea un menisco en el agua (superficie

curvada) en la pared del poro. Como resultado el agua está bajo esfuerzo de tensión capilar y las paredes del poro están bajo compresión. [117]

Presión de ruptura.

Power (1965) observó que a humedad relativa por debajo del 40%, la retracción del hormigón fue mayor que la prevista por la teoría de esfuerzo capilar y concluyó que hubo otro mecanismo afectando la retracción. De hecho, si la humedad relativa es mucho menor, la fuerza de secado es bastante alta, el agua de los capilares es removida y los hidratos de silicato de calcio comenzarán a perder su agua absorbida. [118]

El agua absorbida puede tener varias capas de agua dependiendo de la humedad relativa, cuando esta decrece, el espesor del agua absorbida decrece, reduciendo la presión de ruptura. A este nivel el cambio en volumen de la pasta de cemento in confinada es fuertemente relacionada al volumen del agua removida.

Tensión superficial

Cuando la humedad relativa interna está por debajo del 50%, la presión de ruptura desaparece, la mayoría del agua absorbida ha sido removida y la energía superficial libre de los hidro-silicatos de calcio se incrementa causando extensa compresión. De hecho, hay una relación lineal entre el cambio de la energía superficial y el cambio de longitud.

El agua entrelazada puede también ser removida en una cámara térmica causando mayor cambio volumétrico que puede causar por remoción del agua absorbida, sin embargo, este cambio depende altamente de la superficie de los hidratos de silicato de calcio.

A menor superficie específica de la micro-estructura, como la que genera utilizar curado al vapor a alta presión, la retracción puede ser de 5 a 10 veces menor que la pasta similar curada en condiciones normales.

3.4 FLUENCIA

El incremento en función del tiempo de la deformación unitaria en el hormigón endurecido sujeto a esfuerzo sostenido se define como fluencia. ^[115] Ya que este incremento en la deformación puede llegar a ser grande, la fluencia es de considerable importancia en el análisis de estructuras. La fluencia en compresión ha sido investigada extensamente, aunque es muy difícil realizar estudios experimentales y predictivos debido al gran número de variables que involucra. ^[116]

La fluencia es obtenida substrayendo de la medida total de deformación en un espécimen sometido a carga, la suma de la deformación unitaria inicial instantánea (elástica), la retracción y eventual deformación térmica en un espécimen idéntico descargado el cual es sujeto a las mismas condiciones históricas de humedad relativa y temperatura.

Según varios autores los inicios de la observación del fenómeno de fluencia fue el trabajo realizado por Ira H. Woolson (1905), cuando conduce una investigación sobre una serie de cilindros de acero de 10cm. por 30cm. llenos con hormigón y posteriormente sometidos bajo diferentes niveles de carga constante, lo que daba como resultado varias deformaciones y en algunas probetas una distorsión excesiva y fue supuesto que eso terminaría como una masa polvorosa, aunque no

fue el caso, cuando las probetas fueron abiertas se constató que el hormigón había tomado exactamente la forma del tubo distorsionado y seguía siendo sólido, esto probaría que el hormigón había fluido bajo carga sostenida.

Posteriormente Hatt (1907) realiza la primera publicación sobre fluencia de hormigón reforzado, en el Proceedings of the American Society for Testing Materials, sobre vigas reforzadas, cargadas a tres puntos, Hatt observa en dos meses grandes deformaciones inelásticas bajo carga sostenida, aproximadamente el doble de la deflexión y hace referencia a fluencia bajo carga sostenida y también el efecto de cargas cíclicas sobre la deformación del hormigón.

McMillan (1915), realiza un estudio conjunto de fenómenos de fluencia y retracción.

Smith (1917) muestra que al remover la carga, el hormigón sufre una recuperación de la deformación de fluencia y elástica, separando la fluencia reversible de la irreversible.

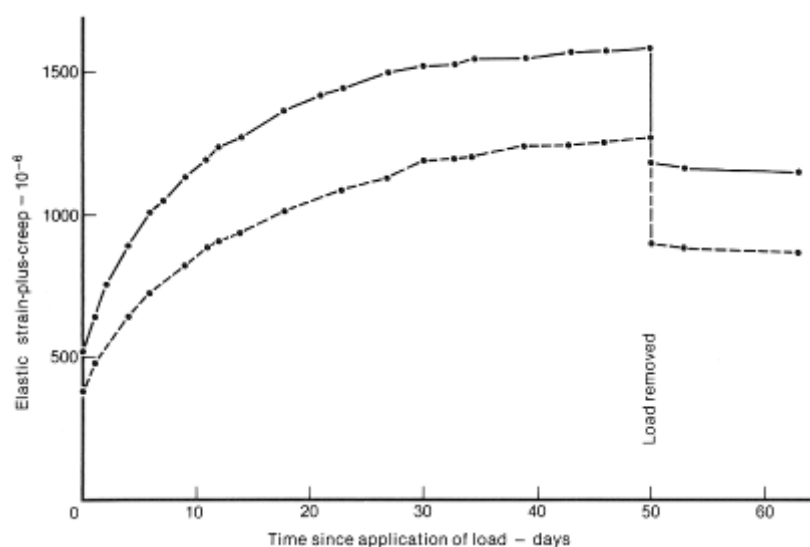


Ilustración 43, Fluencia y recuperación de fluencia, (ensayo por Smith 1917) (Neville 1970)

Ross (1937), el cual observó numerosos trabajos realizados, tomó los datos y probó para coordinar sus apuntes en estimar la magnitud de la fluencia a

cualquier tiempo bajo cualquier condición, de allí reviso tres expresiones matemáticas distintas resultantes de graficar los datos y ajustar curvas. El arreglo general fue que la fluencia tendría un valor límite finito y la única expresión que podría representarla con relativa simplicidad sería la ecuación hiperbólica, donde a y b son constantes de la curva de ajuste y c el valor de fluencia.

$$c = \frac{t}{a + bt}$$

Ecuación 16, función hiperbólica formulada por Ross que describe la fluencia

Ross también realizó algunos apuntes para permitir el entendimiento de factores que afectan la fluencia como son el esfuerzo, la relación agua cemento, humedad relativa, edad de carga, tamaño del elemento, tipo de cemento, propiedades del árido, gradación y temperatura.

Después William R. Lorman (1940) desarrolla una teoría llamada “Teoría de fluencia del hormigón” basada en trabajos de muchos autores aunque enfocada principalmente en los trabajos de Ross, utilizó la teoría de gel como su base para describir la fluencia, estableciendo que la ganancia o pérdida de agua absorbida desde el gel que se forma por hidratación del cemento Pórtland, por variación de humedad ambiental o presión sostenida, parece ser la causa de cualquier cambio en el volumen resultante y utiliza la ecuación de Ross con ligeros cambios.

$$\varepsilon_c = \frac{mt}{n + t} \cdot \sigma$$

Ecuación 17, función que describe la fluencia por Lorman

3.5 TIPOS DE FLUENCIA.

3.5.1 Fluencia Básica.

Cuando la fluencia va acompañada de pérdida de humedad, se conoce como fluencia por secado, en el caso que la fluencia ocurre sin movimientos de humedad desde o hacia el ambiente, es conocido como fluencia básica. [117]

Expresada como una deformación unitaria por unidad de esfuerzo puede conceptualizarse como una propiedad constitutiva del hormigón desde su dependencia de las características de los materiales, pero no sobre el tamaño del miembro o condiciones ambientales.

La deformación de fluencia bajo carga se produce por la reestructuración interna de la micro-estructura de la pasta de cemento, deslizamientos entre hojas de hidrosilicatos de calcio, disoluciones y precipitaciones de cristales. [118]

Bajo condiciones normales de carga donde el proceso de cargado no es instantáneo, la llamada “deformación instantánea”, está comprendido por deformación elástica y fluencia temprana.

Por tanto, una medida precisa de la fluencia básica no es posible. Por otra parte, la deformación elástica actual decrece con el tiempo por que el modulo elástico se incrementa con el desarrollo del proceso de hidratación. Consecuentemente, la fluencia básica, se define como la diferencia entre la deformación total y la elástica bajo condiciones sin secado.

Muchos autores aceptan que la fluencia bajo carga constante en condiciones que permitan el intercambio de humedad con el ambiente, será mayor que el mismo espécimen cuando es sometido a carga en condiciones sellados y posteriormente en condiciones sin carga para intercambio de humedad. En los actuales códigos

americanos la fluencia de secado y básica son generalmente agrupados, pero la retracción y fluencia no son fenómenos independientes a los cuales se puedan aplicar el principio de superposición, sin embargo desde el punto de vista práctico es común considerar que la fluencia y la retracción se pueden adicionar, un aprovechamiento que simplifica muchas aplicaciones cuando la fluencia y retracción ocurren a la vez. [119]

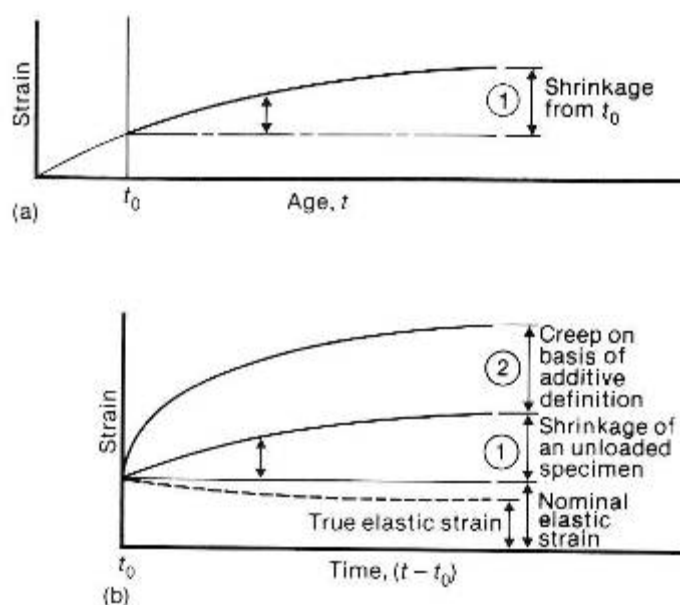


Ilustración 44, Deformaciones diferidas en el hormigón, a) retracción en un espécimen sin carga, b) deformaciones en espécimen sujeto a carga y secado (Neville 1970)

Además hay un término adicional que complica aun más la estimación real de la fluencia y es el hecho de que el módulo elástico sigue su evolución a través del tiempo, por lo cual la deformación elástica varía. Aunque este se obvia para simplificar el fenómeno.

3.5.2 Fluencia de Secado.

La fluencia por secado es el resultado de la modificación de la retracción por

aplicación de esfuerzo [119], Es decir la desecación del hormigón bajo fluencia. [120]

Algunas veces referido como el efecto Pickett, la fluencia por secado no solo depende de la características de la mezcla sino también de parámetros ambientales (humedad relativa y temperatura) y dimensiones del miembro.

La fluencia por secado es una deformación tiempo dependiente del hormigón esforzado en ambientes de secado, lo cual es exceso de fluencia básica y retracción por secado. Por lo cual el único camino para medir la fluencia por secado es medir la deformación total y por sustracción de la deformación elástica, fluencia básica y retracción (autógena y de secado).

Aunque existen propuestas del origen de este fenómeno, aun no se puede determinar de forma acertada. Opiniones apuntan a la diferencia que existe entre el valor de retracción entre probetas fisuradas y no fisuradas, otras propuestas se inclinan hacia el posible efecto de bombeo del agua al aplicar tensión que acelera el secado.

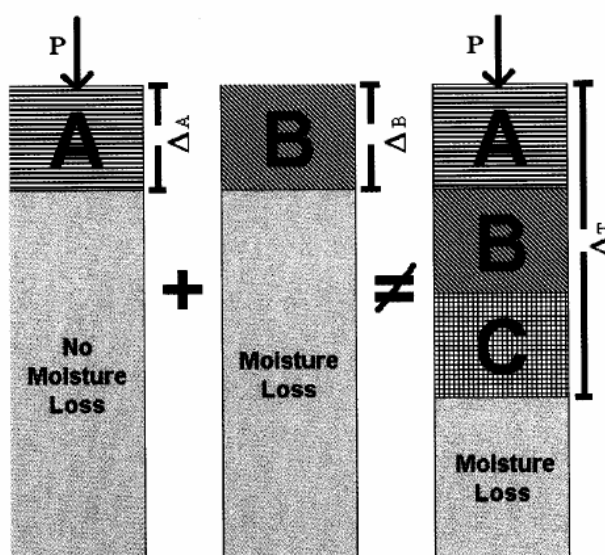


Ilustración 45, Fluencia básica, retracción y fluencia por secado

En el diagrama se muestran tres probetas de hormigón, la primera sometida a carga P y condiciones selladas, presentando una deformación Δ_A de fluencia básica, la segunda sometida a condiciones de secado presenta una deformación Δ_B de retracción y la tercera representa una probeta sometida a condiciones de secado y carga, presentando además de la deformación por fluencia básica y retracción la fluencia por secado.

3.6 MECANISMOS Y TEORÍAS DE LA FLUENCIA

Desde que la fluencia fue medida por primera vez, son muchas las teorías y mecanismos propuestos, sin embargo solo unas pocas han sido ampliamente aceptadas

Algunos mecanismos ofrecen explicación a ciertos aspectos del comportamiento de la fluencia, pero ninguno de ellos parece ser capaz de proveer una explicación convincente para la gran sensibilidad de la fluencia al intercambio de humedad.

Neville (1996) admite que aun se desconocen los mecanismos exactos de la fluencia [117].

Bazant (2001) Expresa que a pesar de los éxitos, y aunque ocupa algunas de las mejores mentes en el campo del cemento y el hormigón, el fenómeno de la fluencia y la retracción sigue aun sin entenderse totalmente [121].

Teoría del flujo plástico:

También llamada teoría plástica, establece que la fluencia del hormigón resulta de algún flujo cristalino, como ocurre en los metales más allá del punto de cedencia.

No obstante, la deformación plástica presenta un umbral inferior en que el flujo plástico no ocurre, aunque Jensen (1938) reportaba que el hormigón y especialmente la pasta de cemento presentan fluencia a esfuerzos tan bajos como el 1% de la resistencia última ^[122], así que el umbral no existe en el hormigón.

Ali & Kesler (1964) concluye que la deformación plástica no es proporcional a la tensión aplicada ni se relaciona con los cambios de humedad como la fluencia en el hormigón ^[123]. Por consiguiente, si el flujo plástico contribuye a la fluencia del hormigón, lo hace a esfuerzos cercanos a la resistencia última.

Teoría del flujo viscoso

Thomas (1937) establece que la pasta de cemento es un fluido con una alta viscosidad que fluye bajo carga ^[124]. Puesto que la carga es transmitida gradualmente a los áridos, los cuales típicamente no fluyen, la tasa de flujo va decreciendo. ^[125]

Incluso aunque esta teoría explica la ausencia de un umbral de esfuerzo para fluir y representa bien la dependencia de la tensión de la fluencia, no predice alguna recuperación de fluencia ^[123].

Lo que sugirió que la teoría de la viscosidad no pueda ser fiable para toda la fluencia observada, es que el flujo viscoso requiere volumen constante y no es el caso del hormigón. ^[126]

Teoría de la filtración

Esta teoría establece que la fluencia en el hormigón es debido a la filtración del agua desde las capas físicamente absorbidas a capilares vacíos ^[127]. El esfuerzo aplicado incrementa la presión de vapor del agua físicamente absorbida y al

restablecer el equilibrio con las condiciones externas, el agua es expulsada desde las superficies de los hidratos de silicato de calcio a los poros capilares ^[128]. Un decrecimiento del contenido de agua en los hidratos de silicato de calcio, resulta en cambios de volumen. La pasta de cemento experimentando fluencia comienza a ser exprimida progresivamente y la tensión incrementa en los áridos y decrece en la pasta. Cuando el agua es expulsada de la superficie de los hidrosilicatos de calcio, se vuelve incrementalmente más difícil de remover.

Davis (1934) expresa que esta teoría puede explicar la fluencia básica y de secado. Por ejemplo, bajo intercambio nulo de humedad con el ambiente, el agua expulsada de los hidrosilicatos de calcio puede migrar hacia poros capilares o incluso poros de los áridos. ^[129] Por otro lado, bajo condiciones de pérdida de humedad, al agua evaporada de los lados de los capilares expuestos al aire, produce esfuerzos de tensión que tiran del agua de las superficies de los hidrosilicatos de calcio. Esto predice adecuadamente un incremento en la fluencia con un decrecimiento en la humedad relativa.

El esfuerzo de tensión causa un decrecimiento en la presión de vapor transformando agua libre capilar en agua absorbida. Esto debería restaurar el equilibrio de presión con la micro-estructura de la pasta de cemento y causaría expansión.

Los detractores de esta teoría establecen que la pérdida de humedad en un espécimen bajo carga debería ser mayor que la de un espécimen no cargado. El hecho que tal diferencia de pérdida de peso no se presentara normalmente fue usado para oponerse a la teoría de filtración. Sin embargo, Neville (1955) reporto la pérdida de agua absorbida sin ocurrencia de movimiento de agua al ambiente. ^[126]

Un posible problema de esta teoría es que bajo descarga, la presión de vapor en las superficies de los hidrosilicatos de calcio decrece y el agua absorbida debería

ser restaurada, implicando una total recuperación de fluencia después de la descarga y que no sucede en el hormigón [130]. Una posible explicación de esta inconsistencia podría ser la formación de nuevas uniones entre hidrosilicatos de calcio que prevendrían la rehidratación total.

Elasticidad tardía

También referida como visco elasticidad, esta apoyada sobre dos componentes del modelo de la micro-estructura de la pasta de cemento. El primer componente es una estructura elástica compuesta de hidratos cristalinos mientras el segundo componente es una porción viscosa que contiene la fase no cristalina con agua absorbida. Cuando el elemento es cargado, el componente elástico y viscoso toman la carga en proporción con su respectiva rigidez, La fase viscosa se deforma progresivamente transfiriendo su porción de la carga a la estructura elástica que se deforma elásticamente incluso después del cargado mostrando un comportamiento elástico tardío.

Ali & Kesler (1964) Enuncia que tales mecanismos no ofrecen una explicación satisfactoria al papel del intercambio de humedad en la fluencia [123]. Además de fallar para predecir la fluencia irrecuperable tras la descarga que es el caso del hormigón.

Efecto de micro agrietamiento

Este mecanismo fue propuesto para explicar la no linealidad en el esfuerzo-deformación del hormigón relacionada por la presencia de la zona interfacial ITZ entre el árido y la pasta [131].

Esta ITZ es considerada la región mas débil en el hormigón, pues la porosidad y densidad de las micro grietas tiende a ser mayor que en la mayoría de la pasta.

Esto explicaría que la fluencia se incrementa bajo condiciones de secado, pues se genera micro agrietamiento por la retracción de secado.

Basado en esta teoría es posible explicar la deformación residual después de la descarga por la propagación de micro-grietas preexistentes. En adición a la deformación permanente en grietas, es posible también la formación de nuevas adherencias entre hidrosilicatos de calcio, en el mismo camino que se presenta en la teoría de filtrado.

Teoría de solidificación

Esta teoría busca explicar el comportamiento de envejecido de la fluencia en hormigón, establece que el decrecimiento de la tasa de fluencia del hormigón con el tiempo bajo carga, es debido a la formación de nuevos productos de hidratación dentro de los micro-poros de la pasta de cemento. Este incremento en el volumen de los productos de hidratación sería capaz de llevar la carga al decrecimiento del esfuerzo global que causa la fluencia.

Una deficiencia de esta teoría es que no explica el papel del agua y el incremento en la fluencia durante el secado, además que el incremento en el volumen de los productos de hidratación no debería ser significativo después de un mes mientras, mientras los cambios en las curvas de fluencia son notables después de varios años.

Teoría de micropresfuerzo-solidificación

Una extensión de la teoría de solidificación establece que en adición, el efecto de envejecimiento de la fluencia es conducido por múltiple rotura de la adherencia interatómica en los lugares sobreesforzados. Tal sobreesfuerzo es debido al

impedimento de la difusión del agua absorbida a los poros capilares.

Esta microdifusión es proporcional a la humedad relativa en los poros capilares y acelera el proceso de ruptura de la adherencia entre los hidrosilicatos de calcio, con esto, el esfuerzo decrece en el lugar de la ruptura pero se incrementa en la vecindad, estos nuevos sitios de sobreesfuerzo probablemente experimenten fluencia y un eventual agotamiento de sobreesfuerzo en esos sitios causa el declive de la tasa de fluencia.

3.7 FACTORES QUE AFECTAN LA FLUENCIA.

La fluencia es principalmente influenciada por factores como: proporción áridos/pasta de cemento, características de los áridos, contenido de agua y cemento, edad de carga, tipo de curado, condiciones de almacenaje, cantidad y tipo de adiciones químicas y minerales y relación tensión/resistencia [117].

El cemento juega un papel muy importante ya que la fluencia ocurre en la pasta de cemento hidratada que rodea los áridos, depende de las propiedades físicas y químicas del cemento y de la cantidad de pasta.

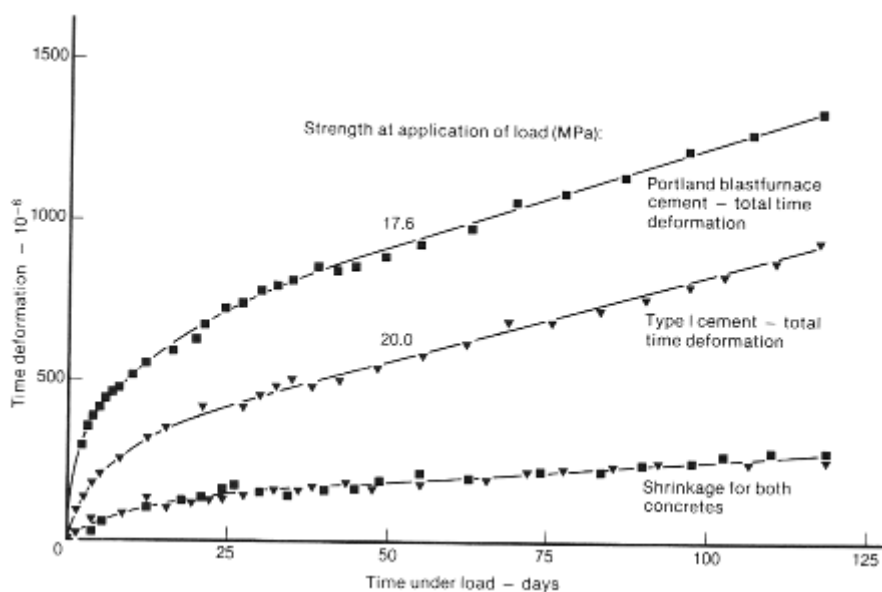


Ilustración 46, Fluencia y retracción de hormigón de cemento Portland y con escoria (ensayo de Ross 1938) (Neville 1970)

Ross (1938) estudia profundamente el hormigón con escorias y advierte el aumento en la deformación total diferida no obstante la retracción no parece verse afectada.

Chern (1989) En mezclas de hormigón, en el que el cemento Portland es remplazado parcialmente por cemento de escorias de alto horno, aumenta la fluencia por secado, aunque disminuye la fluencia básica.^[103]

Neville (1983) observa que los cementos de endurecimiento rápido, como el Portland tipo III tiende a minimizar la fluencia puesto que la matriz adquiere más rigidez antes de la aplicación de la carga.^[125]

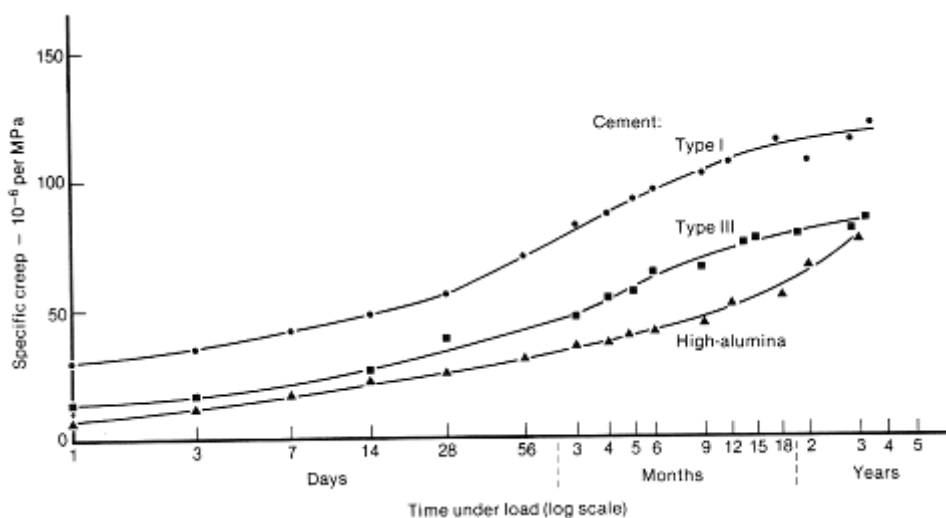


Ilustración 47, Fluencia específica de hormigón con diferentes cementos (ensayo de Hummel 1959, Neville 1970)

Wiegrink (1996) Observa que el incremento de humo de sílice, fundamentalmente utilizado en mezclas de hormigones de alta resistencia hace decrecer el valor de fluencia específica [132].

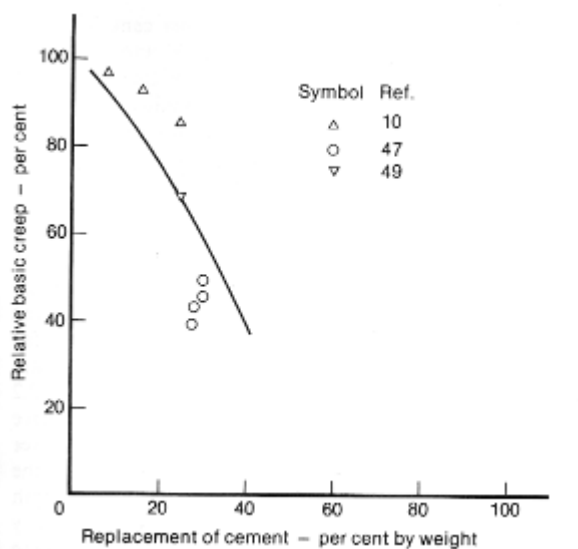


Ilustración 48, Influencia de la sustitución de cemento por ceniza volante sobre la fluencia del hormigón (ensayo por Bamforth 1980) (Neville 1983)

Los cementos con alto contenido de alumina muestran un comportamiento único, mientras en los demás cementos la tasa de fluencia decrece en el tiempo y

eventualmente se aproxima a ser constante, en este va hacia un periodo de fluencia lineal que empieza a los seis meses después de la carga y el tiempo para que la tasa de fluencia se vuelva constante es mayor [119].

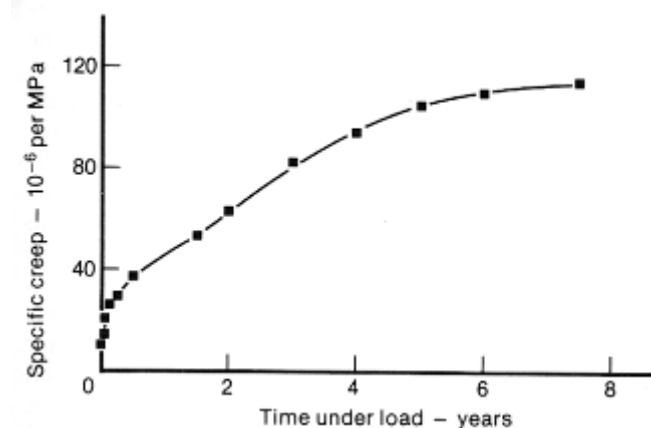


Ilustración 49, Fluencia específica, hormigón de cemento con alto contenido aluminoso (ensayo por Glanville 1939) (Neville 1970)

La finura del cemento es otra característica que afecta la fluencia, aunque de una forma difícil de explicar, pues para hormigón de cemento Portland, la mayor finura del cemento aumenta las deformaciones de fluencia, al utilizar cemento tipo IV de bajo calor de hidratación, disminuye cuando se utiliza cemento mas fino.

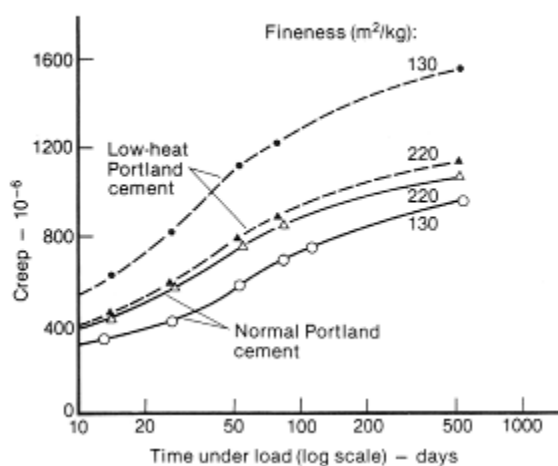


Ilustración 50, Influencia de la finura del cemento en la fluencia del hormigón (ensayo por Davis 1937, (Neville 1970)

Los cementos expansivos tienen un comportamiento especial al aumentar la fluencia específica en edades tempranas. Hormigones curados en agua con mayor contenido de cemento expansivo, muestran un incremento de fluencia específica, mientras que en entornos de secado, la tasa de fluencia específica disminuye y alcanzan menores deformaciones por fluencia.

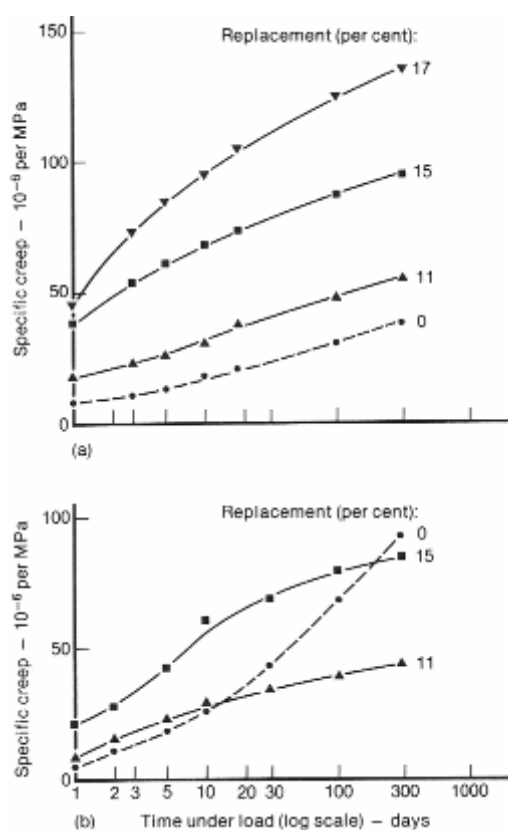


Ilustración 51, Fluencia de hormigón de cemento expansivo a varios niveles de sustitución

a) Agua 20°, b) 20°- 50% HR (ensayo por Nagataky 1972) (Neville 1983)

Alexander (1996) enuncia que otra factor importante que afecta la fluencia del hormigón es el contenido de áridos ya que son estos los que se encargan de restringir las deformaciones y sus características como el tamaño, la rigidez, la absorción y la textura superficial pueden afectar en buena proporción no solo el comportamiento instantáneo sino además el diferido.^[133] Sugiere que el efecto de

restricción de los áridos sobre la pasta de cemento es independiente de si la deformación es debido a retracción o fluencia.^[134]

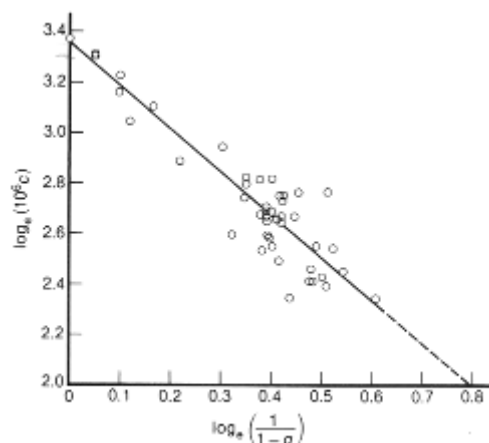


Ilustración 52, Relación fluencia (c) – contenido de árido (g) (Neville 1964)

Neville (1964), presenta una relación entre el contenido de árido y la fluencia, (expresión de Pickett modificada), el efecto de restricción del árido "α" disminuye con el incremento de la edad de carga y se incrementa con el incremento del tiempo bajo.^[119]

El contenido de áridos y el contenido de pasta son complementarios y aunque se pueda pensar que un estudio es equivalente al otro, estudios demuestran resultados conflictivos.

Jensen (1938), con ensayos a corto tiempo mostró que la fluencia de un hormigón con áridos calizos tuvo 60% mas fluencia que un hormigón hecho con arena y grava de río al cargarlos a la misma proporción de su resistencia ultima.

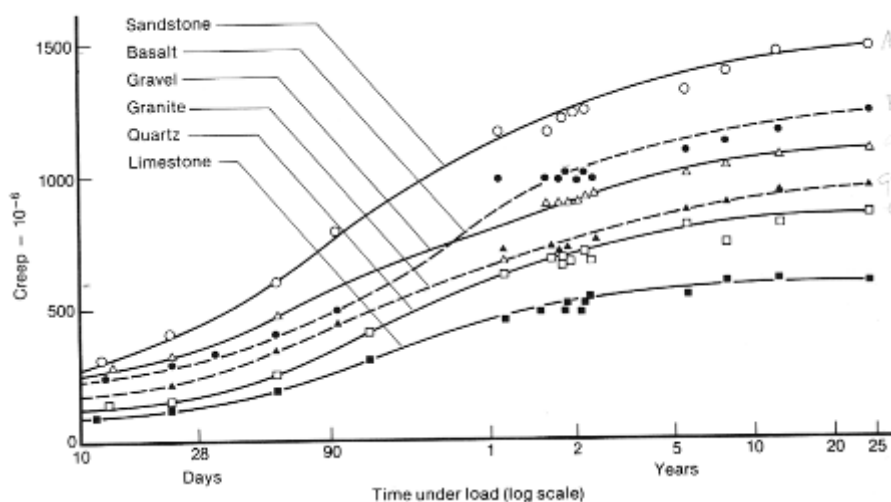


Ilustración 53, Fluencia de hormigón con diferentes tipos de áridos (ensayo por Troxell 1958) (Neville 1970)

Probablemente fue Troxell et al (1958), los primeros en estudiar la influencia de las características mineralógicas de los áridos sobre la fluencia. En su estudio con resultados después de 20 años a 50% de humedad relativa y tensión de 5,5 Mpa, muestra como un hormigón con arenisca, presenta una fluencia 2,5 veces la fluencia de un hormigón con áridos calizos.

Kordina (1960), presentó un estudio que apoyaba los resultados de Troxell y concluye que los altos valores de fluencia que presenta el hormigón con arenisca, depende de la alta tasa de fluencia que presentan en las primeras 24 horas, y además que estas tasas se conservan por casi un año.^[125]

La absorción del árido está relacionada con la rigidez del árido como presenta Kordina (1960).

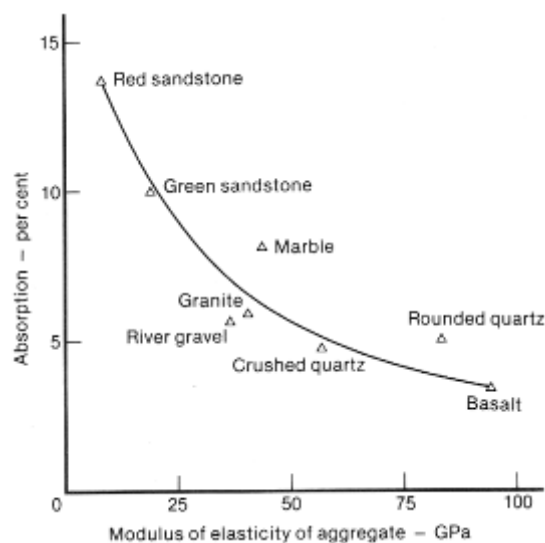


Ilustración 54, Relación entre la absorción y la rigidez del árido (Kordina 1960) (Neville 1983)

Neville (1964), ya indicaba que la porosidad tenía influencia sobre la fluencia. Los áridos con mayor porosidad presentan generalmente una menor rigidez y por otro lado mayor absorción, por otro lado la absorción juega un papel importante en los movimientos adicionales de humedad en el hormigón, que generalmente se relaciona con la humedad.

Estas relaciones son apoyadas en estudios de Kordina (1960) y la Concrete Society (1973). El fenómeno es acrecentado cuando los áridos no son totalmente saturados durante la mezcla.^[125]

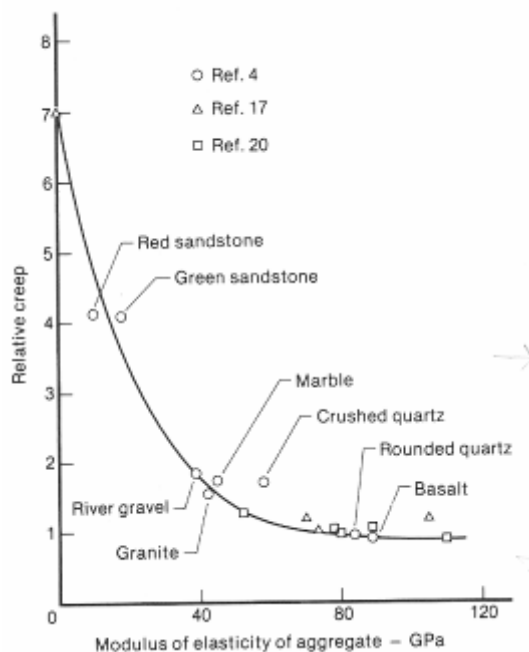


Ilustración 55, efecto del módulo elástico del árido, sobre la relativa fluencia del hormigón (1 para árido con módulo elástico 69 GPa) (Paper, Concrete society 1973) (Neville 1983)

Collins (1989) observa que otro factor influyente en la fluencia es el tamaño de los áridos utilizados, con un árido tamaño máximo 32 mm experimenta 15% menos fluencia después de 90 días que mezclas con árido de tamaño máximo 20 mm [108]. Alexander (1996) analizando la influencia de 23 tipos de áridos gruesos sobre las propiedades del hormigón, particularmente las propiedades de deformación y concluyo que son principalmente la demanda de agua rigidez e interaccion pasta/árido las que mas influyen.[132]

La relación agua cemento es el parámetro mas dominante con respecto a las proporciones de mezcla, determinando las características de fluencia del hormigón.

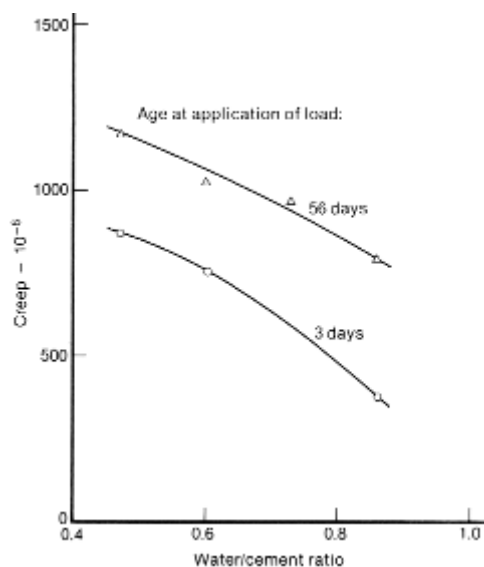


Ilustración 56, Efecto de la relación agua/cemento sobre la fluencia (Neville 1970)

Este comportamiento es explicado en la evolución de la resistencia a compresión del hormigón y la resistencia alcanzada a la edad de carga, por tanto Neville presenta un ajuste realizado a diferentes ensayos, ajustado la curva a un contenido de pasta de cemento de 0,2 con la fluencia expresada como una fracción de la fluencia a relación a/c de 0,65.

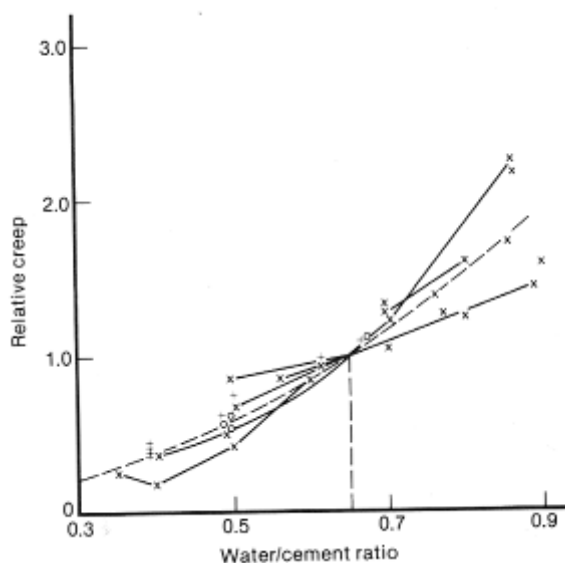


Ilustración 57, Relación entre a/c y la fluencia, curva ajustada al contenido de pasta (Neville 1970)

A bajas relaciones agua cemento el volumen de hidratos es reducido con el contenido de agua libre, por este medio reduciendo las deformaciones de fluencia.

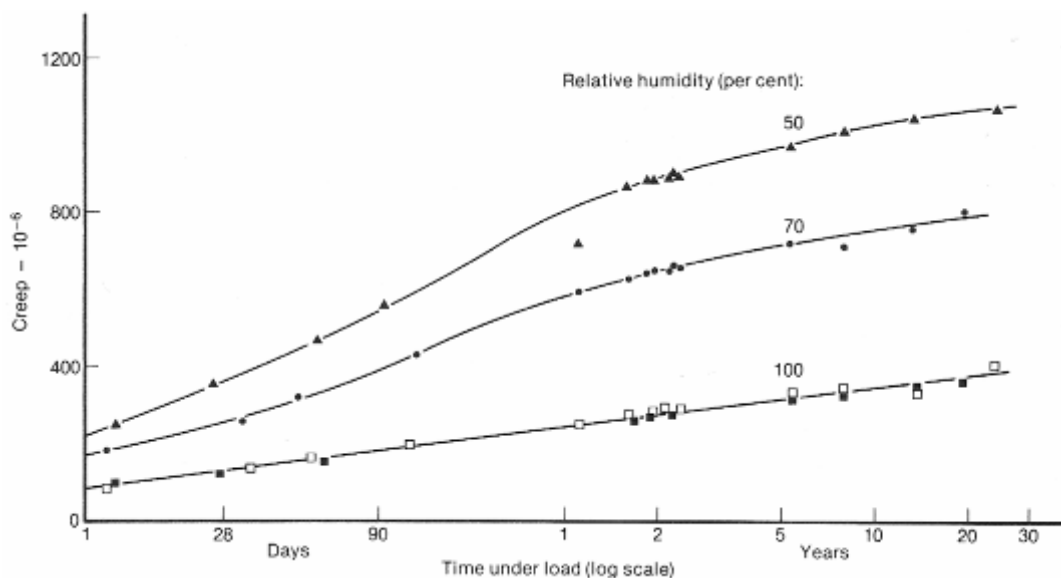


Ilustración 58, Influencia de la humedad relativa sobre la fluencia del hormigón (ensayos de Troxel 1958) (Neville 1970)

La humedad relativa media del entorno tiene una gran influencia sobre la magnitud de la fluencia, afectando directamente sobre el secado del hormigón bajo carga, la cantidad de humedad presente en el hormigón depende tanto la extensión de secado antes de la carga como a través del tiempo.

Troxel (1958) observó como para una humedad relativa del 50% la fluencia en el hormigón podía ser de 2 a 3 veces mayor que la de un hormigón a humedad relativa 100%. Además observó que a partir de un año las curvas se hacían paralelas, cuando el equilibrio hídrico entre el hormigón y el ambiente la tasa de fluencia entre los hormigones era la misma, debida a fluencia básica.

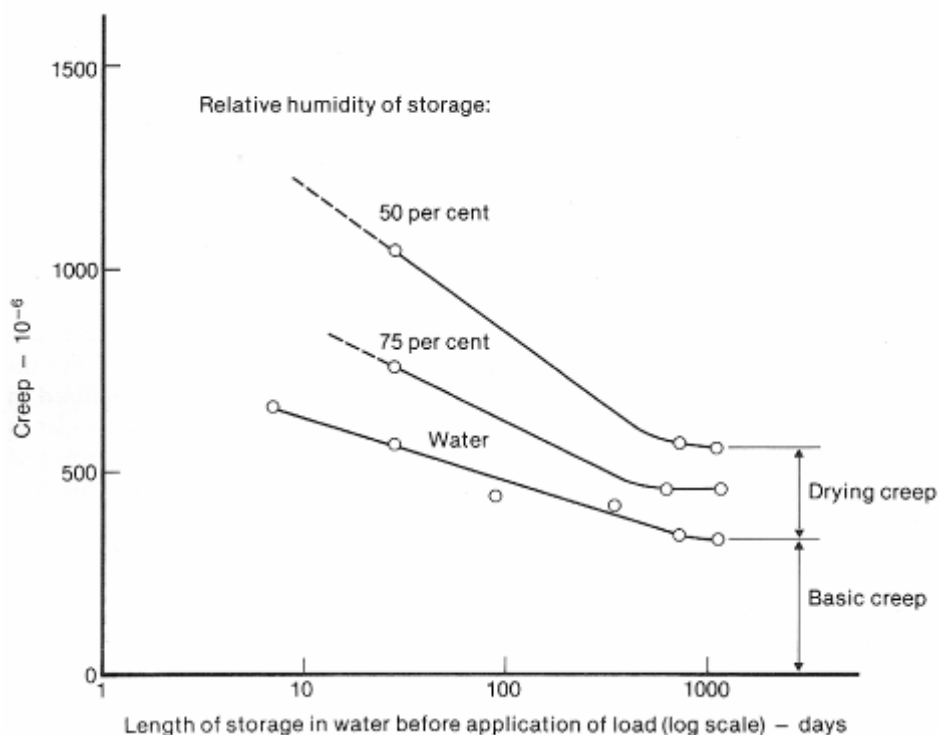


Ilustración 59, Influencia sobre la fluencia del hormigón, del tiempo de curado en agua antes de la aplicación de la carga (ensayos de L'Hermitte 1965) (Neville 1970)

L'Hermitte (1965) reportó un estudio, sobre la influencia de la duración del curado en agua y concluyó que este efecto cesaba alrededor de los 600 días, y posteriormente la fluencia dependía de la humedad del ambiente bajo carga.

Los elementos curados en ambiente húmedo presentan una menor fluencia y comportamientos similares aun con distinta dosificación, mientras que los elementos curados al aire, soportan mayor temperatura y menor humedad, que incrementa la porosidad y fisuración interna contribuyendo a la fluencia.

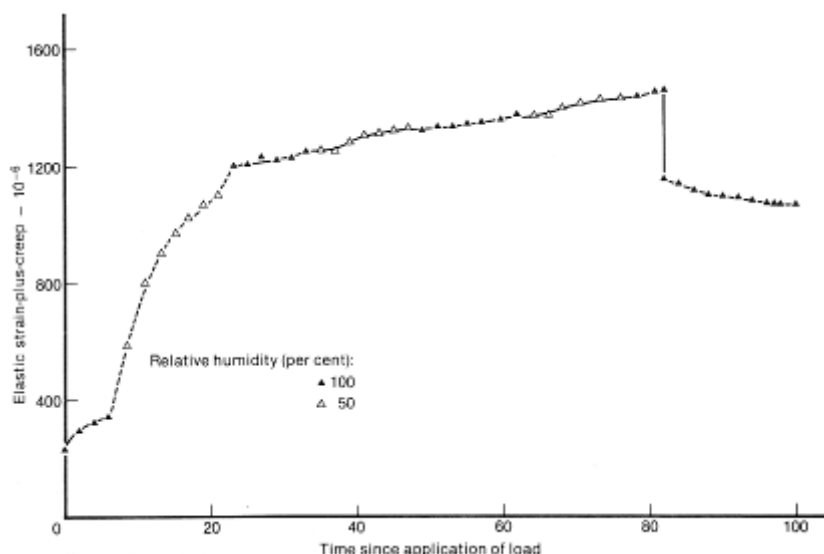


Ilustración 60, Efecto de la variación de humedad sobre la fluencia del hormigón (ensayo de Al-Alusi 1978) (Neville 1983)

En ensayos de Al-Alusi (1978) se confirma que el incremento en la fluencia es principalmente debido al primer secado, alternando en ciclos de humedad relativa de 50% y 100%, además observo que a partir del tercer ciclo de cambio de humedad el incremento de fluencia fue insignificante.

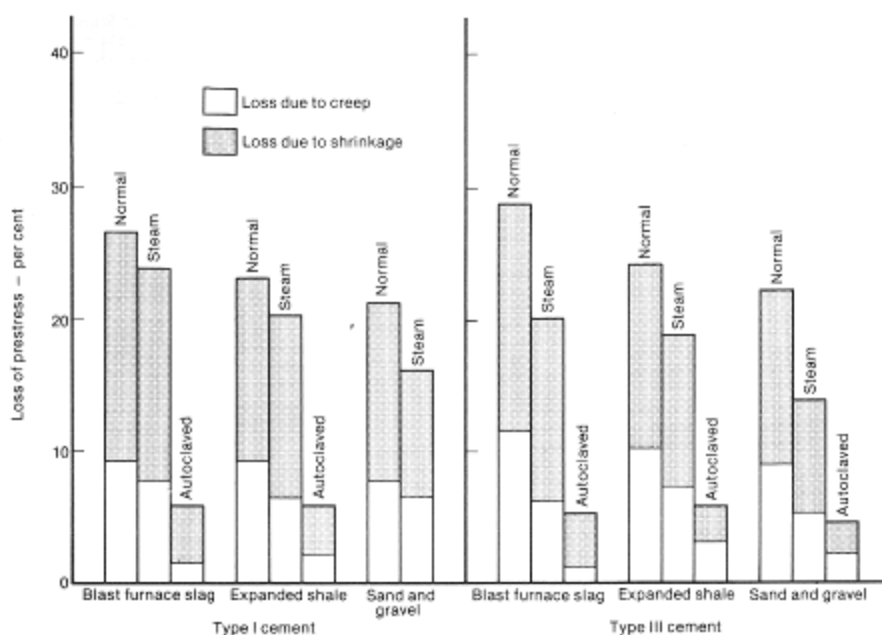


Ilustración 61, Perdidas de pretensado de hormigón con diferentes áridos, cementos y condiciones de curado (ensayos de Hanson 1964) (Neville 1970)

Puesto que la fluencia y la retracción son de gran interés en hormigón pretensado, es de gran utilidad los resultados de Hanson (1964) de pérdidas de pretensado después de 3 años bajo carga, en estos ensayos observo que la fluencia se reduce cuando los hormigones son sometidos a un curado al vapor y se reduce aun mas cuando se somete a proceso de curado en autoclave.

Brooks (1996) expresa como las condiciones de curado pueden afectar altamente el comportamiento de la fluencia del hormigón, para curado al vapor la fluencia puede reducirse hasta un 50% comparado con un hormigón en curado húmedo estándar [135]. Debido a la acelerada hidratación del cemento y la pérdida de humedad que ocurre cuando el elemento es transferido a un ambiente fresco y de secado.

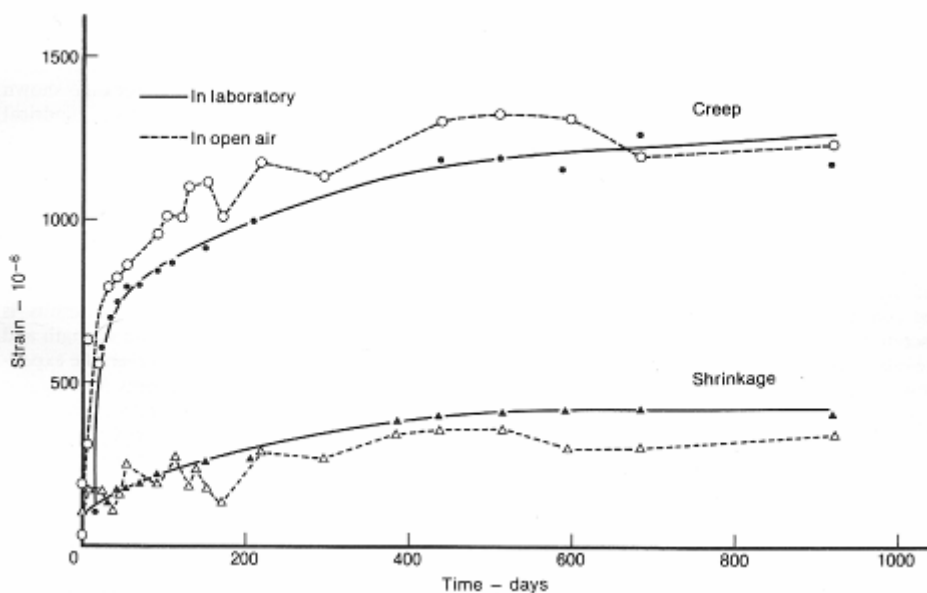


Ilustración 62, Fluencia de hormigón al aire libre y en laboratorio a 50% de humedad (Ensayo de L'Hermitte 1968) (Neville 1970)

Los resultados del estudio de l'Hermitte y Mamillan (1968) muestran el comportamiento de hormigón expuesto a variaciones de humedad relativa al aire libre de entre 60% y 90% pero protegido de lluvia, los cuales no presentan diferencias notables con la deformación por fluencia sufrida en condiciones del 50% de humedad constante.

Esto podría explicarse en los ambientes cíclicos, en los cuales las temperaturas altas generalmente son acompañadas de humedades altas.

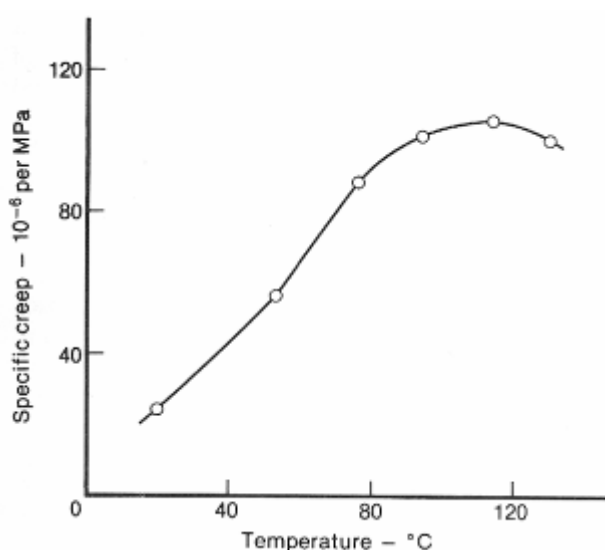


Ilustración 63, Influencia de la temperatura sobre la fluencia específica (Neville 1970)

Estudios de Nasser y Neville (1967) y posterior, indica una aparente fluencia específica máxima alrededor de 100°C, además del aumento en las deformaciones por fluencia a causa de la temperatura.

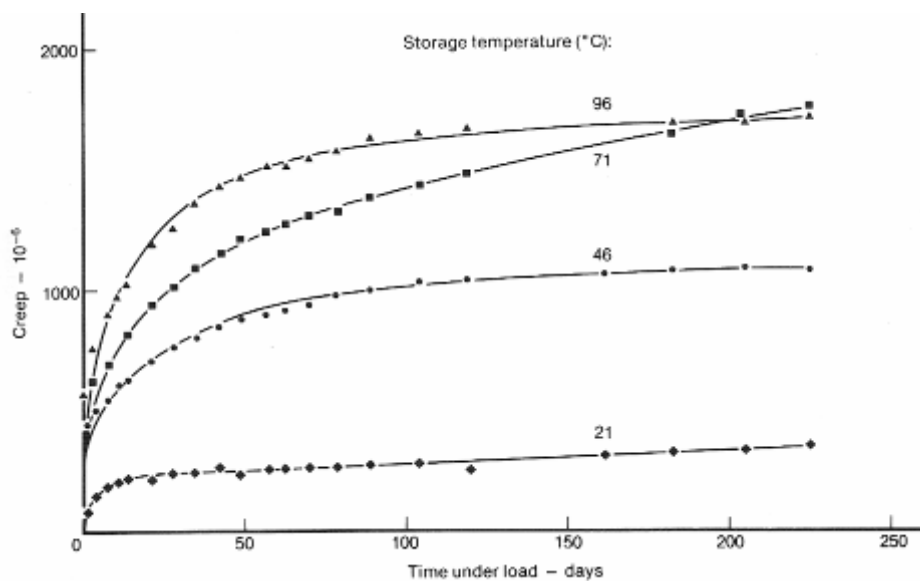


Ilustración 64, Relación entre la fluencia y la temperatura (Neville 1983)

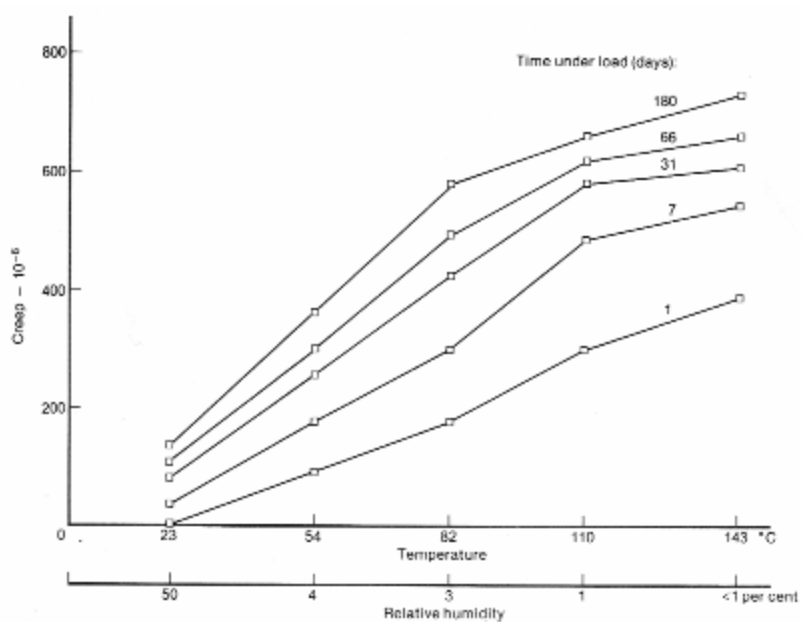


Ilustración 65, Influencia de temperatura y duración de la carga sobre la fluencia del hormigón (ensayo de Hickey 1967) (Neville 1983)

Hickey en (1967) en un estudio en el cual un hormigón fue curado por un mes en ambiente húmedo y un mes en 50% de humedad, posteriormente cargado y calentado lentamente hasta la temperatura deseada, presenta resultados en los

cuales no se indica una gran influencia de la humedad relativa sobre la deformación por fluencia.

La fluencia es altamente sensible al nivel de esfuerzo aplicado, para niveles de carga superiores al 75% de la resistencia a compresión, se presentan micro fisuras en la interfase pasta-árido que llevan a la rotura [98]. La deformación por fluencia es proporcional al nivel de esfuerzo hasta un cierto límite de proporcionalidad, el cual se encuentra entre el 45% para hormigones de resistencia baja y normal y 65% para hormigones de alta resistencia.[102]

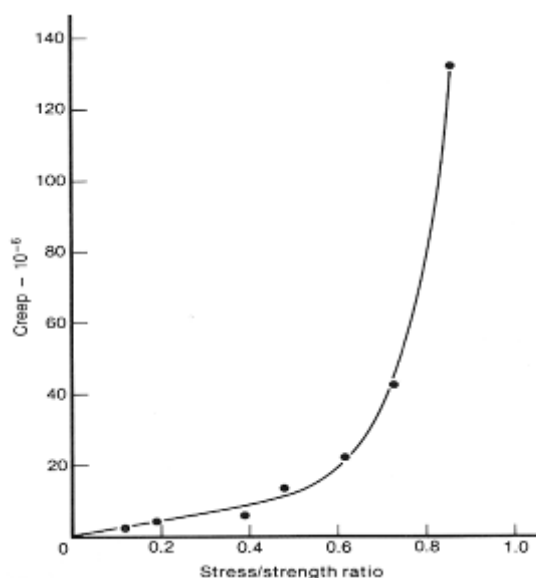


Ilustración 66, Relación fluencia (1 min.), tensión/resistencia, t_0 5 días (Jones y Richart 1936)(Neville 1970)

La edad de puesta en carga también desempeña un papel importante en el desarrollo de las deformaciones por fluencia, ajustando la curva a la deformación sufrida en el hormigón al ser cargado a la edad de 7 días, presenta una disminución en la deformación por fluencia mayor al 50%, cuando este es cargado a edades superiores a 300 días.

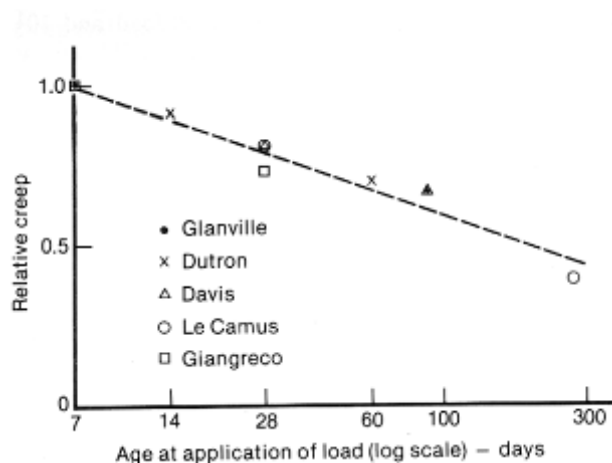


Ilustración 67, Influencia de la edad de aplicación de carga sobre la fluencia (Neville 1970)

Esto es explicado por la gran deformación que sufre el hormigón a edades tempranas a causa del secado.

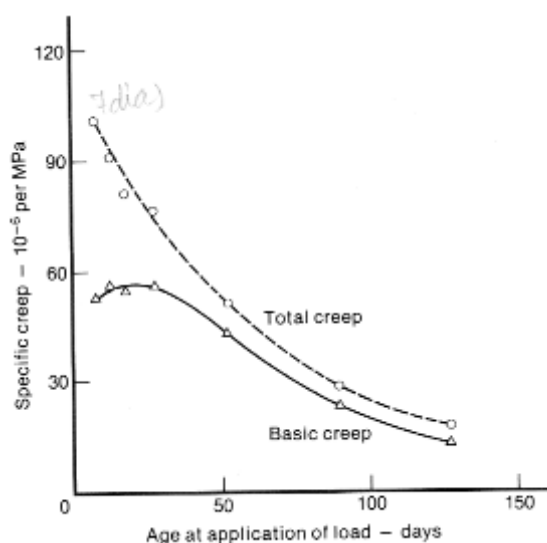


Ilustración 68, fluencia específica básica y total de hormigón cargado a distintas edades (Niyogi 1973) (Neville 1983)

En los resultados de Niyogi (1973) de tensiones a edades de carga diferentes, en forma de fluencia específica, se observa que mientras la fluencia básica se incrementa con cargar a edades tempranas, la fluencia total es inalterada.

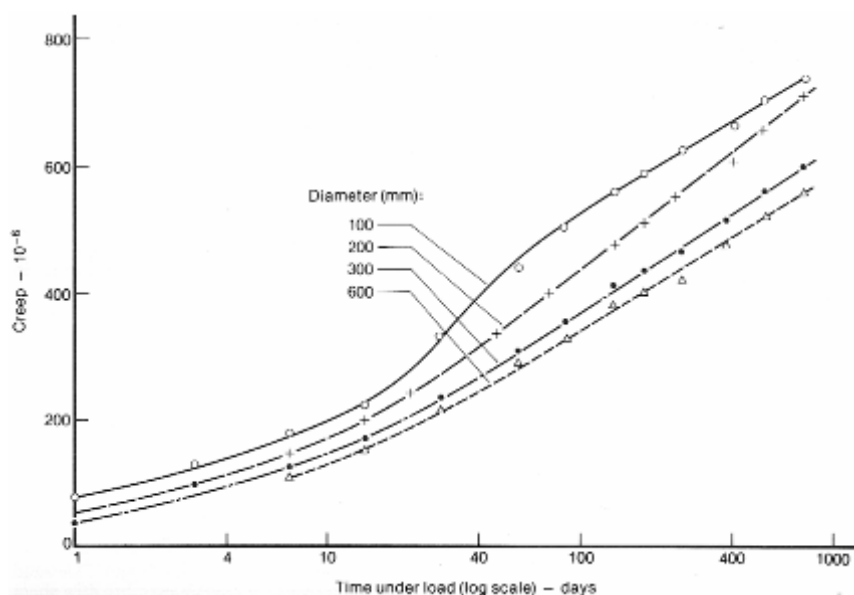


Ilustración 69, Influencia del tamaño del elemento en la fluencia de hormigón (ensayo de Weil 1959) (Neville 1970)

Otro factor a tener en cuenta es el tamaño de los elementos sometidos a carga, ya que muchos investigadores indican la influencia que este tiene sobre la fluencia, decreciendo con el incremento en el tamaño del elemento, aunque para espesores superiores a 900 mm el efecto es despreciable.

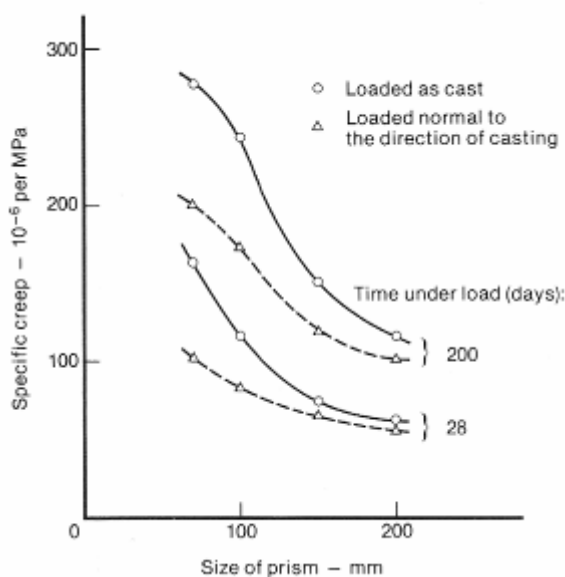


Ilustración 70, Influencia de la anisotropía sobre la fluencia específica del hormigón (ensayo de Karapetian 1964) (Neville 1970)

Weil (1959), muestra que los efectos del espesor del elemento sobre la fluencia incrementan durante los primeros 60 días y de ahí en adelante permanece constante. L'Hermite y Mamillan (1968) indicaron que la relación en fluencia de especímenes de dos tamaños es constante entre 100 y 1000 días bajo carga.

Resultados de Kapetian (1964), indican que la fluencia es mayor en especímenes sujetos a carga en la dirección de hormigonado que en la dirección normal, esto explicado en la mayor resistencia y modulo elástico de los elementos en dirección normal a la puesta del hormigón.

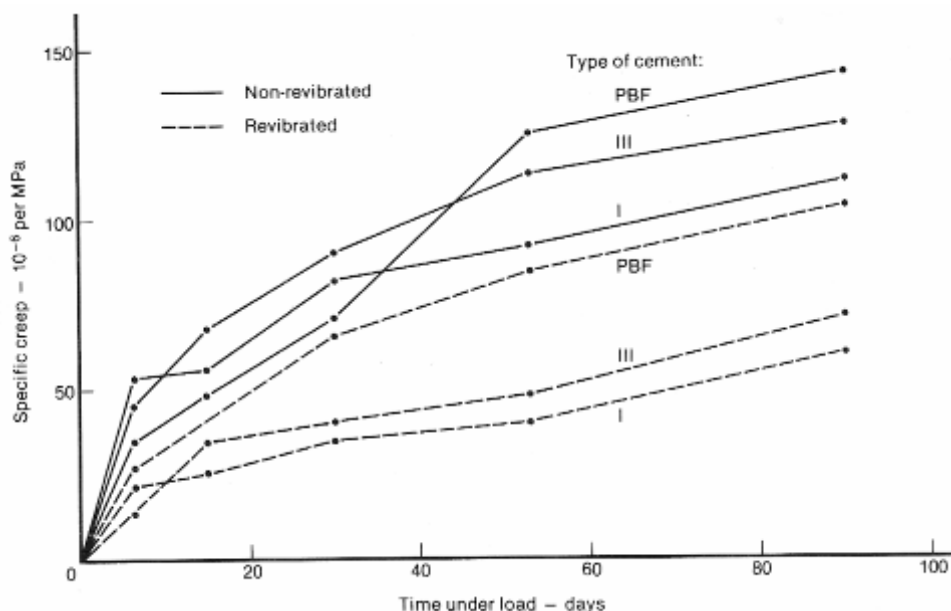


Ilustración 71, Influencia del vibrado sobre la fluencia del hormigón (ensayos de Avram 1967) (Neville 1970)

Los ensayos realizados por Avram (1967) muestran que la revibración de la pasta de cemento reduce entre un 30% y 50% en el caso de cemento Portland y de 15 a 20% cuando se utiliza cemento Portland con escorias. Como apunta Avram, la revibración remueve las tensiones internas inducidas por retracción temprana además otro factor importante es el aumento de resistencia por medio de el revibrado.

3.8 RELACIÓN DEFORMACIÓN - TIEMPO

Neville, (1970) define, La curva deformación-tiempo de cualquier material sujeto a fluencia, describiendo tres zonas distinguibles: la fluencia primaria que consta de la deflexión inicial elástica y el decrecimiento de la tasa de fluencia con el tiempo, la zona de fluencia secundaria o fluencia estacionaria, que muestra un continuo incremento de la fluencia en el tiempo y la zona de fluencia terciaria o no lineal, que puede o no existir dependiendo si hay un incremento del esfuerzo, lo que puede ocurrir en hormigón debido a micro-agrietamiento, a altas tensiones y produciendo el fallo.

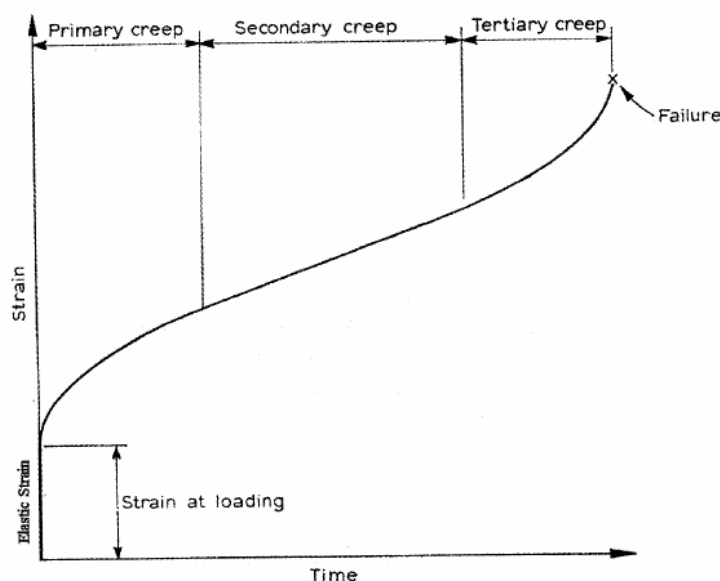


Ilustración 72, Forma general de la curva deformación-tiempo para un material sujeto a fluencia (Neville 1983)

Para niveles de tensión normales en el hormigón, rango típico entre 25 - 40% de la resistencia la fluencia primaria no es distinguible de la secundaria y la terciaria no existe.

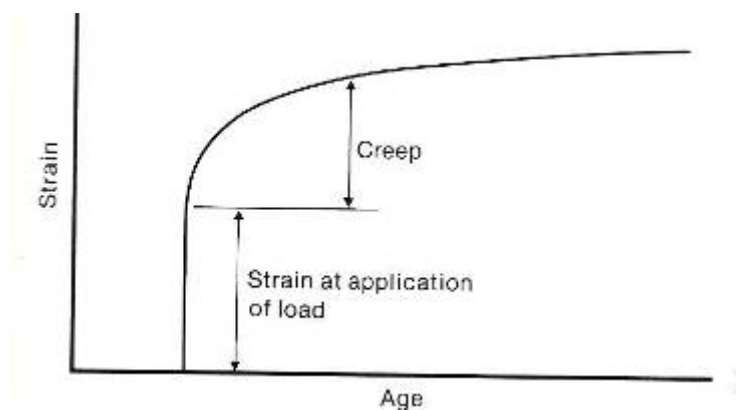


Ilustración 73, Forma general de la curva deformación-tiempo para hormigón sujeto a niveles normales de tensión sostenida (Neville 1983)

3.9 RELAJACIÓN

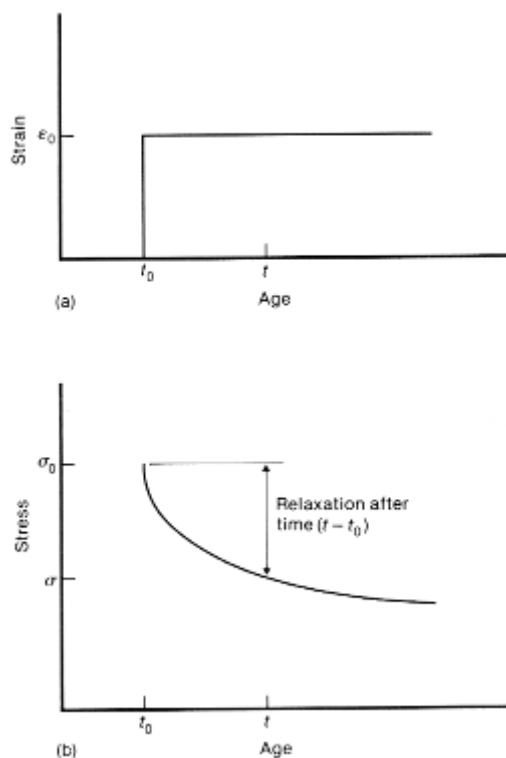


Ilustración 74, Relajación a deformación constante (Neville 1970)

Bajo circunstancias en las cuales la deformación del hormigón es mantenida constante, la manifestación de la fluencia es una disminución de la tensión, por tanto estas dos se consideran conectadas matemáticamente y razonadas proporcionales a la relación tensión /resistencia aunque se estima que la relajación posee un desarrollo mas rápido.

3.10 RECUPERACIÓN DE FLUENCIA

Hay cuatro tipos de deformación, que se presentan en el hormigón bajo carga.

- Elástica: deformación instantánea recuperable.
- Plástica: deformación instantánea irrecuperable
- Elástica tardía: deformación tiempo dependiente recuperable.
- Viscosa: deformación tiempo dependiente irrecuperable.

Los últimos dos tipos son considerados causantes de fluencia en hormigón.

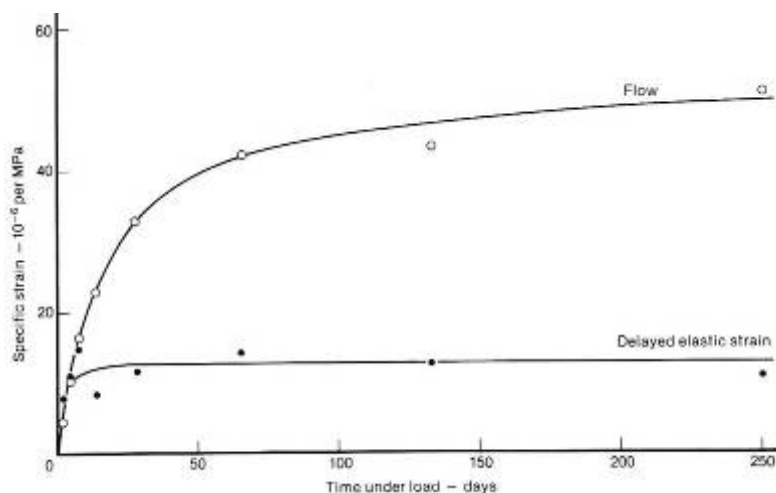


Ilustración 75, elástica tardía y flujo, componentes de la fluencia. (Neville 1970)

La deformación elástica es usualmente asociada con la energía almacenada en los

cristales o moléculas que es totalmente recuperable. La deformación plástica ocurre cuando un deslizamiento en un plano de máximo cortante cambia de posición los cristales, moléculas o átomos.

La elasticidad tardía es usualmente una consecuencia de falta de orden de la microestructura que bajo carga lentamente se reacomoda. La energía no es disipada pero almacenada, así es totalmente recuperable. Finalmente, la deformación viscosa describe el comportamiento de los fluidos y aparece solo bajo carga sostenida. La deformación es proporcional al esfuerzo aplicado, y no hay recuperación tras remover la carga.

La mayor componente de la fluencia de hormigón es cuando las partículas de gel están mucho más adheridas entre sí, esta deformación sucede lentamente y probablemente nunca reduce completamente las capas de agua absorbida a cero.

[136]

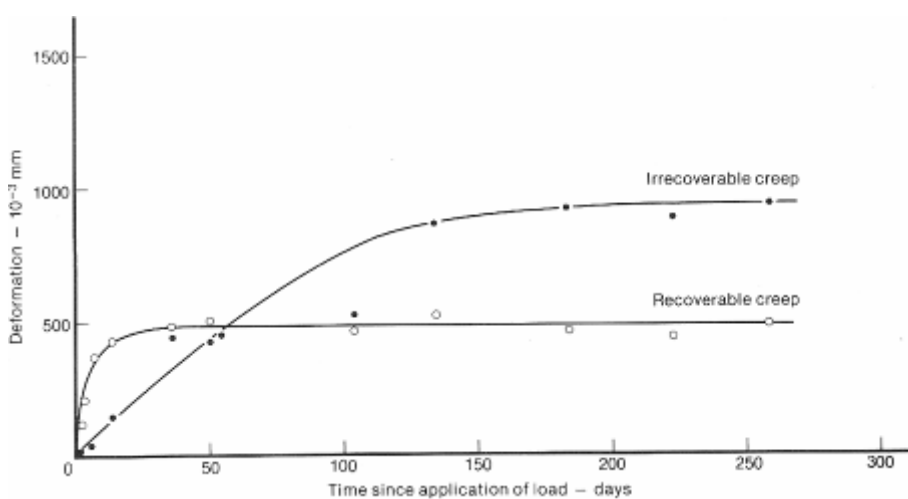


Ilustración 76, Variación en el tiempo de la fluencia recuperable e irre recuperable (Neville 1970)

Otro concepto interesante, aparece cuando el esfuerzo es retirado del elemento de hormigón. Consta de dos tipos de deformación, el primero es la recuperación instantánea y representa la cantidad de deformación instantánea a un tiempo

particular, esto significa que la recuperación no es igual a la deformación instantánea en t_0 sino menor. Seguidamente se produce una recuperación tiempo dependiente, comportándose similarmente a la fluencia pero en dirección opuesta.

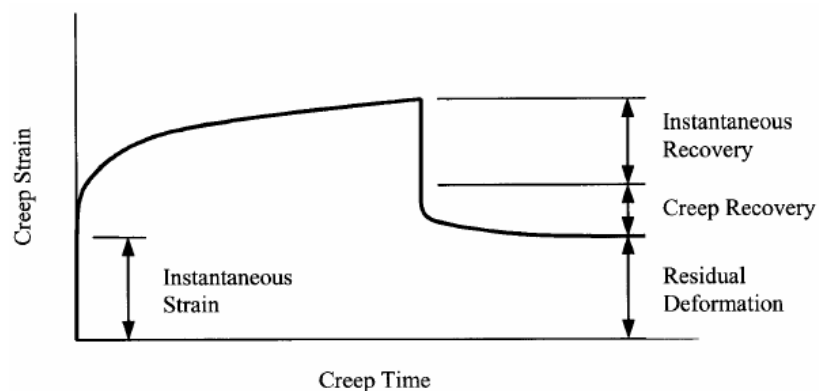


Ilustración 77 Diagrama de recuperación de fluencia (Neville 1970)

Como se aprecia en la grafica en descarga, el hormigón exhibe un recobro elástico seguido por una recuperación tiempo dependiente llamada recuperación de fluencia. La recuperación elástica y de fluencia es menor que la deformación elástica inicial y la fluencia en carga. Por consiguiente, el hormigón presenta una deformación residual después de remover la carga sostenida, también llamada deformación permanente. [119]

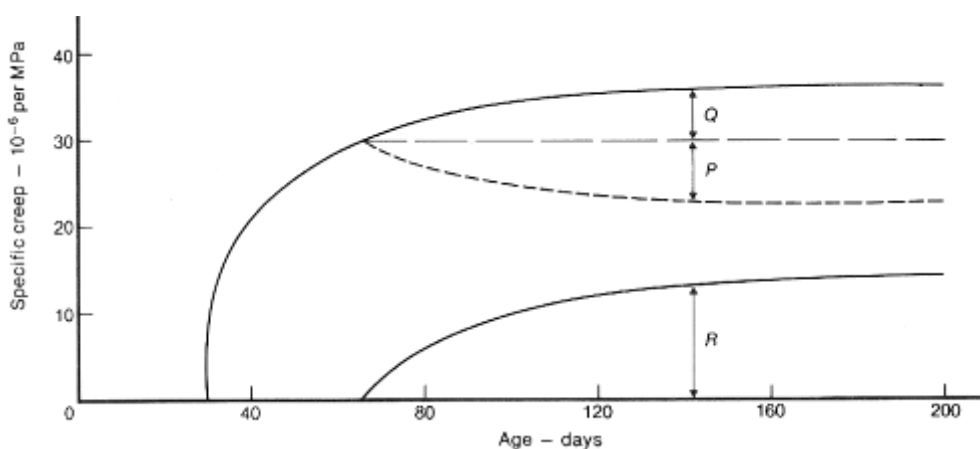


Ilustración 78, Principio de superposición de deformaciones de la recuperación de fluencia (Neville 1983)

El principio indica que la recuperación de fluencia es la diferencia entre la deformación actual a cualquier edad y la deformación que debería existir al mismo tiempo si el espécimen siguiera sometido a la tensión original. $(R-Q)/P = 1$

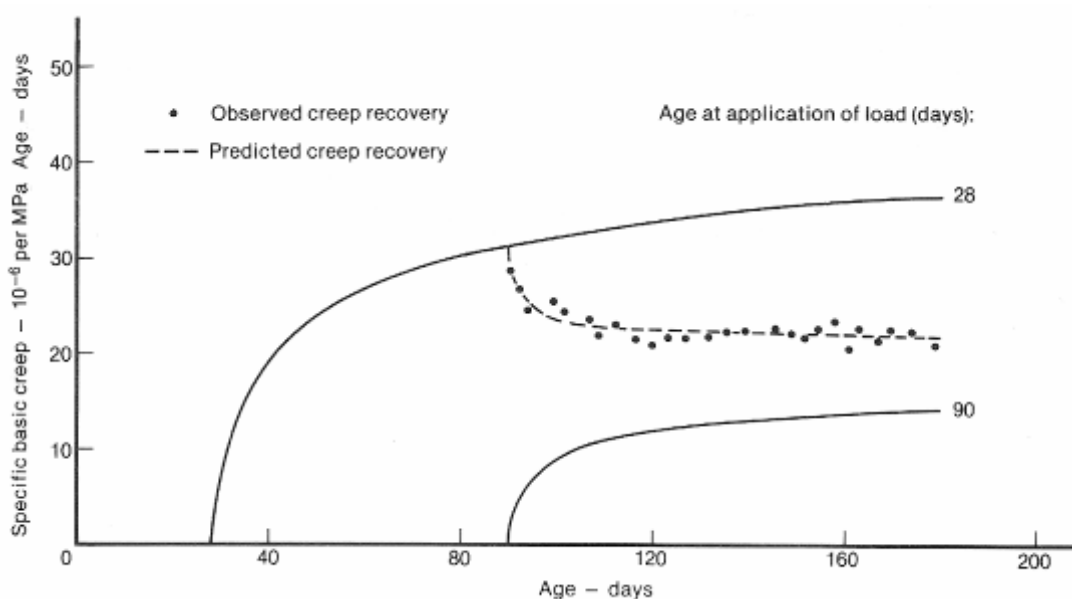


Ilustración 79, Recuperación de fluencia de hormigón sellado, observada y prevista desde el principio de superposición (ensayo por McHenry 1943) (Neville 1983)

McHenry (1943) obtuvo una verificación experimental del principio de superposición de hormigón sellado, con resultados satisfactorios.

El principio debería considerarse un valor práctico para simplificar el cálculo de deformaciones bajo varias tensiones con unas pocas curvas de fluencia.

Según Neville (1960) la recuperación de fluencia aunque no se puede relacionar con la resistencia a compresión o las propiedades del cemento, la relación fluencia/recuperación si es influenciada. Así la fluencia de hormigones más resistentes es más reversible.

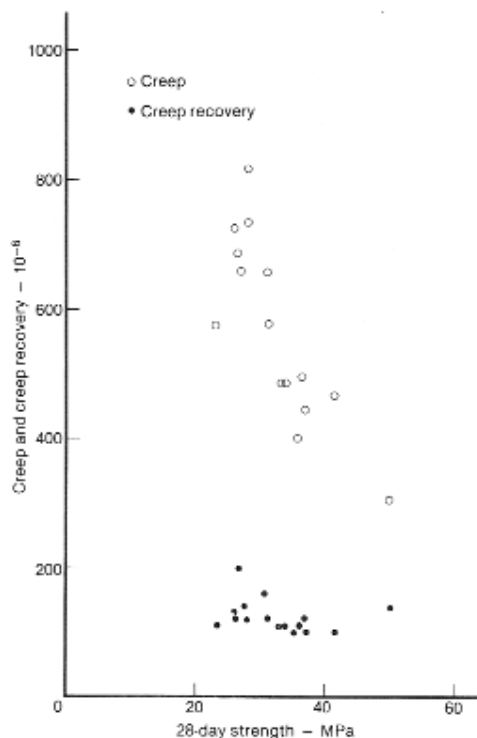


Ilustración 80, Influencia de la resistencia sobre la fluencia y recuperación de fluencia (Neville 1970)

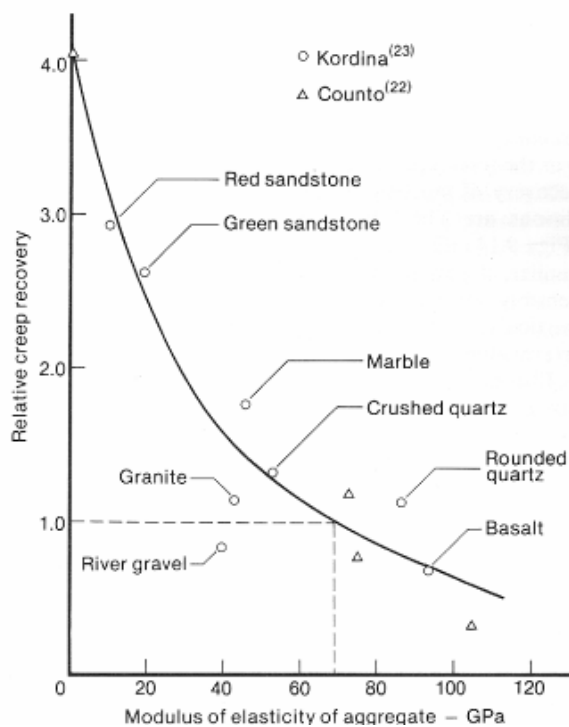


Ilustración 81, Influencia del módulo elástico del árido sobre la recuperación de fluencia (ensayos de Kordina 1960 y Counto 1964) (Neville 1970)

Aunque en menor proporción y siguiendo la misma tendencia que en fluencia el modulo elástico del árido influye sobre la recuperación de fluencia, sin embargo para el rango normal de áridos utilizados en la practica la recuperación de fluencia parece estar sensiblemente independiente de las propiedades elásticas del árido.

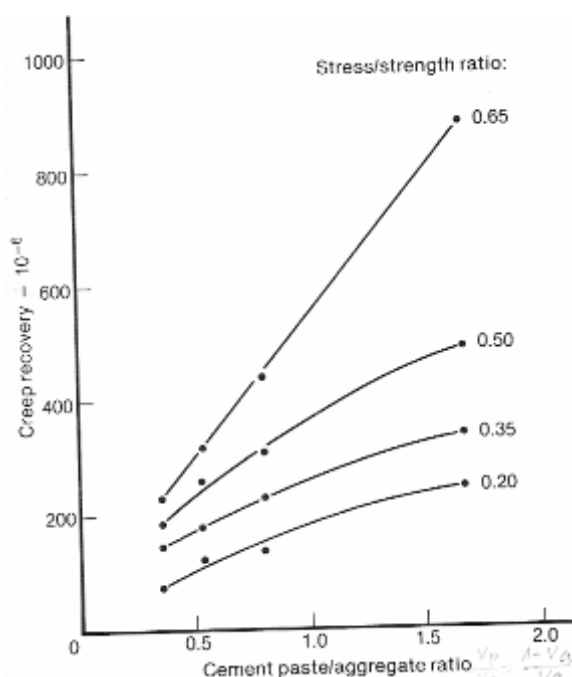


Ilustración 82, Relación entre la recuperación de fluencia y el contenido pasta /árido (Ensayos de Roll 1964) (Neville 1970)

La recuperación de fluencia ha sido presentada por Roll (1964) como inversamente proporcional al contenido de áridos en las mezclas igual que sucede con la fluencia.

3.11 DEFORMACIONES DIFERIDAS DEL HORMIGÓN RECICLADO.

La retracción por secado y fluencia del hormigón reciclado es entre un 40% a 80% mayor que la correspondiente a hormigón convencional, debido a la larga cantidad de antiguo mortero adherido a los áridos reciclados. [10]

Los elementos de hormigón reciclado reforzado parecen menos propensos a fisuras por retracción que el hormigón convencional, ya que la alta retracción y fluencia tienden a contrarrestarse.

Comparativamente se obtienen menores valores de retracción y fluencia para nuevos hormigones usando árido reciclado grueso que al utilizar áridos reciclados finos y gruesos.

3.11.1 Retracción del Hormigón Reciclado.

Aunque no se percibe una relación entre la retracción y la resistencia a compresión del hormigón, se puede prever que depende en gran medida del mayor contenido de pasta de cemento necesaria en las mezclas de hormigón reciclado, por tanto se presume que la utilización de árido reciclado produce mayor retracción en el hormigón que el árido natural, debido entre otros motivos, al menor módulo de elasticidad que presenta el árido reciclado, debido a su mayor contenido de mortero, a mayores contenidos de agua y cemento que se utilizan en el hormigón reciclado. [137]

Los mayores contenidos de agua en el hormigón reciclado aumentarían

considerablemente la retracción, según Carlson (1938) por cada aumento del 1% en la cantidad de agua, la retracción aumenta en torno al 2%.^[94]

Boegh y Hansen (1985) advertían sobre evitar la utilización de áridos reciclados con alto contenido de mortero adherido, pues aumentaba considerablemente la retracción (40% - 60%) y disminuía hasta en 50% el modulo elástico ^[77]. Es Hansen (1986) que expresa que la calidad del hormigón de procedencia influye en la retracción del hormigón reciclado, sitúa el aumento entre 40% -80% siendo los mayores valores cuando se utiliza además la fracción fina reciclada.

Hansen al igual que Kou (2008) ^[138] observa que los hormigones de procedencia de mayor resistencia, generan áridos reciclados con mayor contenido de mortero y por tanto mayor retracción en los hormigones hechos con estos áridos. Aunque al observar los resultados de Kikuchi (1993) en los cuales hormigones reciclados hechos con áridos procedentes de hormigones mas resistentes presentan menores valores de retracción ^[61], se concluye que el aumento en las deformaciones por retracción no solo dependen de la cantidad de mortero, sino de la calidad del mismo.

Aunque muchos autores coinciden con que el valor final que se alcance depende en gran medida del porcentaje de árido reciclado presente en la dosificación y contrario a lo que sucede con otras propiedades antes estudiadas, incluso la presencia de reducidas cantidades de árido reciclado puede tener un efecto importante en la retracción del hormigón.

Ravindrarajah (1987) reporta un aumento del 55% en la deformación por retracción

al sustituir el árido grueso por áridos reciclados, y aumento del 100% cuando se sustituyo la totalidad de los áridos, posteriormente y en un estudio de (1988) reporta un aumento en la retracción del 40% cuando sustituyo la totalidad del árido fino.

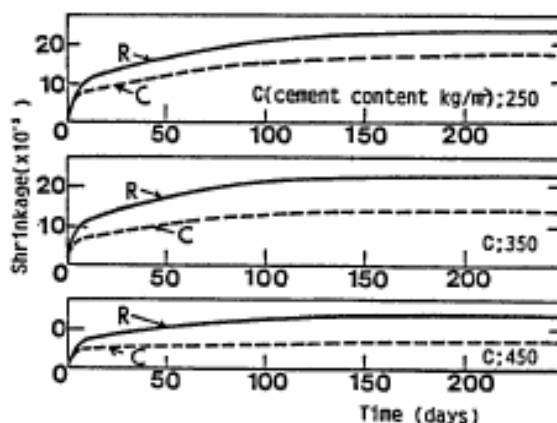


Ilustración 83, Retracción por secado de hormigón reciclado distinto contenido de cemento (Nishbayashi 1988)

Limbachiya (1998) reportó que el incremento de retracción en hormigón con resistencia de diseño 30 MPa solo llega a ser notable cuando el contenido de áridos reciclados gruesos o finos supera el 50%, aunque en este caso la relación agua/cemento de las mezclas se redujo para alcanzar la resistencia de diseño. [139]

Teranishi et al (1998) al comparar con hormigones con áridos naturales observa la influencia de la relación agua/cemento sobre la retracción por secado de hormigones reciclados, evidenciando un aumento del 17% para relación agua/cemento 0.4, aumentando a 25% cuando la relación a/c se reduce a 0.5 y alcanzando un 30% más retracción cuando la relación a/c es igual a 0,6. [140]

Costabile (2001) propone que la alta retracción por secado que sufren los hormigones reciclados puede ser mejorada con la incorporación de cenizas

volantes, aunque surge el inconveniente de la producción de un hormigón con características totalmente diferentes. [141]

Siebel y Kerkhoff (2002) encontró que las fracciones más finas de material reciclado absorben más agua, a causa de su mayor contenido de mortero adherido y entre mayor contenido de material fino mayor es el valor alcanzado de retracción.

Sagoe-Crentsil (2001) observó en hormigones reciclados confeccionados con cemento Portland un 15% más de retracción que en el hormigón de referencia, este aumento alcanzaba el 35% cuando utilizó cemento de escoria de alto horno.

Poon et al (2002) evaluó la retracción de hormigón con diferentes cantidades de áridos reciclados.

Dosificación	Retracción	Rec / Ref
Referencia	0.040	1
25%	0.042	1.05
50%	0.044	1.10
75%	0.046	1.15
100%	0.052	1.30

Tabla 14, Retracción por secado de áridos reciclados (Poon 2002)

Para, Katz (2003), los valores de retracción de los hormigones reciclados son similares a los obtenidos para hormigones ligeros hechos con áridos de escoria teniendo una porosidad abierta. [142]

Gomez-soberon (2003), Manifestó que este incremento en la retracción y la fluencia para los hormigones reciclados, está relacionado con las propiedades del árido, como alta porosidad, absorción y baja densidad, se incrementa con el incremento en la cantidad de áridos naturales que son reemplazados. [143]

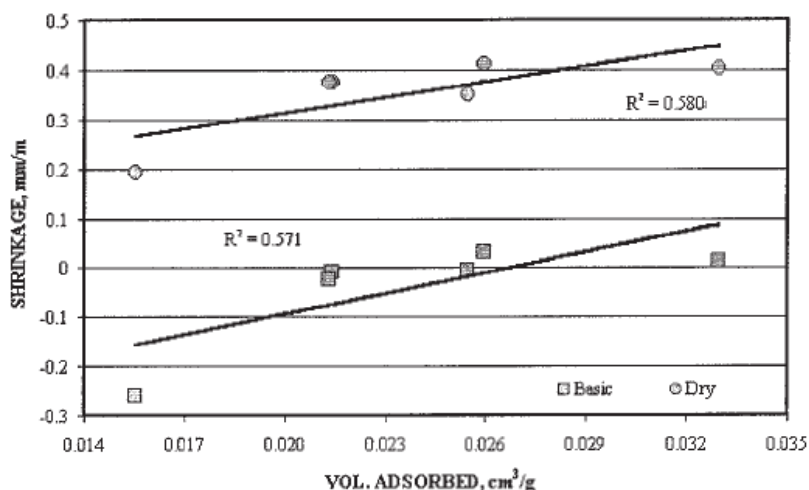


Ilustración 84, Retracción de hormigón reciclado en función de la porosidad (Gómez-Soberon 2003)

Kou (2004) observa aumentos en la deformación por retracción de 25% para una sustitución total del árido grueso 100%, un resultado moderado si lo comparamos con el 80% reportado previamente por Hansen (1993), el 60% de aumento reportado por Sánchez (2005) y el 45% reportado por Batayneh (2006) [144].

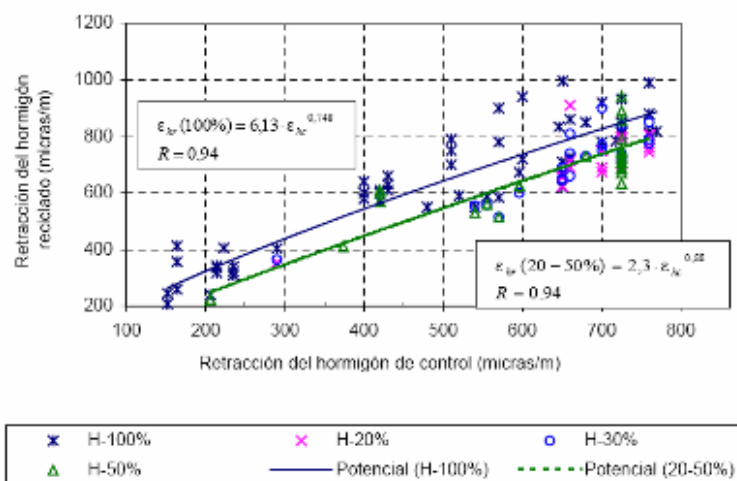


Ilustración 85, Relación retracción del hormigón de control y hormigón reciclado (Sánchez 2005).

La retracción del hormigón reciclado, se relaciona con la retracción del hormigón

de control de forma lineal, como se muestra en la grafica [23].

Sánchez (2005), además analiza los resultados de otros autores para expresar el coeficiente de corrección de retracción para hormigones con áridos reciclados, en función de la resistencia a compresión del hormigón de control.

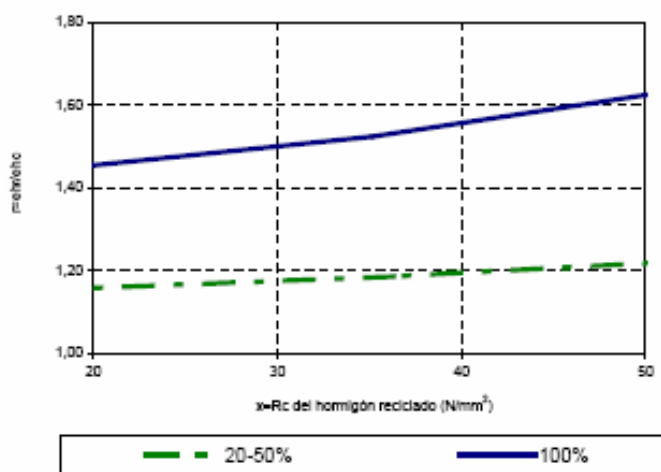


Ilustración 86, Coeficiente de corrección de retracción para hormigón reciclado en función de la resistencia del hormigón de control (Sánchez 2005).

3.11.2 Fluencia del Hormigón Reciclado.

El contenido de mortero adherido en los hormigones reciclados influye en el aumento de la fluencia con respecto a un hormigón convencional. Este aumento del orden del 20 al 60%, se acrecienta con el incremento del porcentaje de sustitución entre el 50% al 100%, aunque para porcentajes bajos de sustitución (<30%) del árido grueso la fluencia apenas se ve incrementada.

Para una sustitución total de la fracción gruesa distintos autores reportan un aumento en la fluencia entre 30% al 50%. Ravindrarajah (1987) aumento del 30%

de la fluencia. [25] Nishibayashi (1988) aumentos entre el 30 - 50% de la fluencia. [64] Sagoe-Crentsil (1998) reporto aumentos del 40% en las deformaciones por fluencia. [33]

Paw (1998) llevo a cabo la medición de deformaciones en un estudio de efectos combinados de retracción y fluencia, sobre probetas de hormigón sin sellar de hormigón con 100% áridos reciclados gruesos y hormigón de control con áridos calizos. En este estudio noto que al usar un menor contenido de cemento y aumentando la docilidad con súper plastificantes reducía la retracción y fluencia significativamente, mientras en el hormigón reciclado el efecto fue menos marcado. [145]

Roos y Zilch (1998), presentan un estudio de fluencia con resultados a corto tiempo, donde comienza a ser apreciable el incremento de fluencia para hormigones con áridos reciclados grueso (RC-A) y aun mayor cuando se sustituye la totalidad de los áridos por reciclados (RC-B). [146]

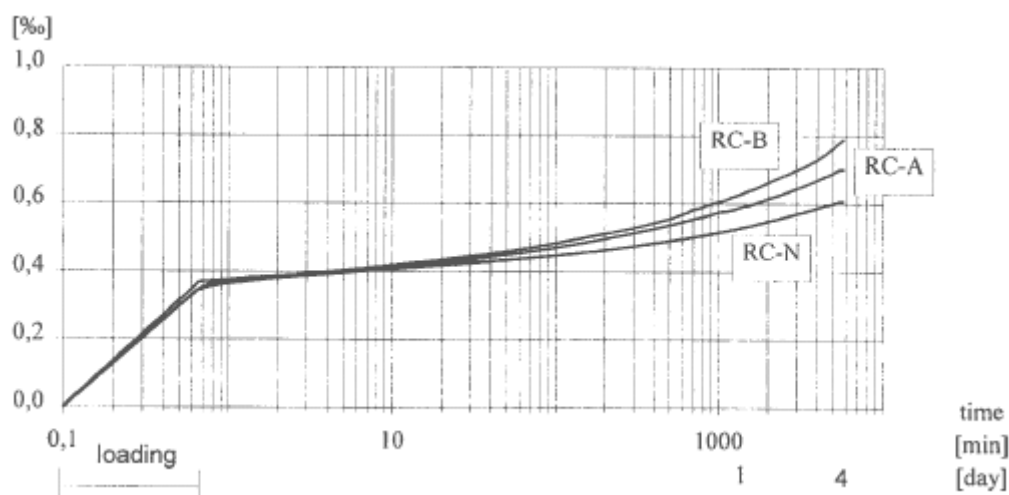


Ilustración 87, Incremento de fluencia entre hormigón reciclado y hormigón de control, corto tiempo (Roos 1998)

Limbachiya (2000) en un estudio con diferentes cantidades de árido reciclado grueso reporto aumentos en la deformación por fluencia insignificantes (1% a 2%) con sustituciones menor al 30%, moderados (15% a 22%) al sustituir el 50% y aumentos importantes (33% a 65%) cuando se sustituye la totalidad del árido grueso. [147]

Mokhtarzadeh (2000) explica como la interfase árido-pasta afecta gravemente la habilidad para resistir las deformaciones y como los áridos con superficie rugosa resisten efectivamente mejor la fluencia [113]. Esto puede generar incongruencias, ya que los áridos reciclados aunque poseen superficie más rugosa, la interfase árido pasta suele ser mas débil.

Fraaij (2002) indica que la deformación de fluencia en el hormigón cuando la totalidad de los finos son naturales y el árido grueso 100% reciclado la deformación por fluencia fue apenas 25% mayor que la del hormigón de referencia mientras aumenta hasta el doble cuando contiene un 50% de reciclados finos y 100% de reciclados gruesos. [148]

Gómez (2002) reporto un aumento en la deformación por fluencia del 30% para contenidos totales de áridos gruesos. [71] En (2003) reporto un aumento de 35% para el mismo grado de sustitución mientras un insignificante 4% para una sustitución de 15% de la fracción gruesa [149]

Fernández (2003) cita a Rusch y Kordina, los cuales realizan estudios de fluencia con distintos tipos de áridos, concluyendo que existen sustanciales diferencias entre ellos.

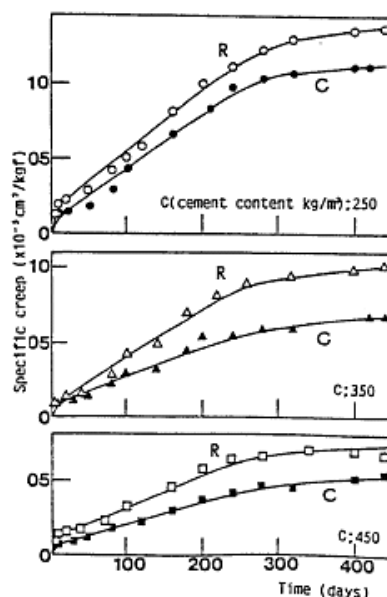


Ilustración 88, Comparativa de fluencia específica entre hormigón reciclado y hormigón de control (Fernandez 2003)

Gomez-Soberon (2003) expone como el efecto de la presencia de áridos reciclados sobre el incremento en la fluencia es mas pronunciado durante el proceso de secado, acusándole del incremento en la porosidad especialmente en la zona de $\phi < 50$ nm. [143]

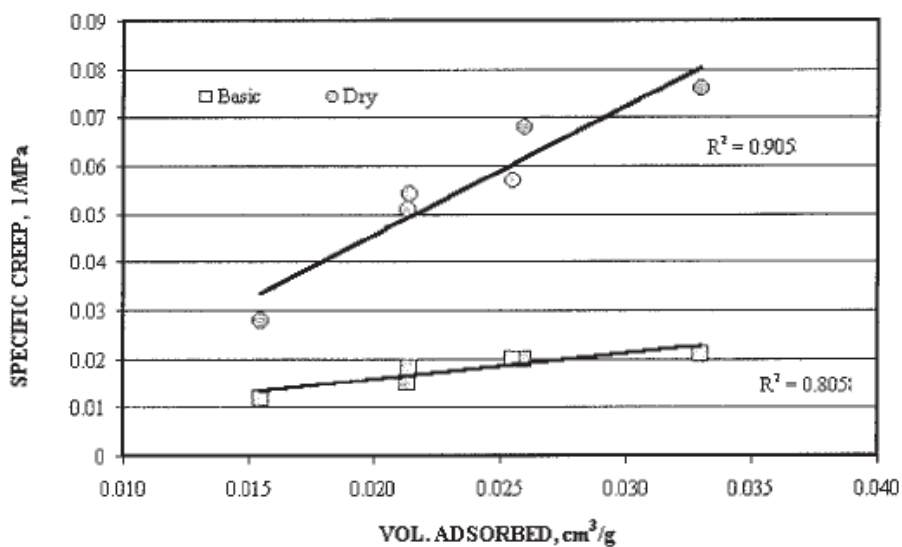


Ilustración 89, Fluencia específica de hormigón reciclado en función del volumen de poros (Gómez-Soberón 2003)

Además de los pocos estudios de deformaciones diferidas que se han realizado, los ensayos para fluencia no son concluyentes, algunos estudios muestran tendencia a ser inversa. Ajdukiewicz (2002) con resultados a un año, en el cual el hormigón reciclado es alrededor del 20% menor que en el hormigón normal [150].

3.12 PREDICCIÓN DE DEFORMACIONES DIFERIDAS

En los últimos 50 años varios modelos de predicción de fluencia y retracción han sido desarrollados a partir de extensivas bases de datos de ensayos realizados.

La precisión de estos modelos es muy importante en el diseño de estructuras de hormigón, cualquier error en la predicción puede llevar a tensiones excesivas, fisuración o grandes deflexiones y puede causar pérdidas en las fuerzas de pretensado en elementos que finalmente en conjunto conducen al fallo de la estructura.

Los modelos más utilizados son el ACI 209 recomendado por el instituto americano del hormigón y el código modelo CEB-FIP 90 (hoy fib), recomendado por la federación internacional del hormigón. Aunque existen otros métodos de predicción más refinados, indicando algunas modificaciones posteriores para predicción de deformaciones diferidas en hormigones de alta resistencia o para estructuras especiales.

- American Concrete Institute, comité 209, (ACI-209, 1992).

- Federation internationale du beton (CEB-FIP, MC 90),
- Rilem - Bažant y Baweja's (B3 1995)

Las variables consideradas por los modelos para fluencia y retracción, pueden agruparse en condiciones ambientales, diseño de mezcla y propiedades geométricas del elemento.

Entre las variables ambientales están, tipo de curado, edad de madurez del hormigón al momento de ser cargado, edad del hormigón al inicio del secado, humedad relativa, temperatura.

Consistencia, contenido de áridos finos, contenido de áridos gruesos, contenido de aire, contenido de agua, tipo de cemento, contenido de materiales cementantes y resistencia del hormigón son condiciones del diseño de mezcla.

Y entre las propiedades geométricas están, forma del miembro y la relación volumen superficie

Es especial que en los modelos de predicción no se incluyan las características de áridos, a pesar de que estas podrían modificar el coeficiente de fluencia hasta en un 100%.

3.12.1 ACI-209

Es el modelo del código de diseño usado en los Estados Unidos para la predicción de retracción y fluencia de estructuras de hormigón. Este modelo se introdujo en los 70's, basado en los estudios de Branson [151] quien revisó previos métodos propuestos por varios investigadores y presentó un conjunto de ecuaciones

estándar y condiciones para predecir retracción y fluencia, complementado con factores de corrección para condiciones distintas a la estándar en forma de ecuaciones, tablas y curvas.

El modelo consta una expresión hiperbólica similar a la propuesta por Ross [152] donde se muestran las tasas de fluencia y retracción en función del tiempo, con factores de corrección por efectos de humedad, asentamiento, contenido de aire, contenido de cemento, porcentaje de árido fino, tamaño y forma del elemento y edad de carga.

Se puede aplicar para cementos Pórtland tipo I y tipo III con humedad relativa entre el 40% y 100%

Modelo de Fluencia.

$$\phi_t = \frac{(t - t')^\psi}{d + (t - t')^\psi} \cdot \phi_u$$

Ecuación 18, Modelo general de fluencia ACI - 209

Donde:

ϕ_t coeficiente de fluencia a la edad t , cargado a la edad t'

t edad del hormigón (días)

t' edad del hormigón al momento de carga (días)

ψ constante de forma y tamaño (recomienda 0.6).

d constante de forma y tamaño (recomienda 10).

ϕ_u Coeficiente ultimo de fluencia, que depende de otros factores, un valor aproximado del coeficiente de fluencia es de 2.35 multiplicado por seis factores que dependen de condiciones particulares.

$$\phi_u = 2.35 \cdot \gamma_{la} \cdot \gamma_{\lambda} \cdot \gamma_{vs} \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{\psi} \cdot \gamma_{\alpha}$$

Donde

$$\gamma_h = \begin{cases} 1.27 - 0.67 \cdot h & \text{para } h \geq 0.40 \\ 1.00 & \text{para el caso contrario} \end{cases}; \text{ factor de humedad relativa del ambiente}$$

h humedad relativa del ambiente en decimales

$$\gamma_{vs} = \frac{2}{3} \left(1 + 1.13 \cdot \exp\left\{-0.0213 \cdot \frac{V}{S}\right\} \right); \text{ factor de relacion volumen - superficie}$$

V volumen del especimen (mm³)

S superficie del especimen (mm²)

$$\gamma_s = 0.82 + 0.00264 \cdot s; \text{ factor de asentamiento}$$

s cono (mm)

$$\gamma_\psi = 0.88 + 0.24 \cdot \psi; \text{ factor de contenido de arido fino}$$

ψ relación árido fino a árido total en decimales

$$\gamma_\alpha = 0.46 + 0.09 \cdot \alpha; \text{ factor de contenido de aire}$$

α contenido de aire (%)

Después de aplicar los anteriores factores, el valor del coeficiente de fluencia ultimo esta usualmente entre 1.3 y 4.15, lo cual indica que la deformación de fluencia esta entre 1.3 y 4.15 veces la deformación elástica inicial

Modelo de Retracción.

$$(\epsilon_{sh})_t = \frac{(t - t_0)^\alpha}{f + (t - t_0)^\alpha} \cdot (\epsilon_{sh})_u$$

Ecuación 19, Modelo de retracción por secado ACI - 209

Donde:

t₀ edad al inicio del secado (días)

(ε_{sh})_t deformación de retracción después de (t - t₀) días bajo secado (mm/mm)

α Constante de forma y tamaño (sugiere el valor de 1)

f constante de forma y tamaño, recomienda un valor f de 35 y 55, para curado húmedo de 7 días y de 1 a 3 días de curado al vapor respectivamente.

$(\varepsilon_{sh})_u$ deformación de retracción última (mm/mm)

El valor Último de retracción depende de otros factores, y el ACI-209 propone un valor promedio de retracción de 780 $\mu\varepsilon$ multiplicado por siete valores que dependen de condiciones particulares.

$$(\varepsilon_{sh})_u = 780 \cdot \gamma_\lambda \cdot \gamma_{vs} \cdot \gamma_s \cdot \gamma_\psi \cdot \gamma_c \cdot \gamma_\alpha$$

$$\gamma_\lambda = \begin{cases} 1.40 - 1.0 \cdot h & \text{para } 0.40 \leq h \leq 0.80 \\ 3.00 - 3.0 \cdot h & \text{para } h > 0.80 \end{cases}; \text{ factor de humedad relativa del ambiente}$$

$$\gamma_{vs} = 1.2 \cdot \exp\{-0.00472 \cdot V/S\}; \text{ factor de relacion volumen - superficie}$$

$$\gamma_s = 0.89 + 0.00161 \cdot s; \text{ factor de asentamiento}$$

$$\gamma_\psi = \begin{cases} 0.30 + 1.4 \cdot \psi & \text{para } \psi \leq 0.50 \\ 0.90 - 0.2 \cdot \psi & \text{para } \psi > 0.50 \end{cases}; \text{ factor de contenido de arido fino}$$

ψ relación árido fino a árido total en decimales

$$\gamma_c = 0.75 + 0.00061 \cdot c; \text{ factor de contenido de cemento}$$

c contenido de cemento (Kg/m³)

$$\gamma_\alpha = 0.95 + 0.08 \cdot \alpha; \text{ factor de contenido de aire}$$

α contenido de aire (%)

Después de aplicar los factores, el valor ultimo de retracción esta usualmente entre 415 y 1,070 $\mu\varepsilon$.

3.12.2 CEB-FIP (Código Modelo 90)

El modelo MC 90 del hoy “fib” tiene un concepto similar ACI-209 en el sentido que

da un cambio hiperbólico con el tiempo para fluencia y retracción, y también usa un valor último corregido de acuerdo al diseño de mezcla y condiciones ambientales. Una diferencia con el anterior es que predice deformaciones de fluencia más que coeficientes de fluencia y es aplicable para hormigón con resistencia a compresión hasta los 90 MPa, humedad relativa entre 40% y 100% y temperaturas medias de 5°C a 30°C

Modelo de Fluencia.

El modelo general MC90 predice deformación de fluencia multiplicando el coeficiente de fluencia por la deformación elástica.

El coeficiente de fluencia esta basada en dos parámetros.

$$\varepsilon_{cr}(t, t') = \frac{\sigma_c(t')}{E_{28}} \phi_{28}(t, t')$$

Ecuación 20, Ecuación general de deformación de fluencia modelo CM 90

$$\phi_{28} = \phi_0 \cdot \left[\frac{(t - t')}{\beta_H + (t - t')} \right]^{0.3}$$

Donde:

t edad del hormigón (días)

t' edad del hormigón al cargarlo (días)

ε_{cr} deformación de fluencia en $\mu\varepsilon$

$\sigma_c(t')$ esfuerzo aplicado (Mpa)

ϕ_{28} coeficiente de fluencia a la edad t cargado en t'

$$\phi_0 = \left[1 + \frac{(1-h)}{0.46 \cdot \left(\frac{2 \cdot A_c}{u} \right)^{1/3}} \right] \cdot \frac{5.3}{\sqrt{f'c}} \cdot \frac{1}{0.1 + t'^{0.2}} ; \text{coeficiente ideal de fluencia}$$

h humedad relativa en decimales

A_c área de la sección transversal (mm²)

u perímetro expuesto (mm)

f'c resistencia a compresión a los 28 días (MPa)

$$\beta_H = 150 \cdot \left[1 + (1.2 \cdot h)^{18} \right] \cdot \frac{2 \cdot A_c}{100 \cdot u} + 250 \leq 1500 ; \text{constante dependiente del tamaño del miembro y humedad relativa}$$

Cuando se usa cemento diferente al de normal endurecido y/o se sigue un régimen de curado especial, t' se modifica, incorporando el concepto de madurez.

$$t' = t'_T \left[\frac{9}{2 + (t'_T)^{1.2}} + 1 \right]^\alpha \geq 0.5 \text{ dias}$$

$$t'_T = \sum \Delta t_i \cdot \exp \left\{ - \left[\frac{400}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} - 13.65 \right] \right\}$$

Donde:

$$\alpha = \begin{cases} -1 & \text{para cemento de endurecido lento} \\ 0 & \text{para cemento de endurecido normal} \\ 1 & \text{para endurecido rapido y alta resistencia temprana} \end{cases} ; \text{ parametro del tipo de cemento}$$

t'_t edad ajustada del hormigón al cargarlo

Δt_i Periodo de tiempo (días) a la temperatura T(Δt_i) (°C)

T₀ 1°C

Cuando el esfuerzo aplicado esta entre el 40% y el 60% de la resistencia a

compresión, el fib recomienda usar un coeficiente ideal de fluencia corregido por nivel de esfuerzo..

$$\phi_{0,k} = \phi_0 \cdot \exp\{1.5 \cdot (k_\sigma - 0.4)\}$$

Donde:

k_σ relación esfuerzo-resistencia al tiempo de aplicación de la carga

Modelo de Retracción.

$$\varepsilon_s(t, t_0) = \varepsilon_{so} \cdot \beta_s \cdot (t - t_0)$$

Ecuación 21, Ecuación general del modelo de retracción MC 90

Donde:

t edad del hormigón

t_0 edad del hormigón al inicio del secado (días)

$$\varepsilon_{so} = \left[160 + 10 \cdot \beta_{sc} \cdot \left(9 - \frac{f'c}{10} \right) \right] \cdot \beta_{RH} ; \text{coeficiente ideal de retraccion}$$

$$\beta_{sc} = \begin{cases} 4 & \text{para cemento endurecido lento} \\ 5 & \text{para cemento endurecido normal} \\ 4 & \text{para endurecido rapido alta reistencia temprana} \end{cases} ; \text{ parametro del tipo de cemento}$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55 \cdot [1 - h^3] & \text{para } 0.40 \leq h \leq 0.99 \\ 0.25 & \text{para } h \geq 0.99 \end{cases}$$

h humedad relativa en decimales

$f'c$ resistencia a compresión de cilindros de hormigón a los 28 (MPa)

$$\beta_s(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_{sH} + (t - t_0)} \right]^{0.5} ; \text{funcion de retraccion}$$

$$\beta_{sH} = 350 \cdot \left(\frac{2 \cdot A_c / u}{100} \right)^2$$

A_c área de la sección transversal (mm^2)

u perímetro expuesto (mm)

Cuando se aplican temperaturas superiores a 30°C , el CEB-FIP recomienda usar una corrección por temperatura elevada para β_{sH} y β_{RH}

$$\beta_{sH,T} = \beta_{sH} \cdot \exp\{-0.06 \cdot (T - 20)\}$$

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH} \cdot \left[1 + \left(\frac{0.08}{1.03 - h} \right) \cdot \left(\frac{T - 20}{40} \right) \right]$$

$\beta_{sH,T}$ factor geométrico corregido por temperatura

$\beta_{RH,T}$ factor por humedad relativa corregido por temperatura

T temperatura ambiental ($^\circ\text{C}$)

h humedad relativa en decimales.

Yue y Taerwe (1993) reportan cambio a las ecuaciones del modelo para predecir la fluencia de hormigones de alta resistencia.

$$\beta_H = \frac{130}{f'_c} \cdot \left[1 + (0.012 \cdot h)^{18} \right] \cdot \left(2 \cdot \frac{A_c}{u} \right) + 250 \leq 1500 ; \text{ constante dependiente del tamaño del miembro y humedad relativa}$$

$$\phi_0 = \left[1 + \frac{(1-h)}{0.46 \cdot \left(\frac{2 \cdot A_c}{100 \cdot u} \right)^{1/3}} \right] \cdot \frac{2.6}{\sqrt{f'_c}} \cdot \frac{1}{0.1 + t'^{0.2}} ; \text{ coeficiente ideal de fluencia}$$

3.12.3 B3

El modelo B3 (Bazant & Baweja) 1995 [153], se propone como un mejoramiento y actualización a los modelos previos BP (Bažant y Panula, 1978) y BP-KX

(Bažant, Panula, Kim, Koo, y Xi, 1992). Es teóricamente mejor soportado y más exacto que sus predecesores aunque sigue siendo complejo debido a las numerosas variables que involucra. La retracción es calculada como el producto de la deformación última de retracción y las ecuaciones que incorporan factores de corrección por tiempo y la humedad. La deformación última de retracción es dada como una función de la resistencia media a compresión a 28 días y el contenido de agua. Involucra factores de corrección por tipo de cemento y método de curado.

La función de fluencia es expresada como la suma de deformación instantánea debido al esfuerzo unitario, fluencia básica y fluencia de secado. La fluencia básica es dada como función del diseño de mezcla de un hormigón particular y la fluencia por secado es dada como función de la deformación última de retracción, la resistencia media compresión a 28 días, edad y humedad relativa.

Este método es aplicable para hormigones con resistencia a compresión hasta los 70 MPa y humedad relativa entre 40% y 100%.

Modelo de Fluencia.

La función de cedencia promedio incorpora deformación instantánea, fluencia básica y fluencia por secado

$$J(t, t') = q_1 + C_0(t, t') + C_d(t, t', t_0)$$

Ecuación 22, modelo general de fluencia método B3

Donde:

$$q_1 = \frac{0.6 \times 10^6}{E_0} \text{ deformacion instantanea debido al esfuerzo unitario}$$

C_0 porción de fluencia básica [fluencia especifica – (mm/mm)/MPa]

C_d porción de fluencia por secado [fluencia especifica – (mm/mm)/MPa]

t edad del hormigón (días)

t' edad del hormigón al cargarlo (días)

t_0 edad del hormigón al iniciar el secado (días)

E_0 Modulo elástico asintótico (MPa) (independiente de la edad)

$$C_0(t, t') = q_2 \cdot Q(t, t') + q_3 \cdot \ln[1 + (t - t')^n] + q_4 \ln\left[\frac{t}{t'}\right]$$

Ecuación 23, Modelo de fluencia básica método B3

Donde:

$$q_2 = 451.1 \sqrt{1.6856 \cdot c} \cdot (145 \cdot f'c)^{-0.9} ; \text{cedencia viscoelastica de envejecimiento}$$

c contenido de cemento (Kg/m³)

$f'c$ resistencia a compresión a 28 días (MPa)

$$Q(t, t') = Q_f(t') \cdot \left[1 + \left(\frac{Q_f(t')}{Z(t, t')} \right)^{r(t')} \right]^{-1/r(t')}$$

$$Q_f(t') = \left[0.086 \cdot (t')^{2/9} + 1.21 \cdot (t')^{4/9} \right]^{-1}$$

$$Z(t, t') = (t')^{-m} \cdot \ln[1 + (t - t')^n]$$

$$r(t') = 1.7 \cdot (t')^{0.12} + 8$$

$$m = 0.5 ; n = 0.1$$

$$q_3 = 0.29 \cdot \left(\frac{w}{c} \right)^4 \cdot q_2 ; \text{cedencia viscoelastica sin envejecimiento}$$

$$q_4 = 0.14 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{-0.7} ; \text{cedencia de flujo}$$

c contenido de cemento (Kg/m³)

w contenido de agua (Kg/m³)

a contenido de árido (Kg/m³)

$$C_d(t, t', t_0) = q_s \cdot [\exp\{-8 \cdot H(t_0)\}]^{1/2}$$

Ecuación 24, Modelo de fluencia por secado método B3

Donde:

$$q_s = \frac{5220.7}{f'c} \cdot |\varepsilon_{sh\infty}|^{-0.6}$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = -\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \left[0.00856 \cdot w^{2.1} \cdot (145 \cdot f'c)^{-0.28} + 270 \right] \cdot \frac{\left(\frac{607}{4 + 0.85 \cdot 607} \right)^{1/2}}{\left(\frac{t_0 + \tau_{sh}}{4 + 0.85 \cdot (t_0 + \tau_{sh})} \right)^{1/2}}$$

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1.00 & \text{para cemento tipo I} \\ 0.85 & \text{para cemento tipo II ; factor de tipo de cemento} \\ 1.10 & \text{para cemento tipo III} \end{cases}$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0.75 & \text{para especímenes en curado humedo} \\ 1.00 & \text{para especímenes curados en agua o } h = 1.00 ; \text{ factor de curado} \\ 1.20 & \text{para especímenes sellados} \end{cases}$$

$$\tau_{sh} = 190.8 \cdot t_0^{-0.008} \cdot (145 \cdot f'c)^{-0.25} \cdot \left(k_s \cdot 0.0787 \cdot \frac{V}{S} \right)^2 ; \text{ factor de dependencia del tamaño}$$

$$k_s = \begin{cases} 1.00 & \text{para losa infinita} \\ 1.15 & \text{para cilindro infinito} \\ 1.25 & \text{para prisma cuadrado infinito ; factor de forma} \\ 1.30 & \text{para una esfera} \\ 1.55 & \text{para un cubo} \end{cases}$$

V volumen del espécimen (mm³)

S área superficial del espécimen (mm²)

$$H(t) = 1 - (1 - h) \cdot \tanh \sqrt{\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}}$$

h humedad relativa en decimales

t₀' máximo (t', t₀) (días)

Modelo de Retracción por secado.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = -\varepsilon_{sh\infty} \cdot k_h \cdot \tanh \sqrt{\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}}$$

Ecuación 25, Modelo de retracción por secado método B3

$$k_h = \begin{cases} 1 - h^3 & \text{para } h \leq 0.98 \\ -0,2 & \text{para } h = 1.00 \\ \text{interpolacion lineal} & \text{para } 0.98 \leq h \leq 1.00 \end{cases} ; \text{ factor de dependencia de la humedad}$$

3.13 PREDICCIÓN DE DEFORMACIÓN DESDE DATOS EXPERIMENTALES.

Aunque se han realizado grandes avances en los métodos probabilísticas de predicción de deformaciones diferidas y efectos de la composición del hormigón en la retracción y fluencia del mismo, la naturaleza heterogénea del hormigón y la manera en la cual es afectada por múltiples variables no conducen a un simple método de predicción.

Sin embargo la relación simplicidad/precisión es esencial para el diseñador, por tanto la mejor manera de conocer el comportamiento a largo tiempo del hormigón es por medio de ensayos a corto plazo, aprovechándonos de un buen modelo de predicción ajustándolo con conceptos como la distribución de la humedad y temperatura de poro a través de la sección.

Neville (1983), hacia referencia sobre la mejor precisión de la predicción de deformaciones, al realizarse a través de ensayos cortos.

Una importante ventaja de la función que describe la fluencia a través del tiempo del modelo B3 es que los parámetros que las componen son contenidos de forma lineal, por tanto posibilitan una regresión minimizando el coeficiente de variación desde las mediciones disponibles (corto tiempo).

En retracción la linealidad aplica para el parámetro $\epsilon_{s\alpha}$ y el único parámetro no lineal es la retracción a mediano plazo τ_{sh} , la cual se soluciona partiendo de que a largo plazo, la retracción es aproximadamente proporcional a la pérdida de humedad Δw , la cual puede ser medida fácilmente al tiempo que se realiza el ensayo de retracción. El valor final w_{α} cuando la probeta alcanza secado completamente (0% HR) se puede conseguir con un secado en estufa a 100°C después del estudio a corto plazo.

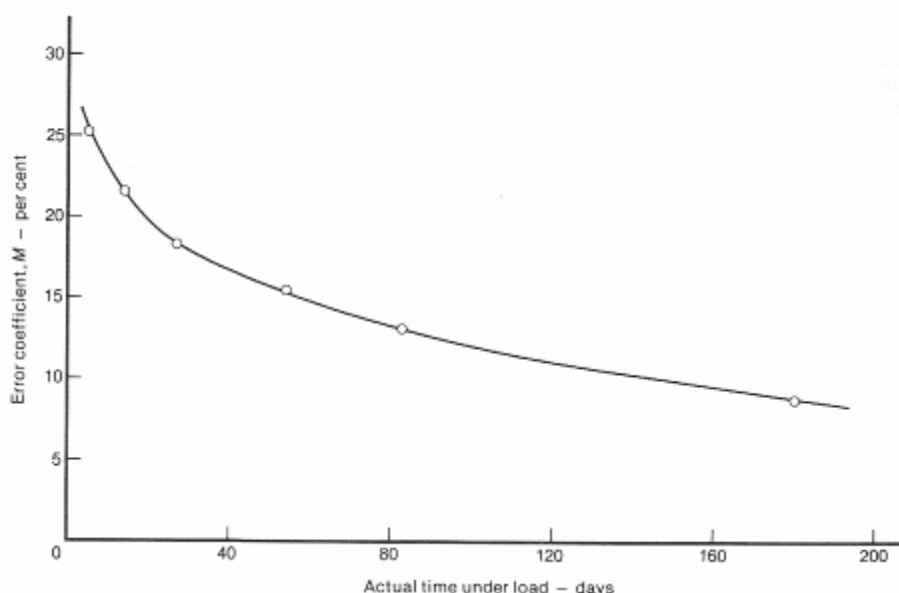


Ilustración 90, Precisión de predecir la fluencia desde ensayos a corto tiempo (Neville 1983)

De la teoría de la difusión y asumiendo proporcional la pérdidas de agua, la evolución de la disminución de agua con el tiempo podría expresarse de la siguiente manera.

$$\frac{\Delta w}{w_{\infty}} = \tanh \sqrt{\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}} \quad t - t_0 = \tau_{sh} \psi \quad \text{cuando } \psi = \left[\tanh^{-1} \left(\frac{\Delta w}{w_{\infty}} \right) \right]^2$$

Ecuación 26, Relación entre la pérdida de humedad relativa del elemento a través del tiempo con la retracción a mediano plazo

Para cada tiempo i , que se ha medido la retracción y se ha medido la pérdida de agua Δw_i , podremos conocer ψ_i y minimizar la suma de desviación cuadrática

$$S = \sum_i [\tau_{sh} \psi - (t_i - t_0)]^2 = \min, \text{ esto se consigue cuando } ds / d\tau_{sh} = 0.$$

$$\tau_{sh} = \frac{\sum_i (t_i - t_0) \psi_i}{\sum_i \psi_i^2}$$

Ecuación 27, Valor actualizado de retracción a termino medio a partir de ensayos a corto plazo.

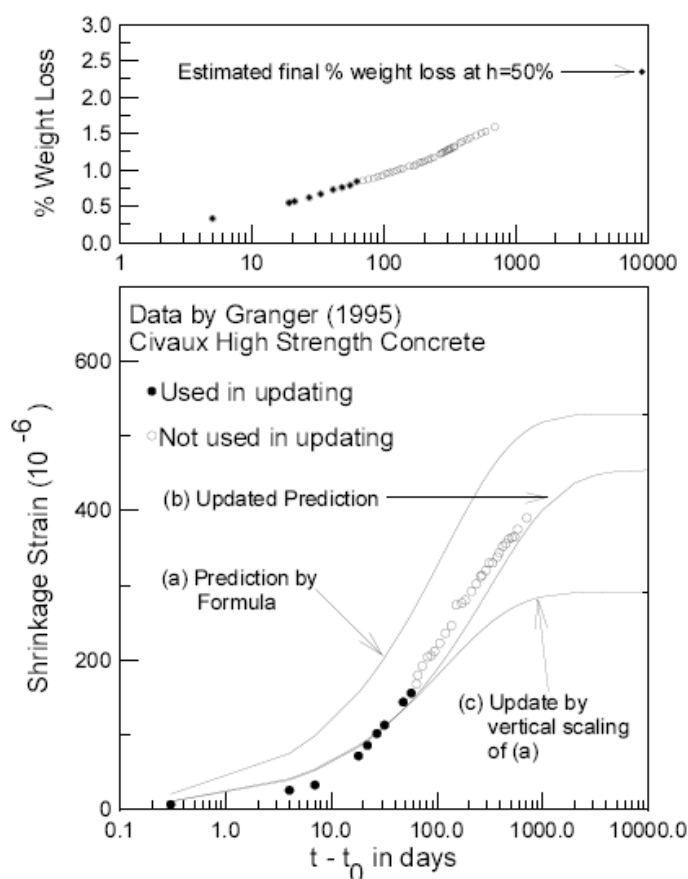


Ilustración 91, Ejemplo de actualización de predicción de retracción usando datos de ensayo a corto plazo y perdida de humedad final estimada (Bazant y Baweja 2000)

CAPITULO 4: MÉTODOS Y NORMATIVA UTILIZADA.

Estructuración de la propuesta de investigación “Estimación de las deformaciones de fluencia y retracción de hormigón reciclado a través de un estudio a corto plazo”, explicando detalladamente el procedimiento a seguir en la investigación, los equipos a utilizar y normativa de ensayos.

La totalidad de la investigación experimental se ha realizado en las instalaciones del laboratorio de materiales de construcción de la escuela técnica superior de ingeniería de caminos canales y puertos (ETSICCP) de la Universidad Politécnica de Valencia.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE ÁRIDOS.

Como áridos para la fabricación de hormigones pueden emplearse arenas y gravas existentes en yacimientos naturales, rocas machacadas o escorias siderúrgicas apropiadas, así como otros productos cuyo empleo se encuentre sancionado por la práctica o resulte aconsejable como consecuencia de estudios realizados en laboratorio ^[154]. Para ello se han realizado ensayos característicos a los materiales siguiendo con la normativa UNE vigente.

La determinación de la densidad y la absorción, se realizó de acuerdo a la norma española UNE-EN 1097-6:2001 “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua”, correspondiente a la norma europea: EN 1097-6:2000.

El estudio granulométrico de los áridos se realizó cribándolo a través de los tamices de la serie UNE-EN 933-2 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas”, conforme a la norma UNE-EN 933-1:2006 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado”, el tamizado se realizó lavando las muestras por el tamiz $63\mu\text{m}$ y tamizando después de secarlo.

La determinación del mortero adherido se hizo por medio del proceso térmico, siguiendo el procedimiento propuesto por la universidad de Cataluña.

Por medio de tamices de ensayo, según EN 933-2, Estufa ventilada, con temperatura constante (110 ± 5) °C, Balanza de precisión, con error máximo de $\pm 0,1\%$ de la masa de la muestra ensayada, Bandejas y Mufla con capacidad 500 °C. Se siguió el procedimiento. Se toma la muestra y se tamiza utilizando los tamices de 16, 8 y 4 mm, de tal forma que se obtengan dos fracciones, 4/8 mm y 8/16 mm, sobre cada una de las cuales se realizará el ensayo, se separan las partículas contaminantes, ladrillo, asfalto, terrones, plásticos, madera, etc, se toman 600 gr. aprox., de muestra e introducen en estufa a 100° C hasta masa constante.

La muestra seca se reduce a 500 gr, se sumerge en agua fría durante dos horas posteriormente se calienta la muestra en mufla a 500°C durante dos horas, y se vuelve a sumergir la muestra en agua fría.

Estas operaciones tienen como finalidad crear tensiones en el mortero que facilitan su separación, la cual se realiza manualmente, golpeando con mazo de goma y

tamizando por el tamiz de 4 mm, para retirar las partículas de mortero que se han separado, por último se seca el árido retenido en este tamiz a 100°C hasta masa constante.

La determinación de la resistencia a la abrasión de los áridos se realizó por medio del ensayo de Los Ángeles, siguiendo el procedimiento de la norma UNE – EN 1097-2:99 “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación” El coeficiente de forma del árido reciclado se realizó conforme a la UNE – EN 933-4:2000 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos parte 4: determinación de la forma de las partículas Coeficiente de Forma”.

4.2 PROPORCIONES DE MEZCLA

Se prepararon en el laboratorio un total de ocho hormigones, cuatro “hormigones de resistencia elevada” típicamente utilizados en elementos comprimidos de la estructura principal, puesta en obra condicionada por la docilidad, que obliga a conseguir consistencia fluidas con relaciones agua/cemento bajas y resistencias entre 40 a 50 N/mm²; y cuatro hormigones “convencionales” puesta en obra convencional, consistencia blanda, resistencias HA-25 a HA-35, típicos de cimentaciones y muros de contención, forjados y losas.

Hormigón 1, relación agua /cemento 0,5 con resistencia característica 40 MPa.

Hormigón 2, relación agua /cemento 0,65 con resistencia característica 30 MPa.

En cada uno de ellos se ha sustituido la fracción gruesa del árido natural en niveles de 0%, 20%, 50% y 100% por áridos reciclados, para determinar la influencia de este en las propiedades mecánicas y deformaciones diferidas del hormigón.

Relación A/C = 0.5		Porcentaje de sustitución de grava reciclada			
Material	unidad	0%	20%	50%	100%
CEMENTO	Kg	380,00	380,00	380,00	380,00
AGUA	Kg	190,00	190,00	190,00	190,00
ARENA	Kg	713,90	744,45	709,54	714,56
GRAVA	Kg	882,20	665,28	414,06	0,00
GRAVILLA	Kg	121,59	91,69	57,07	0,00
GRAVA RECICLADA	Kg	0,00	189,24	471,12	874,04
Pasta/árido		0,45	0,45	0,45	0,45
AG/AF		1,41	1,27	1,33	1,22
Aditivo		0,7%	0,8%	1,1%	1,5%

Tabla 15, Proporciones de Mezcla Hormigón Reciclado de resistencia elevada, relación a/c 0.5

Relación a/c = 0.65		Porcentaje de sustitución de grava reciclada			
Material	unidad	0%	20%	50%	100%
CEMENTO	Kg	275,00	275,00	275,00	275,00
AGUA	Kg	178,75	178,75	178,75	178,75
ARENA	Kg	843,01	877,77	848,60	868,15
GRAVA	Kg	751,96	564,69	349,67	0,00
GRAVILLA	Kg	225,91	169,65	105,05	0,00
GRAVA RECICLADA	Kg	0,00	183,58	454,72	830,11
Pasta/árido		0,36	0,36	0,36	0,36
AG/AF		1,16	1,05	1,07	0,96
Aditivo		0,7%	1,0%	1,5%	2,0%

Tabla 16, Proporciones de Mezcla Hormigón Reciclado convencional, relación a/c 0.65

4.3 FABRICACIÓN DE PROBETAS Y CURADO

La ejecución de estos ensayos implicó realizar 8 amasadas, determinando la consistencia del hormigón fabricado en cada una.

En ellas se fabrican 7 probetas cilíndricas 150x300 mm, en las que se determinó la densidad, la resistencia a compresión y fluencia en compresión. 8 probetas cúbicas 100mm en las que se determina la resistencia a compresión a distintas edades, 2 probetas cilíndricas para permeabilidad y tracción indirecta, 6 probetas prismáticas 100x100x350 mm para determinar la retracción, resultando un total de probetas para este estudio de 184.



Ilustración 92, Fabricación y curado de probetas del estudio

Las probetas fueron fabricadas y posteriormente desmoldadas a 24 horas, llevadas a cámara húmeda 20°C 98%HR hasta la realización de cada ensayo respectivo.

4.4 CARACTERIZACIÓN DE HORMIGÓN.

A los ocho hormigones del estudio, se realizaron ensayos, de consistencia en estado fresco y posteriormente en estado endurecido, compresión, modulo elástico, fluencia, retracción y modulo de rotura.

La consistencia se comprobó por el método del Cono de Abrams, conforme a UNE-EN 12350-2:2006 Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.

El ensayo mas representativo y mas utilizado como método de control de la calidad y caracterización de los hormigones, el de resistencia a compresión, se realizo conforme a la norma UNE-EN 12390-3:2003 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas”.



Ilustración 93, Máquina servo-controlada de ensayo de probetas a compresión

El módulo de Young se calculó conforme a lo dispuesto en la norma UNE 83316:1996 “Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.” Midiendo con ayuda de captadores de desplazamiento y herramientas informáticas pertenecientes al laboratorio de materiales.

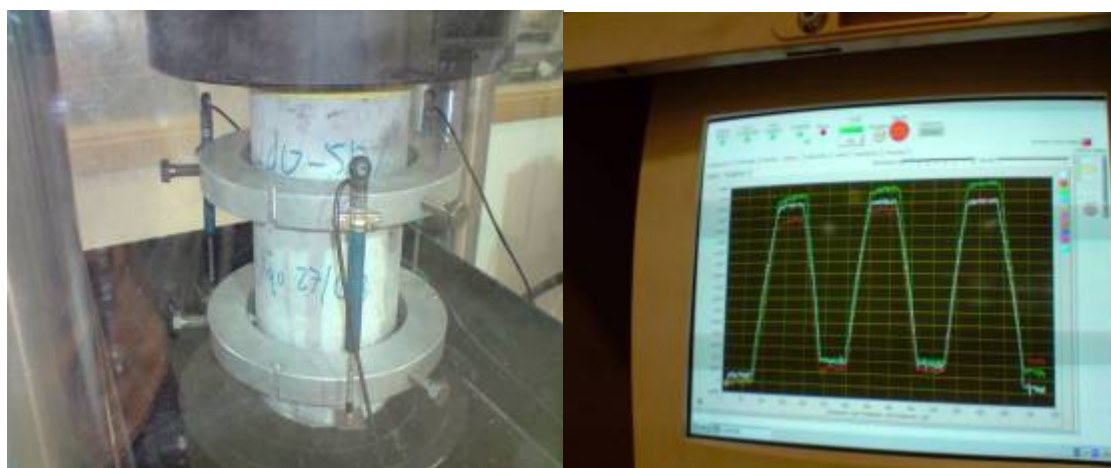


Ilustración 94, Ensayo para determinar Modulo de Young

Para la determinación de la retracción por secado, se utilizó un método basado en

la Norma UNE 83318:1994 “Ensayos del hormigón - *Determinación de los cambios de longitud*” para la realización del ensayo.

Para conocer la fluencia, se utilizó la referencia de la norma ASTM C512-02, Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression, debido a la carencia de normativa local.

4.5 METODOLOGÍA DE ENSAYOS DE RETRACCIÓN Y FLUENCIA DE HORMIGÓN.

A la edad de 24 horas y posterior al desmoldado de los prismas, por medio de pegamento rápido a base de cianocrilato, se adhiere a la superficie del hormigón una serie de chapas de acero que sirven de base de medida para el sistema “Demountable Mechanical Strain Gauge” (Demec). Luego las probetas prismáticas de hormigón prismas son sumergidas en agua a 20°C por un periodo de una hora, tiempo al cual se retiran del agua y se llevan a la cámara húmeda a curado estándar, almacenadas a una temperatura de 20°C y 98%HR por 7 días y 28 días una segunda serie.

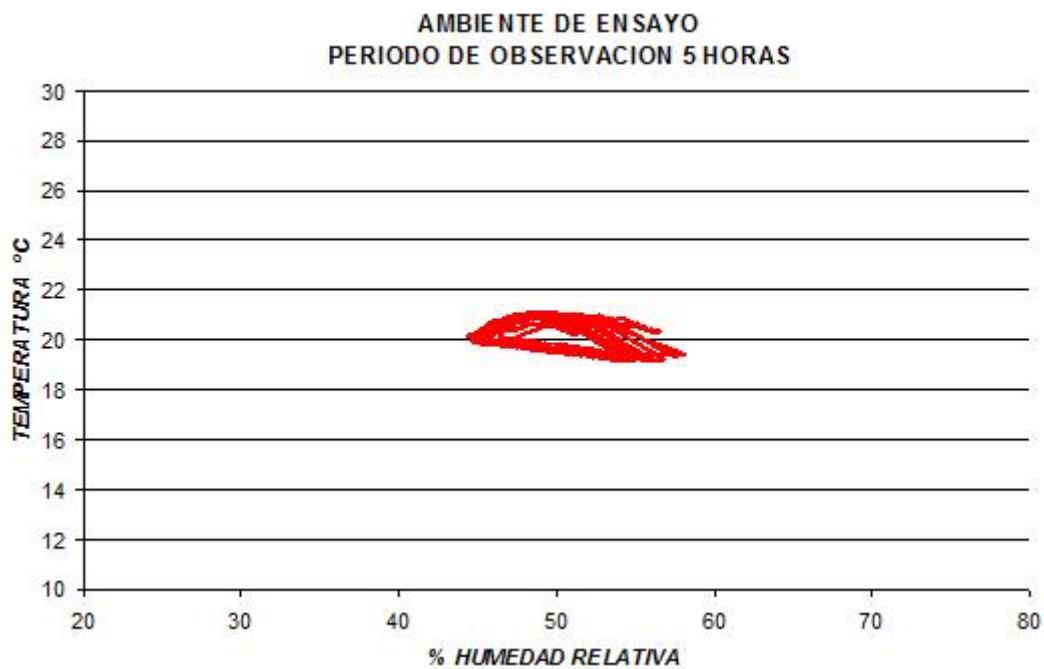


Grafico 1, Condiciones ambientales del ensayo

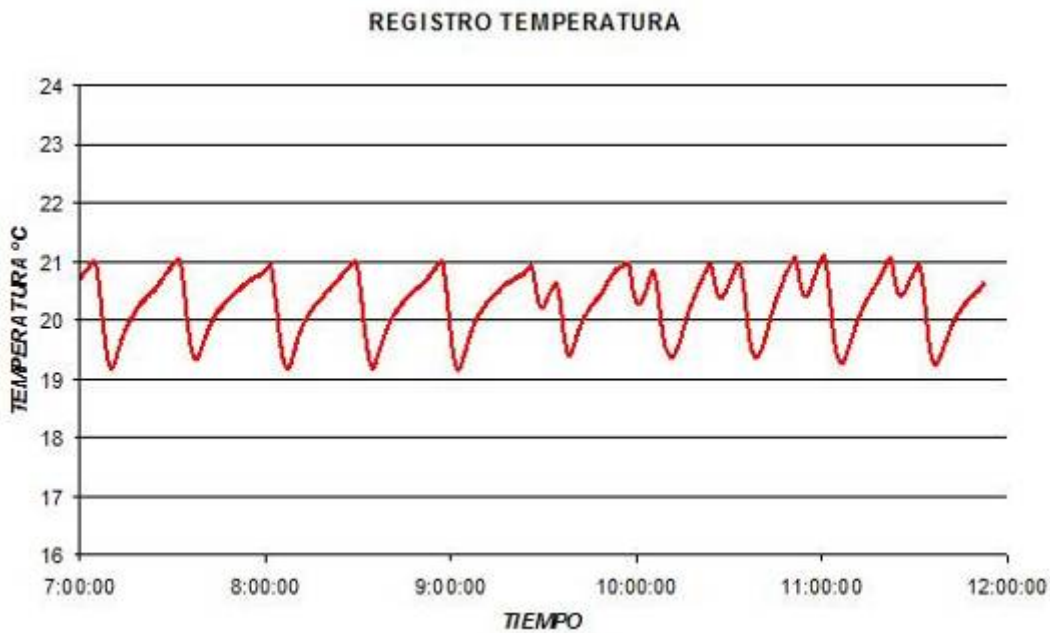


Grafico 2, Condiciones ambientales del ensayo (Temperatura)

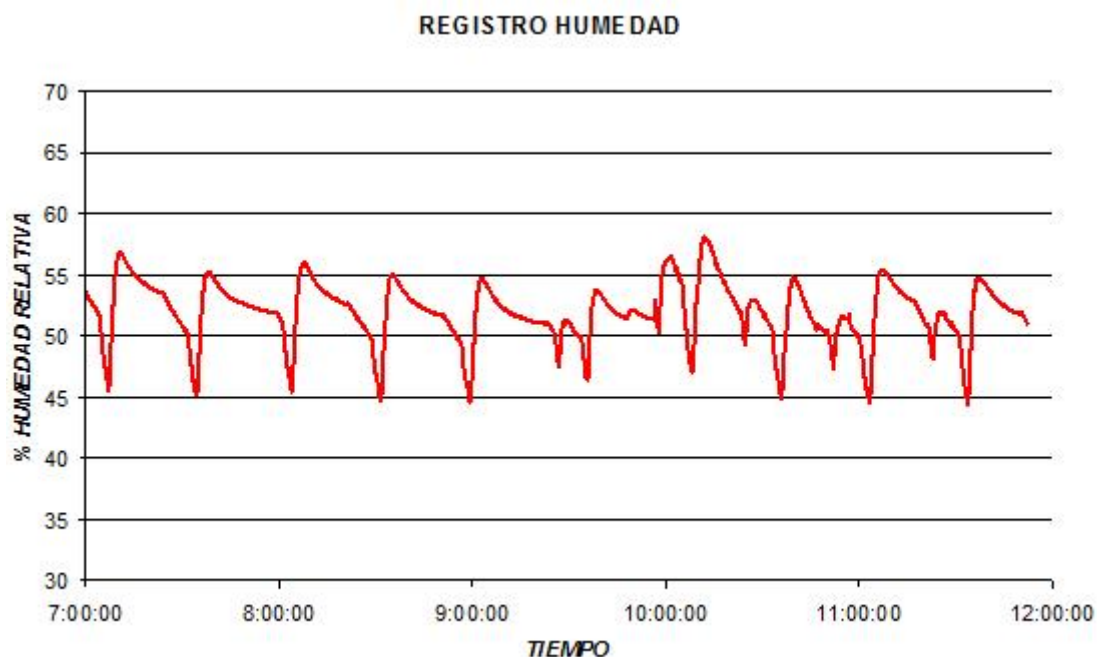


Grafico 3, Condiciones del ensayo (Humedad)

Al cabo de este tiempo, 7 días para una serie de probetas y 28 días para el segundo, se toman las lecturas 0 (inicio del secado) y se llevan a la cámara climática previamente acondicionada a 20°C y 50% HR, donde se registran valores de deformación y cambios de masa de las probetas, a edades de 1, 2, 3, 7, 14, 21, 28, 42, 56, 60, 74, 88, 102 y 120 días.



Ilustración 95, Registro de masa y deformación de probetas en ensayo de retracción.

El equipo de medición DEMEC, tiene una precisión de una micra y se calibra previamente a la toma de medidas con una barra patrón, puesto que la deformación se toma en segmentos de 10 cm y las deformaciones se presentan en $\mu\text{m}/\text{m}$, el error puede ser de $\pm 10 \mu\text{m}/\text{m}$, representando un error relativo bastante alto en los primeros días, pero a tiempos posteriores despreciable.

Para el ensayo de fluencia se construyó una serie de bastidores hidráulicos, con sistema de acción manual de la carga ($P_{\text{max}}: 50 \text{ Ton}$), preparados para mantenerla a lo largo del tiempo de ensayo a través de un acumulador hidroneumático.

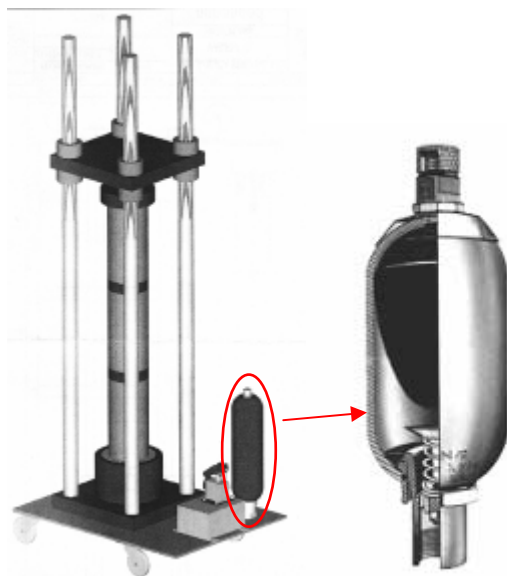


Ilustración 96, Bastidor de fluencia y detalle de acumulador hidroneumático de vejiga

Las deformaciones de fluencia que se presentan son producto de la medición durante 120 días, después de 28 días de curado de cada uno de los hormigones utilizados. Se midieron deformaciones en probetas expuestas y en probetas selladas para ver los efectos del intercambio de humedad con el ambiente y la retención de humedad de los áridos reciclados.



Ilustración 97, Grupo de Bastidores y equipo informático para ensayo de fluencia

Tales deformaciones se miden a través de bandas extensométricas adheridas a la superficie de las probetas cilíndricas y un equipo informático con captación de datos almacena la información para luego ser procesada, a estas deformaciones se les deduce la deformación atribuida a la retracción, medida sobre probetas en iguales condiciones ambientales pero sin estar sujetas a carga alguna.



Ilustración 98, Detalle de bandas extensométricas adheridas a las probetas de hormigón.

CAPITULO 5: EXPERIMENTACIÓN

Por lo demás el hormigón con áridos reciclados es un material poco homogéneo y con un comportamiento de sus propiedades difíciles de predecir, lo que hace que el campo de investigación en el tema sea bastante abierto y atractivo.

La fase experimental de este trabajo corresponde al desarrollo de la propuesta investigativa y comprende los ensayos realizados a los materiales para su caracterización, ensayos al hormigón endurecido, ensayo de deformaciones diferidas, comparación con resultados de predicción numérica.

Puesto que este estudio corresponde a una subtarea del proyecto RECÑHOR, los materiales utilizados y las dosificaciones son los mismos usados por participantes del proyecto en otros grupos investigadores a nivel nacional.

El Cedex, como coordinador global de proyecto fue quien distribuyó los materiales:

- cemento tipo I 42.5 N/SR, endurecimiento normal, resistente a sulfatos, fabricado por Valderribas conforme a UNE 80303-1:2001.
- Áridos naturales de origen calizo, Grava 10/20, Gravilla 4/10, Arena machacada, cantera Mezalocha, Zaragoza.
- Súper plastificante “Sikament 500”, Aditivo de tipo “copolímeros vinílicos modificados” de densidad 1,14 kg/lit y un contenido de sólidos aproximado del 25%. Indicado para la fabricación de hormigones superfluidos.
- Árido reciclado, Gravilla 4/20, planta de reciclaje TEC-REC ubicada en la Ciudad de Madrid.



Ilustración 99, Materiales en estudio: Grava, Gravilla, Arena y Gravilla Reciclada.(izq a der)

5.1 ENSAYOS Y ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES

5.1.1 Densidad de las Partículas y Absorción.

La densidad de las partículas es una de los factores importantes que se usan para determinar las propiedades de los áridos y calcular el diseño de mezcla del hormigón. Cuando en la mezcla de hormigón se sustituyen áridos de diferentes densidades, se influye en el rendimiento, peso unitario del hormigón y cantidad de árido necesario para un determinado volumen de hormigón.

La densidad de las partículas es generalmente afectada por la cantidad de humedad presente y las propiedades geológicas del árido.

En este proyecto la densidad de las partículas fue usada para determinar el volumen y peso del árido necesario para las mezclas de hormigón y como medida de control según recomendaciones nacionales e internacionales para el uso de áridos naturales y reciclados.

Debido a que la cantidad de agua en una mezcla tiene efecto directo sobre el

tiempo de colocación y resistencia a la compresión del hormigón. También el contenido de humedad y absorción de las partículas ha de determinarse primero antes de preparar un diseño de mezcla para un árido particular, para no afectar en todo caso el desempeño del hormigón, midiendo la capacidad de absorción de agua, basada en la condición saturada superficie seca y la condición seca en horno.

Material	Densidad seca (kg/m ³)	Densidad SSS (kg/m ³)	Absorción de agua (%) (24h)
Arena (0/4)	2460	2540	3.22
Gravilla (4/10)	2622	2659	1.42
Grava (10/20)	2647	2673	0.98
Reciclado (4/20)	2338	2460	5,19

Tabla 17, Densidad y absorción de agua de las partículas

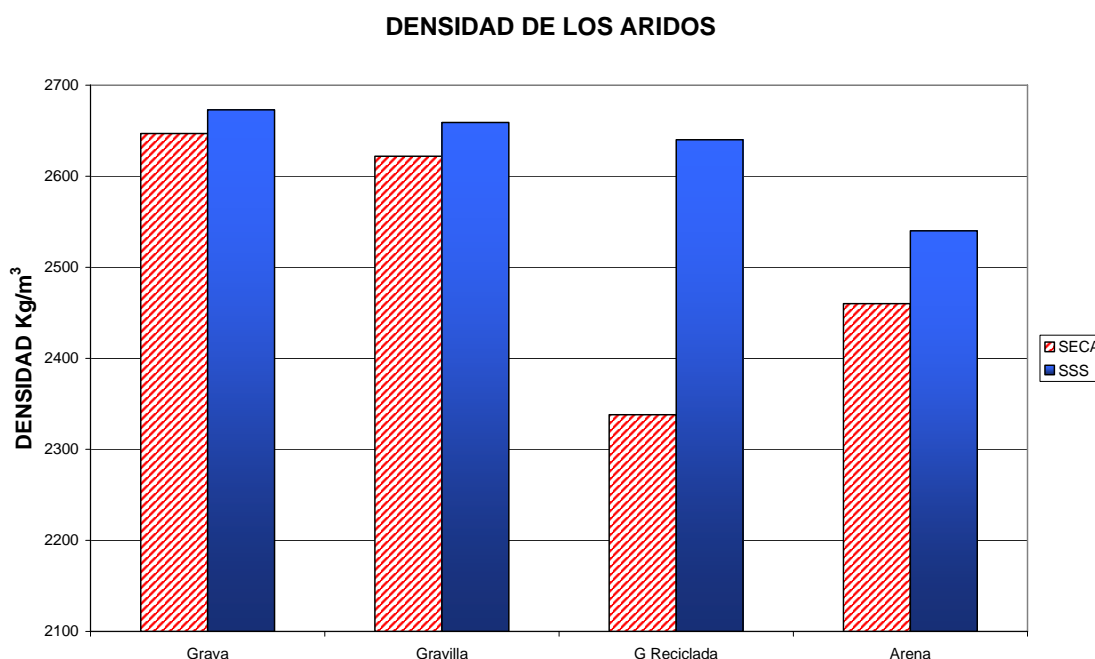


Grafico 4, Densidad de los áridos utilizados en el estudio

Los resultados muestran que el árido reciclado tiene una menor densidad seca que

el resto de árido natural, presentando una densidad 13% menor que la grava, un 12% menor que la gravilla y un 5% menor que la arena. El árido grueso presenta una densidad entre un 7% a 8% mayor que el árido fino, pero con muy poca diferencia entre las densidades de grava y gravilla.

Se puede notar como a pesar que hay gran diferencia entre la densidad seca de los áridos, las densidades saturadas se equiparan mejor, gracias a la mayor absorción del reciclado causada por su estructura porosa.

Los resultados muestran además una capacidad mayor absorción del árido reciclado que los áridos naturales, hasta 5 veces con respecto a la grava, un incremento de absorción de 3.5 veces la de la gravilla y una absorción que sobrepasa el 1.5 veces la de la arena aun teniendo en cuenta que la arena utilizada en este estudio posee una absorción alta. Confirmando la necesidad de adicionar mas agua o aditivos, en las mezclas de hormigón cuando se utilizan áridos reciclados para obtener una manejabilidad similar a la de hormigón convencional.

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 18, Requerimientos Normativos de densidad y absorción para áridos reciclados

Al comparar los valores de densidad y absorción de los áridos reciclados con los requerimientos técnicos o recomendaciones propuestos en las diferentes normativas podemos concluir que el árido reciclado utilizado cumple en su mayoría

con estas y puede ser utilizado en la fabricación de hormigones.

Según las recomendaciones del Rilem el árido reciclado utilizado en este estudio, se podría utilizar en la fabricación de hormigones en masa o hormigones armados, pero con restricción de la clase resistente a C50/62 y cuidando las condiciones de durabilidad, además, según las recomendaciones Japonesas, las cuales son las más drásticas con respecto al uso de áridos reciclados, no se debiera utilizar para fines estructurales por su alta absorción, aunque si para hormigones en masa o losas de hormigón.

5.1.2 Granulometría.

El análisis granulométrico de los materiales es necesario para conocer las proporciones de áridos de la mezcla, ya que depende en gran medida de la distribución de las partículas. Por medio de este análisis se permite definir el exceso de fracciones finas o gruesas y las discontinuidades que pueda presentar en la distribución de tamaños y que puedan afectar el comportamiento de la mezcla en estado fresco y su desempeño en estado endurecido.

En este estudio la determinación de la granulometría de las partículas, se realizó a las diferentes fracciones de árido natural machacado 10-20mm y 4-10mm, árido reciclado 4-20mm y arena natural machacada.

Material	Modulo Granulométrico
Arena	2,85
Grava	7,41
Gravilla	6,15
Reciclado	6,65

Tabla 19, Modulo Granulométrico de los materiales

Fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados

DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS MÉTODO DEL TAMIZADO UNE-EN: 933-1		Laboratorio: Materiales UPV
Identificación de la Muestra: Arena Caliza Machacada		Fecha: = 23 / 04 / 2008 Operador: Jesus O
Método Utilizado	Lavado y tamizado	

Masa Seca Total M_1 =	901
Masa Seca Lavada M_2 =	819
Masa Seca Finos Eliminados Mediante Lavado $M_1 - M_2$ =	82

Tamaño de abertura del tamiz	Masa de Material Retenido (R_i)	Porcentaje de Material Retenido	Porcentajes Acumulados pasantes
mm	Gr	$(R_i / M_1) \%$	$100 - (R_i / M_1) \%$
32	0	0,00%	100,00%
16	0	0,00%	100,00%
8	0	0,00%	100,00%
4	16,00	1,78%	98,22%
2	275,00	30,52%	67,70%
1	233,00	25,86%	41,84%
0,5	135,00	14,98%	26,86%
0,25	76,00	8,44%	18,42%
0,125	49,00	5,44%	12,99%
0,063	33,00	3,66%	9,32%
P	1,00		

Finos (f) que pasan por el tamiz de 63 ϕ m (0.063mm) $[(M_1 - M_2) + P] / M_1 \%$ = 9%

$\phi R_i + P =$	818,00	Modulo Granulometrico	2,85
$[M_2 - (\phi R_i + P)] / M_2 \%$	0,12% < 1%		

CURVA GRANULOMETRICA ARENA

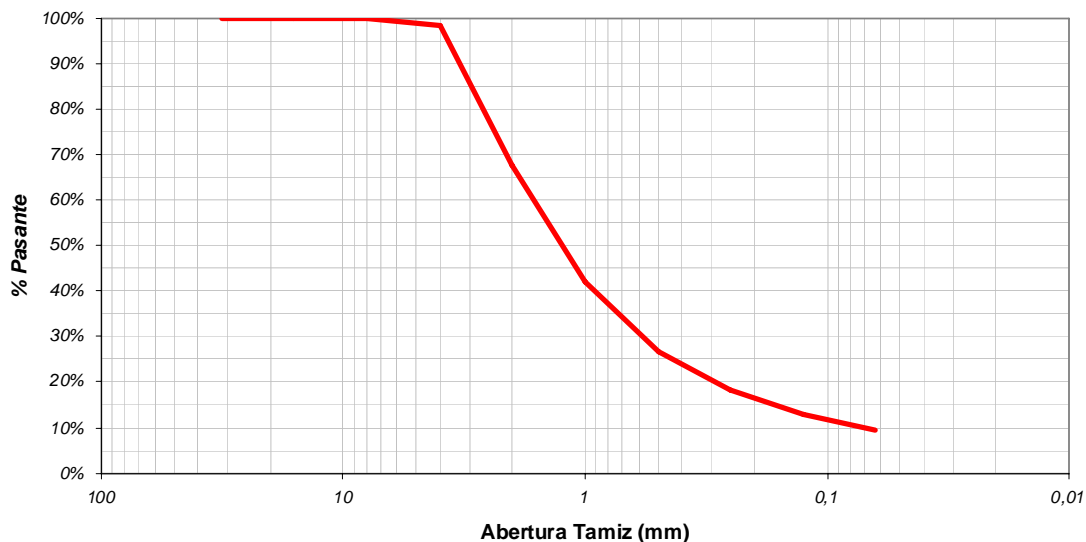


Grafico 5, Análisis Granulométrico Arena

Fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados

DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS MÉTODO DEL TAMIZADO UNE-EN: 933-1		Laboratorio: Materiales UPV
Identificación de la Muestra: Grava Natural Caliza Machacada		Fecha: 23/04/2008 Operador: Jesus O
Método Utilizado	Lavado y tamizado	

Masa Seca Total M_1 =	1895
Masa Seca Lavada M_2 =	1894
Masa Seca Finos Eliminados Mediante Lavado $M_1 - M_2$ =	1

Tamaño de abertura del tamiz	Masa de Material Retenido (R_i)	Porcentaje de Material Retenido	Porcentajes Acumulados pasantes
mm	Gr	$(R_i/M_1) \%$	$100 - (R_i/M_1) \%$
31,5	0	0,00%	100,00%
20	0	0,00%	100,00%
16	982,7	51,86%	48,14%
12,5	716,7	37,82%	10,32%
10	177,7	9,38%	0,94%
8	12,4	0,65%	0,29%
4	2,6	0,14%	0,15%
2	0	0,00%	0,15%
1	0	0,00%	0,15%
0,5	0	0,00%	0,15%
0,25	0	0,00%	0,15%
0,125	0	0,00%	0,15%
0,063	0	0,00%	0,15%
	1		

Finos (f) que pasan por el tamiz de 63 μ m (0.063mm) $[(M_1 - M_2) + P] / M_1 \%$ = 0,11%

$\eta R_i + P =$	1893,1	Modulo Granulometrico	7,41
$[M_2 - (\eta R_i + P)] / M_2 \%$	0,05%		

CURVA GRANULOMETRICA GRAVA NATURAL

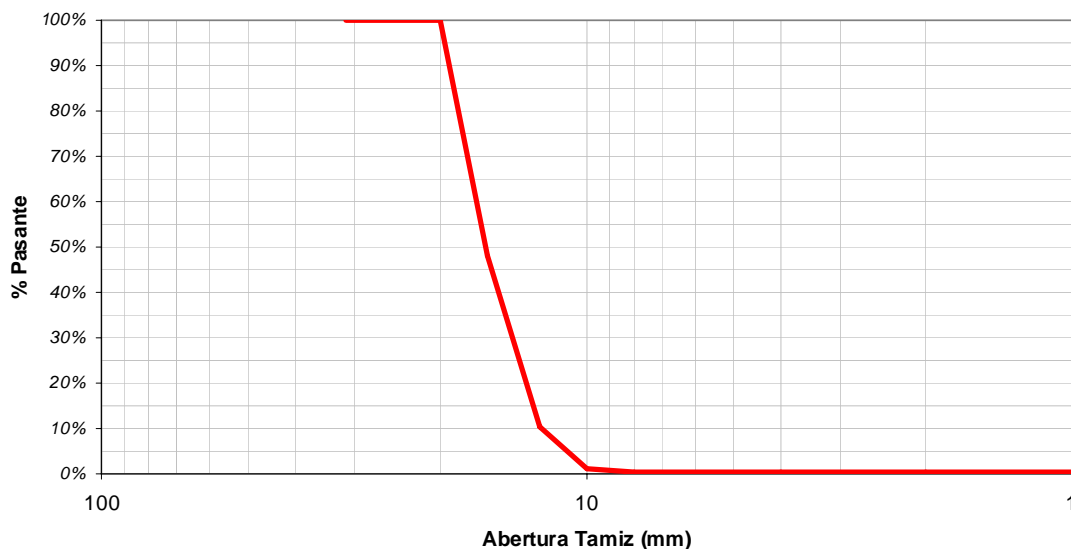


Grafico 6, Análisis Granulométrico Grava Natural

Fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados

DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS MÉTODO DEL TAMIZADO UNE-EN: 933-1		Laboratorio: Materiales UPV
Identificación de la Muestra: Gravilla Natural Caliza Machacada		Fecha: 24 / 04 / 2008
Método Utilizado Lavado y tamizado		Operador: Jesus O

Masa Seca Total $M_1 =$	1599
Masa Seca Lavada $M_2 =$	1573
Masa Seca Finos Eliminados Mediante Lavado $M_1 - M_2 =$	26

Tamaño de abertura del tamiz	Masa de Material Retenido (R_i)	Porcentaje de Material Retenido	Porcentajes Acumulados pasantes
mm	Gr	$(R_i/M_1) \%$	$100 - (R_i/M_1) \%$
16	0	0,00%	100,00%
12,5	0	0,00%	100,00%
10	117	7,32%	92,68%
8	366	22,89%	69,79%
4	944	59,04%	10,76%
2	128	8,01%	2,75%
1	10	0,63%	2,13%
0,5	2	0,13%	2,00%
0,25	2	0,13%	1,88%
0,125	1	0,06%	1,81%
0,063	1	0,06%	1,75%
Fondo	1		

Finos (f) que pasan por el tamiz de 63 μ m (0.063mm) $[(M_1 - M_2) + P] / M_1 \%$ = 1,69%

$\phi \cdot R_i + P =$	1572,00	Modulo Granulometrico 6,15
$[M_2 - (\phi \cdot R_i + P)] / M_2 \%$	0,06% < 1%	

CURVA GRANULOMETRICA GRAVILLA NATURAL

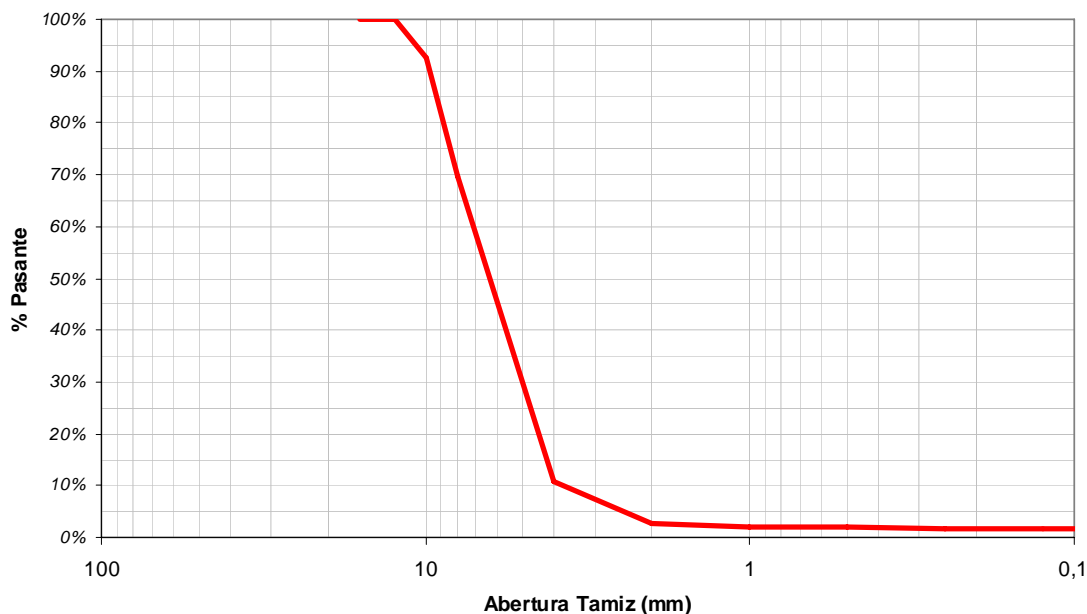


Grafico 7, Análisis Granulométrico Gravilla Natural

Fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados

DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS MÉTODO DEL TAMIZADO UNE-EN: 933-1		Laboratorio: Materiales UPV
Identificación de la Muestra: Arido Reciclado De Hormigon		Fecha: 23 / 04 / 2008
Método Utilizado Lavado y tamizado		Operador: Jesus O

Masa Seca Total $M_1 =$	1978
Masa Seca Lavada $M_2 =$	1975
Masa Seca Finos Eliminados Mediante Lavado $M_1 - M_2 =$	3

Tamaño de abertura del tamiz	Masa de Material Retenido (R_i)	Porcentaje de Material Retenido	Porcentajes Acumulados pasantes
mm	Gr	$(R_i/M_1) \%$	$100 - (R_i/M_1) \%$
32	0,0	0,00%	100,00%
20	0,0	0,00%	100,00%
16	187,7	9,49%	90,51%
12,5	828,7	41,90%	48,61%
10	625,7	31,63%	16,98%
8	264,4	13,37%	3,61%
4	48,6	2,46%	1,16%
2	1,0	0,05%	1,11%
1	2,0	0,10%	1,01%
0,500	4,0	0,20%	0,80%
0,250	4,0	0,20%	0,60%
0,125	4,0	0,20%	0,40%
0,063	3,0	0,15%	0,25%
P	0		

Finos (f) que pasan por el tamiz de 63 ϕ m (0.063mm) $[(M_1 - M_2) + P] / M_1 \%$ = 0%

$\phi \cdot R_i + P =$	1973,1	Modulo Granulometrico	6,65
$[M_2 - (\phi \cdot R_i + P)] / M_2 \%$	0,10% < 1%		

CURVA GRANULOMETRICA ARIDO RECICLADO

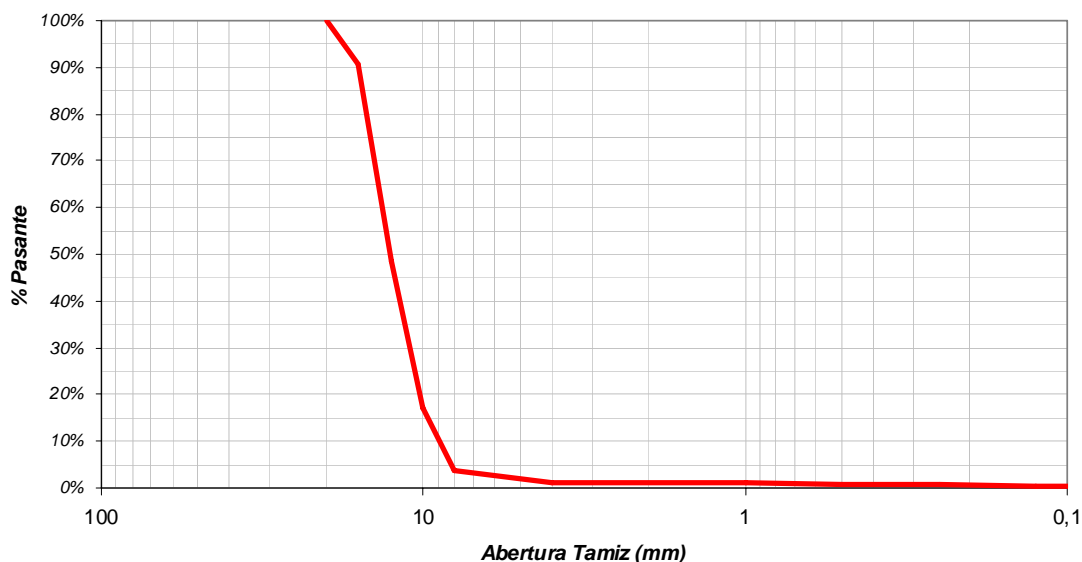


Gráfico 8, Análisis Granulométrico Gravilla Reciclada

Como se observa en los resultados del análisis granulométrico, el árido reciclado tiene una finura intermedia entre la grava y gravilla, esto debido a que la fracción es mas amplia (4mm/16mm).

El modulo granulométrico del árido reciclado en este caso no es bajo, lo que es deseable de cara a la calidad del hormigón, pues como se ha mencionado anteriormente, las fracciones finas del árido reciclados pueden generar problemas de mortero adherido, mayor absorción y menor docilidad de las mezclas.

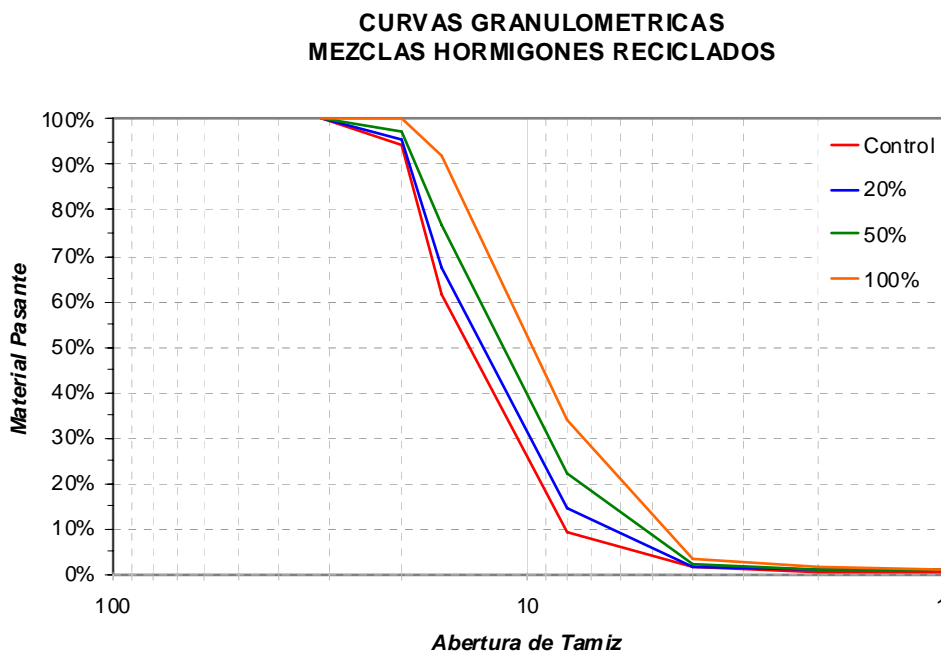


Grafico 9, Granulometría de la mezclas de hormigón

Sin embargo, el aumento en el contenido de áridos reciclados en el hormigón, hace que el modulo granulométrico disminuya, es decir, se hace mas fina la mezcla, lo cual puede hacer disminuir la resistencia.

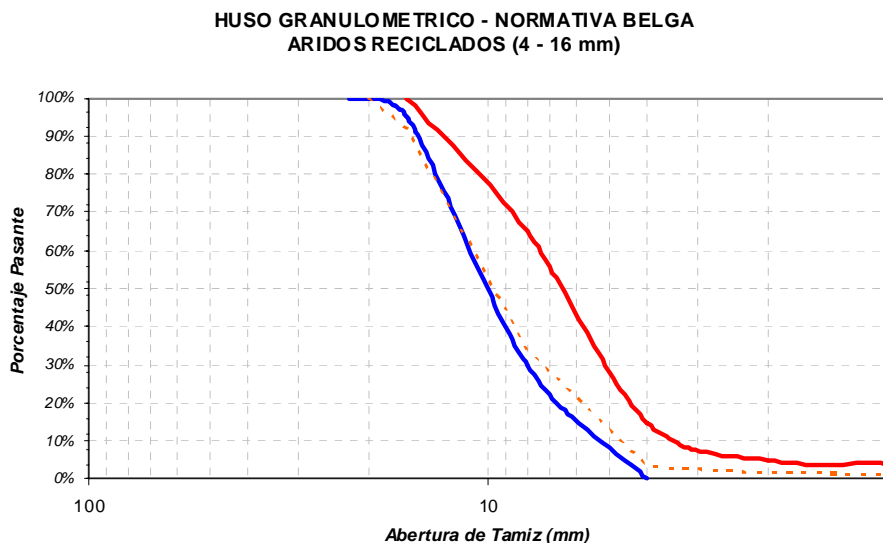


Gráfico 10, Huso granulométrico Belga y áridos reciclados utilizados en el estudio.

Si observamos la granulometría a través del huso de la normativa Belga, clasificamos al árido reciclado mayoritariamente grueso, incluso superando por poco el límite superior del huso.

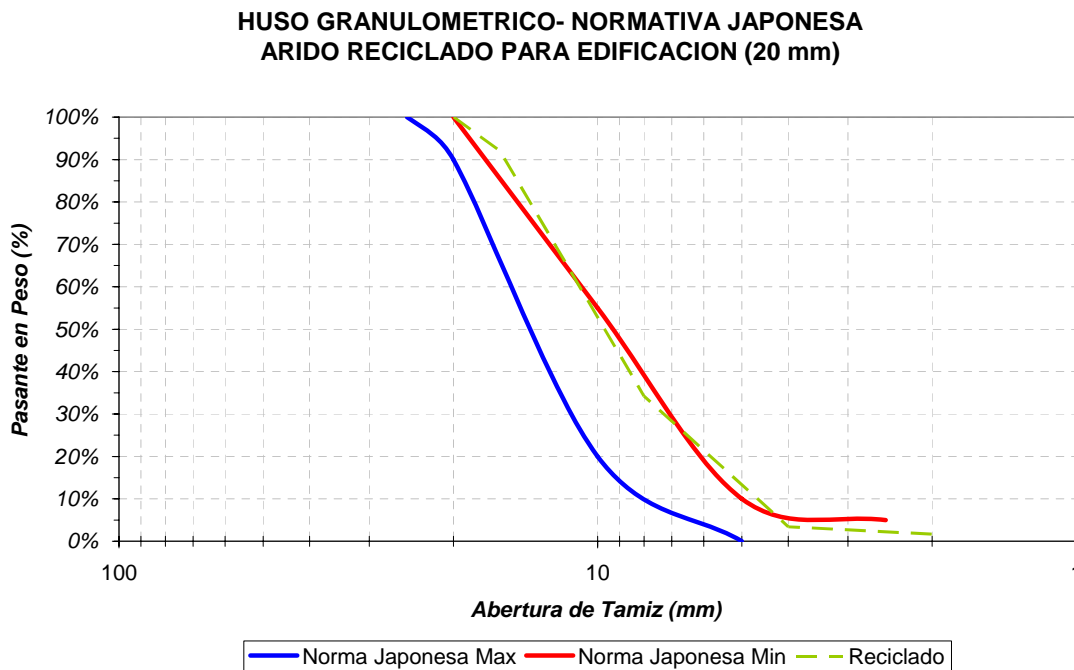


Gráfico 11, Huso granulométrico Japonés y áridos reciclados utilizados en el estudio.

Caso contrario sucede cuando lo observamos a través de la normativa japonesa, el cual lo clasificaría con tendencia a fino, aunque debemos recordar que la curva es para un árido tamaño máximo 20mm y el árido reciclado utilizado es un tamaño máximo 16mm.

5.1.3 Mortero Adherido

Como se menciona anteriormente la determinación del mortero adherido se realizó de acuerdo a las recomendaciones de la universidad de Cataluña.

$$\%mortero = \frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{inicial}} \times 100$$

Ecuación 28, Cantidad de mortero adherido

Fracción de material	Mortero Adherido
4 – 8 mm	31,5%
8 – 16 mm	17,9%

Tabla 20, Contenido de Mortero de los áridos reciclados por fracción

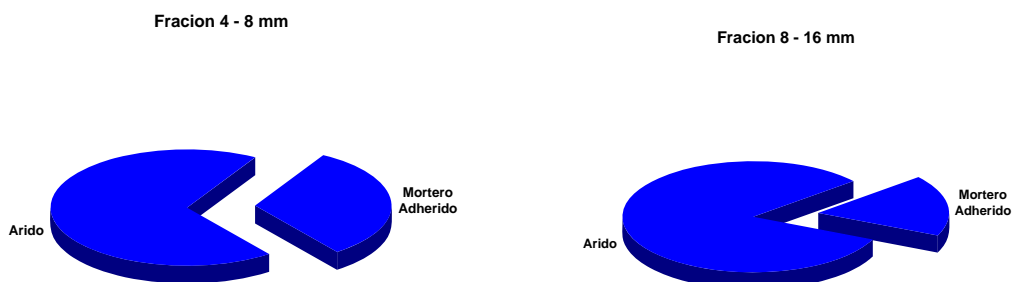


Gráfico 12, Distribución del mortero adherido por fracciones de árido reciclado

El resultado sigue la tendencia referida por la mayoría de los autores, en cuanto a que el mortero adherido es mayor para fracciones mas finas y aunque los valores encontrados en los áridos utilizados para el estudio se encuentran en un rango medio, se esperaban valores mayores relacionados con su alta absorción y baja densidad conforme a diferentes estudios realizados por distintos autores.

5.1.4 Resistencia a al Abrasión.

Posteriormente a realizar el proceso sugerido por UNE – EN 1097-2:99, al pesar las fracciones se observaron los siguientes resultados:

Material	Coefficiente L. A.
Gravilla Reciclada (4/20)	40
Gravilla Natural (4/10)	32
Grava Natural (10/20)	28

Tabla 21, Desgaste en la maquina de los Ángeles de las gravillas natural y reciclada

El valor de coeficiente de desgaste de los Ángeles del árido reciclado es mayor que la presentada en las fracciones de árido natural, tal como reporta la bibliografía e infringiendo el límite permitido por la EHE (<40).

Este valor es similar al encontrado por Sanchez-De Juan (2005) que utilizo la misma fracción (4-16m).

5.1.5 Coeficiente de Forma.

Tras el conteo de partículas clasificadas por medio de la regleta normalizada los

coeficientes de forma obtenidos:

Material	Coefficiente de Forma
Gravilla Reciclada	0.23
Gravilla Natural	0.20
Grava Natural	0.22

Tabla 22, Coeficiente de forma de materiales utilizados

Los valores superan el límite mínimo de la instrucción EHE (0,20), lo que indica que tanto las partículas recicladas como los áridos naturales tienen una forma aceptable para la fabricación de hormigón.

5.1.6 Ensayos al Cemento.

Para el cemento se realizaron muy pocos ensayos, puntualmente de recepción. Ensayo de resistencias mecánica, conforme a la norma UNE-EN 196-1:2005 y el de tiempo de fraguado y estabilidad de volumen, conforme a la norma UNE-EN 196-3:2005.

Resistencia (N/mm ²)	2 días	7 días	28 días
Compresión	16,2	29,5	38,03
Flexión	3,2	5,4	6,9
Tiempo de Fraguado	Inicial		Final
	2:56 horas		3:57 horas
Agujas de Le Chatelier	Frío		Caliente
	0,90 mm		0,30 mm

Tabla 23, Resultados de ensayos realizados al cemento

5.2 ENSAYOS AL HORMIGÓN

Se realizaron ensayos a los ocho hormigones, de consistencia en estado fresco, compresión, tracción indirecta, modulo elástico, fluencia, retracción, curva tensión deformación y modulo de rotura.

5.2.1 Consistencia.

Relación agua/cemento	% A. REICLADO	CONSISTENCIA (mm)
0,65	0%	9
	20%	7,5
	50%	9
	100%	8,5
0,5	0%	14
	20%	13
	50%	15
	100%	13

Tabla 24 Consistencia de hormigón reciclado en cono de Abrams

NIVEL DE ADITIVO HORMIGONES RECICLADOS a/c 0.5 Y 0.65

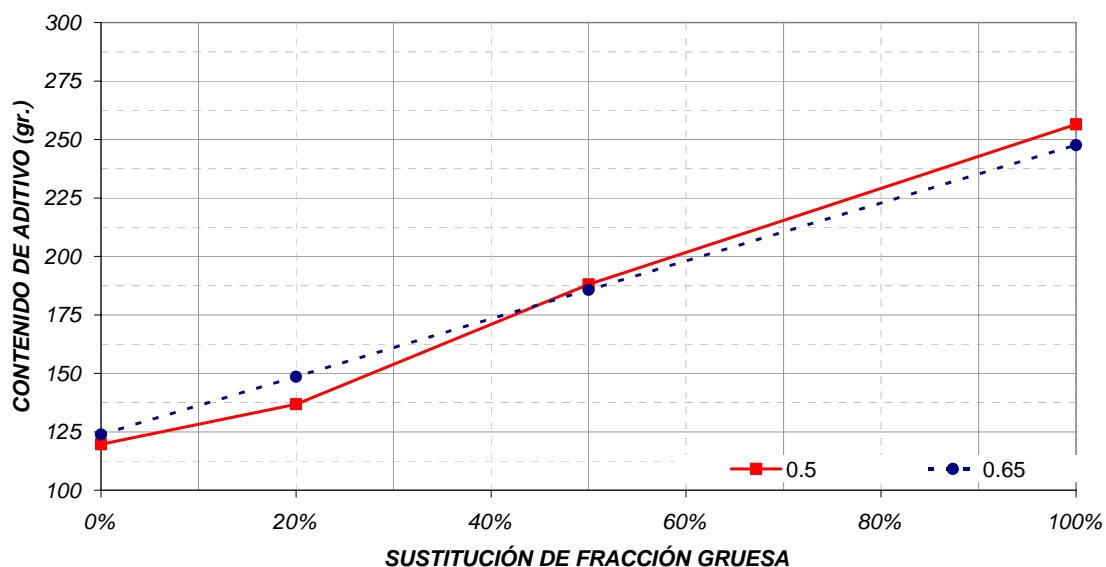


Grafico 13, Demanda de plastificante del hormigón en función del contenido de áridos reciclados

Como era de esperar al sustituir un porcentaje mayor de áridos reciclado la docilidad es menor, lo que explica la mayor demanda de aditivos plastificantes.

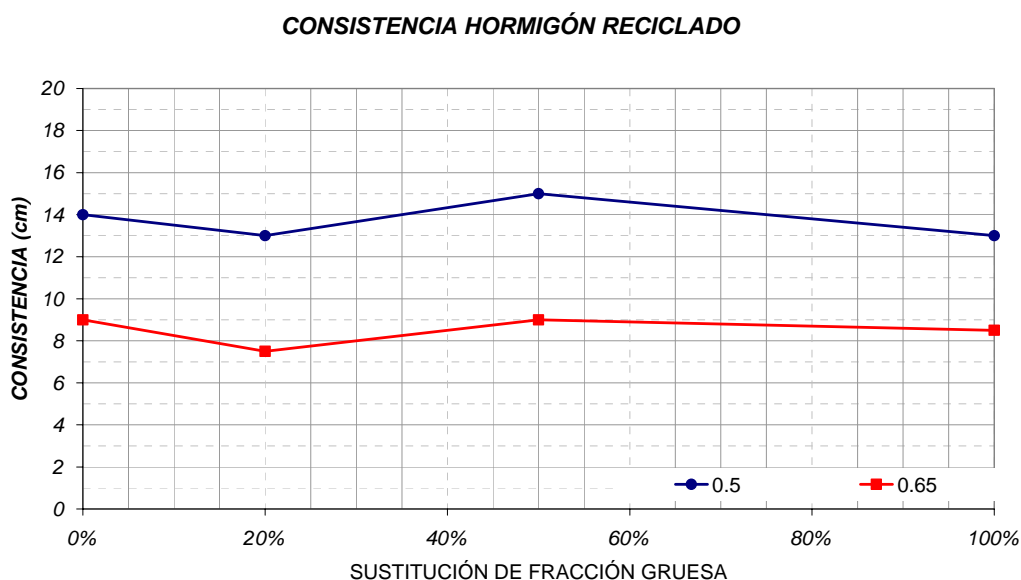


Grafico 14, Consistencia del hormigón reciclado usado en el estudio

El hormigón reciclado con a/c 0,5 presenta una consistencia fluida (14 cm), mientras que el hormigón reciclado con a/c 0,65 presenta una consistencia mayor, (8 cm), aunque la relación agua/cemento es mayor este aumento de consistencia es explicado por la menor cantidad de pasta, no obstante conforme con el diseño de mezcla.

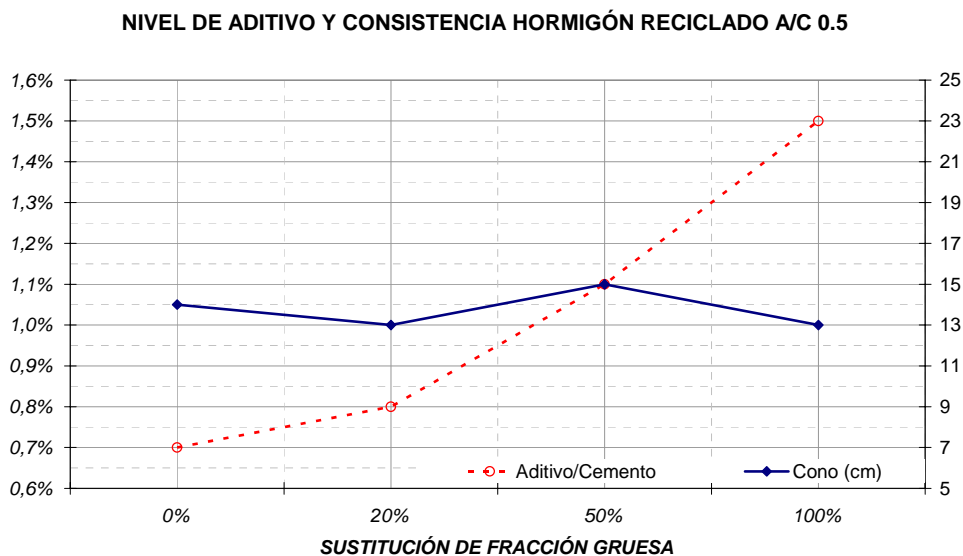


Grafico 15, Relación consistencia – demanda de plastificante de hormigones reciclados a/c 0,5

Se observa una relación bastante lineal entre el nivel de sustitución de áridos reciclados gruesos y la demanda de plastificante.

Posterior a la medida de consistencia se procede al llenado de probetas, compactación y conservación se realizara conforme a la norma UNE-EN 12390-2:2001 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. Desmoldándose a las 24 horas y trasladándose a la cámara de curado hasta el momento de sus respectivos ensayos.

NIVEL DE ADITIVO Y CONSISTENCIA HORMIGÓN RECICLADO A/C 0.65

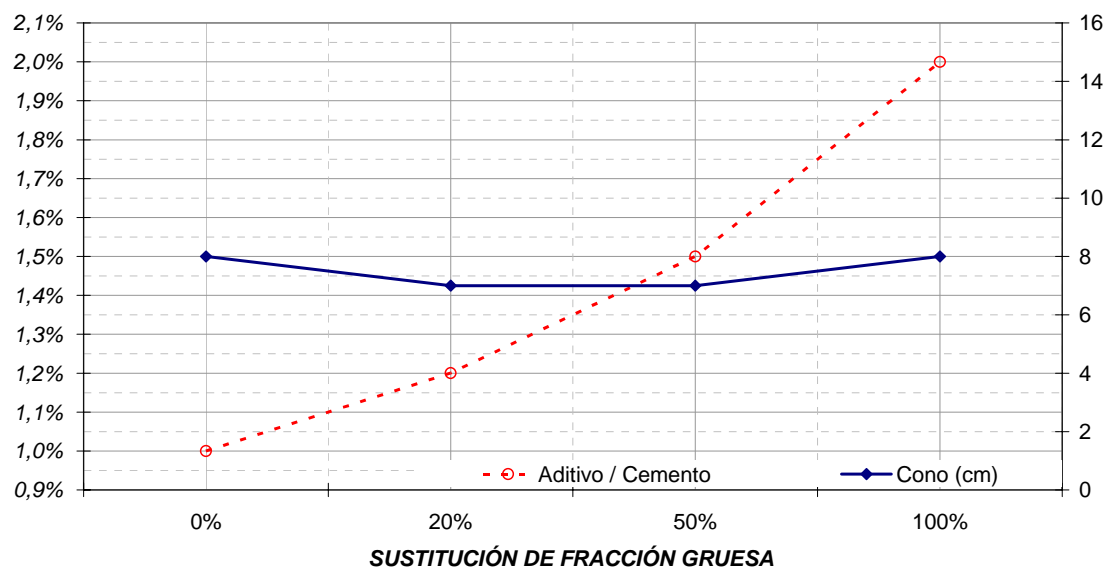


Gráfico 16, Relación consistencia – demanda de plastificante de hormigones reciclados a/c 0,65

5.2.2 Densidad y Resistencia a Compresión.

Posterior a el periodo de curado se retiran las probetas y se procede a calcular su densidad para luego refrentar con mortero de azufre conforme a UNE-EN 12390-3:2003, para cada uno de los ensayos a realizar posteriormente.

Los resultados consignados en la siguiente tabla fueron realizadas a 28 días, y representan el valor medio de 4 probetas.

Relación agua/cemento	% A. RECICLADO	Densidad Aparente kg/m ³	Resistencia a compresión MPa
0.5	0%	2382	49,4
	20%	2369	50,4
	50%	2357	47,1
	100%	2317	43,2
0.65	0%	2380	41,6
	20%	2363	40,5
	50%	2341	38,8
	100%	2311	35,8

Tabla 25, Densidad y resistencia a compresión de hormigón reciclado 28 días

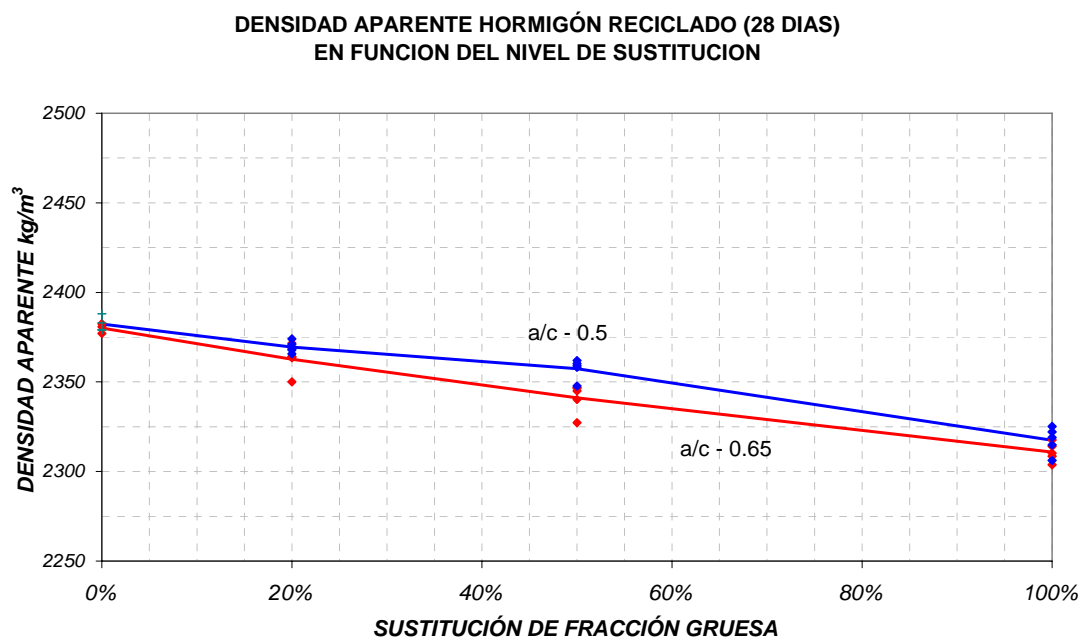


Grafico 17, Densidad del hormigón reciclado en función del nivel de sustitución de áridos reciclados

Como esperábamos la densidad ha disminuido con el aumento en el porcentaje de sustitución de áridos reciclados conforme a los reportes encontrados en la bibliografía, con una ligera mayor densidad el hormigón con relación agua/cemento 0,5.

Puesto que los valores de densidad son muy similares y la resistencia del hormigón alcanza valores de resistencia hasta 14% menor, la relación entre la densidad y la resistencia a compresión no es directa, aunque muestren una relación muy lineal, se observa poca influencia de la relación agua cemento.

La ecuación propuesta por Ziao que define la resistencia a compresión por medio de la densidad, presenta muy buen ajuste con el hormigón relación agua/cemento 0.5, aunque sobrestima las resistencias del hormigón relación agua cemento 0,65.

DENSIDAD - RESISTENCIA DE HORMIGÓN RECICLADO (28 días)

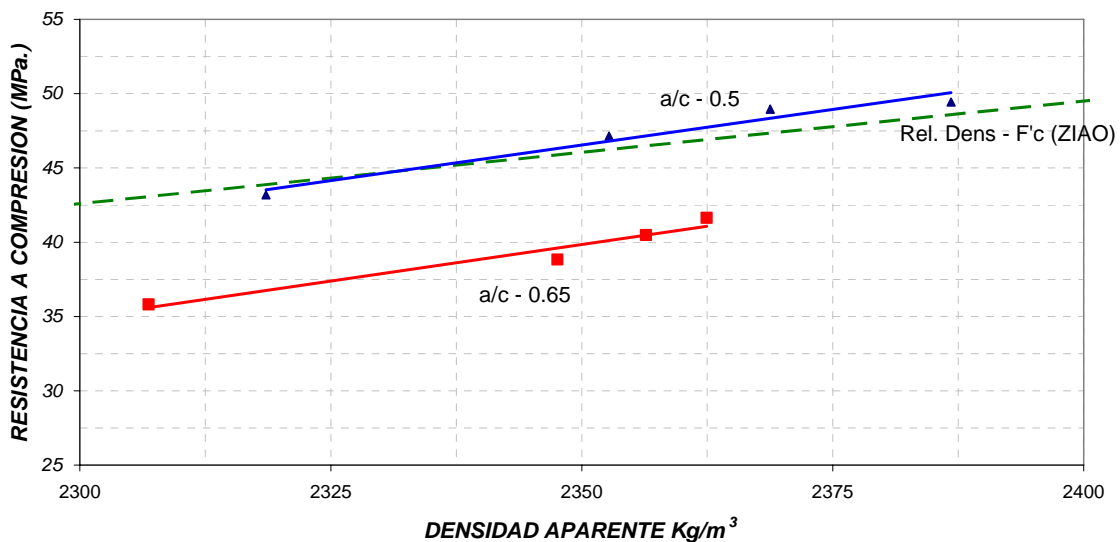


Grafico 18, Relación Densidad – Resistencia a compresión

RESISTENCIA A COMPRESION HORMIGÓN RECICLADO (28 DIAS)

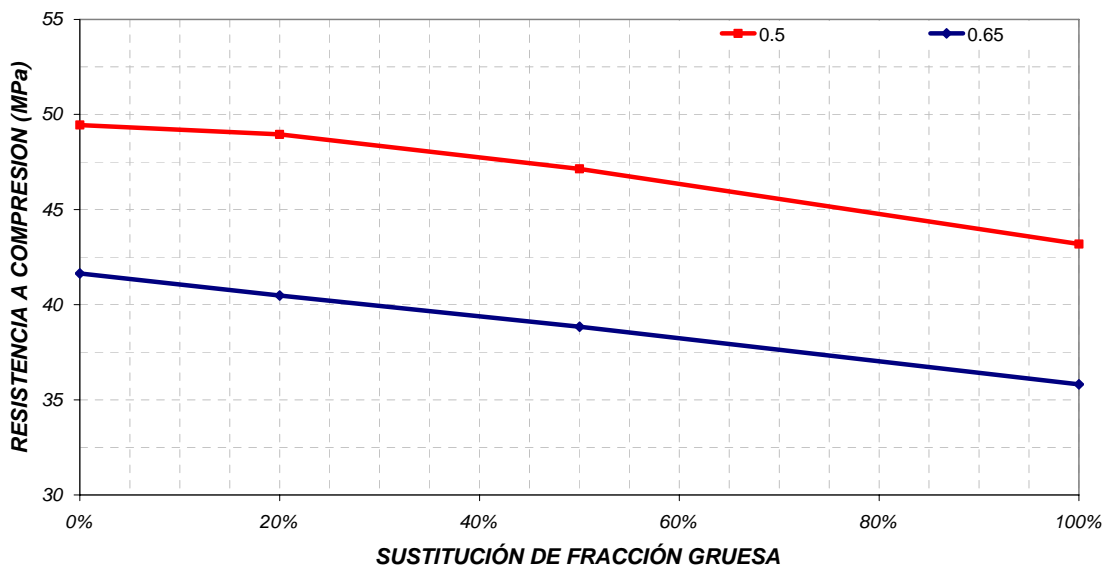


Grafico 19, Resistencia a compresión del hormigón reciclado 28 días.

Como es de esperar según la bibliografía reportada, el aumento en el nivel de sustitución de áridos reciclados disminuye la resistencia a compresión del hormigón al a edad evaluada de 28 días.

5.2.3 Evolución de la Resistencia a compresión

Relación a/c % A. Reciclado		Resistencia a compresión (MPa) 7d	Resistencia a compresión (MPa) 28d	Resistencia a compresión (MPa) 84d	Resistencia a compresión (MPa) 120d
0.5	0%	41,9	49,4	52,8	54,8
	20%	43,5	49,0	53,2	54,2
	50%	42,0	47,1	53,2	53,8
	100%	42,0	43,2	52,6	54,1
0.65	0%	35,5	41,6	45,0	45,7
	20%	34,6	40,5	44,7	45,1
	50%	34,1	38,8	44,2	44,8
	100%	34,7	35,8	43,9	44,8

Tabla 26, Resistencia a compresión del hormigón reciclado

EVOLUCION DE LA RESISTENCIA A COMPRESION HORMIGÓN RECICLADO a/c 0.65

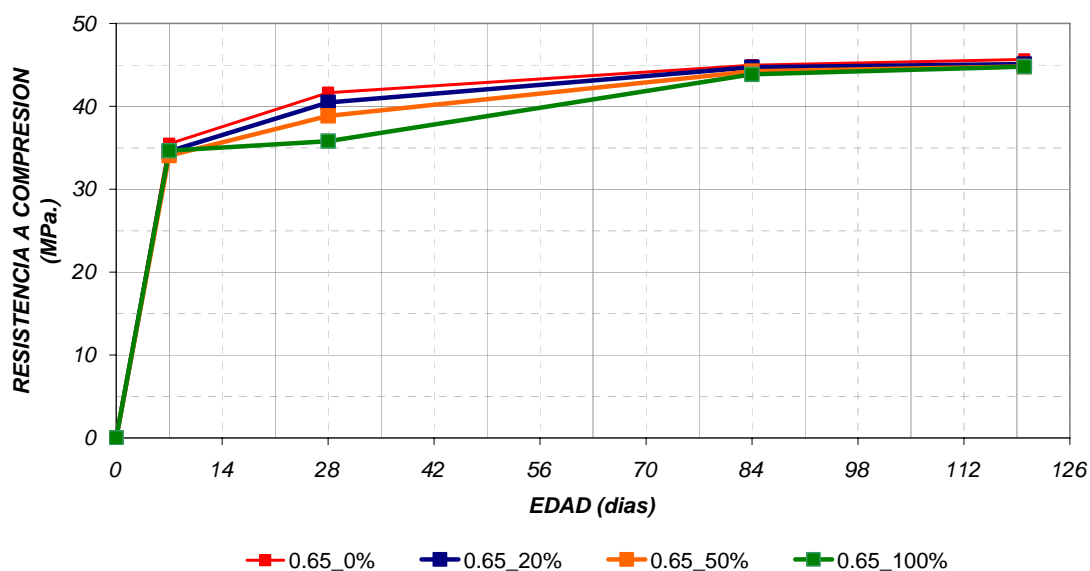


Grafico 20, Evolución de la resistencia a compresión del hormigón reciclado relación a/c 0,65

La resistencia de los dos hormigones reciclados utilizados en este estudio tienen un desarrollo bastante rápido, si bien presentan pequeña dispersión en edades tempranas y a 28 días, a largo del tiempo las diferencias pasan a ser inapreciables.

En los gráficos de evolución de resistencia los dos hormigones tienen un comportamiento similar. Mientras el hormigón de control y el de sustitución 20% alcanzan a 7 días un 85% a 88% de la resistencia a compresión a 28 días, a 84 días alcanza un 107%-110% y a 120 días entre un 110% y 111%.

El hormigón con sustitución del 50% alcanza a 7 días un 88% -89% de la resistencia a compresión a 28 días, a 84 días alcanza un 113%-114% y a 120 días 114 a 115% de la resistencia que alcanza el hormigón de control.

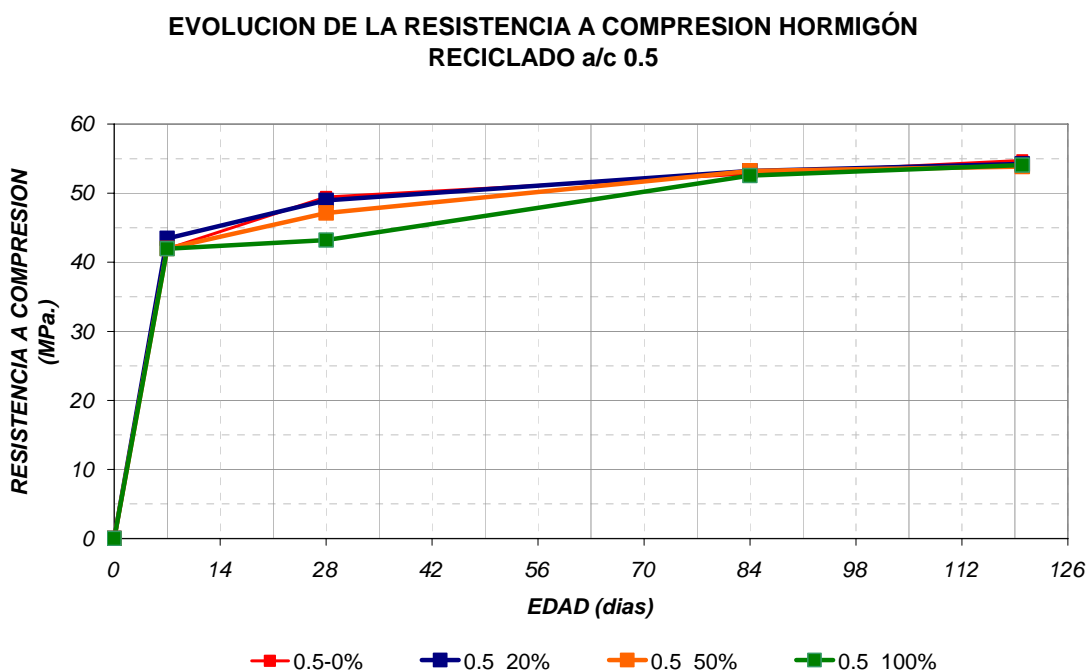


Grafico 21, Evolución de la resistencia a compresión del hormigón reciclado relación a/c 0,5

EVOLUCION DE RESISTENCIA A COMPRESION HORMIGON a/c 0.65

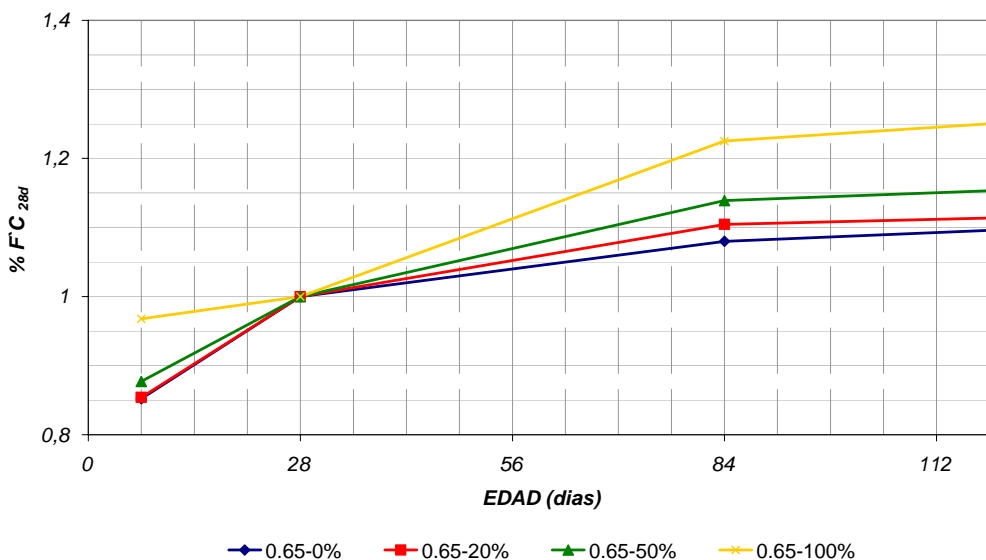


Grafico 22, Evolución de la resistencia a compresión relativa hormigón relación a/c 0,65

El hormigón con sustitución del 100% alcanza a 7 días un 97% de la resistencia a compresión a 28 días, a 84 días alcanza un 122% a 123% y finalmente a 120 días la resistencia a compresión es un 125% de la resistencia a compresión de referencia.

EVOLUCION DE RESISTENCIA A COMPRESION HORMIGON a/c 0.5

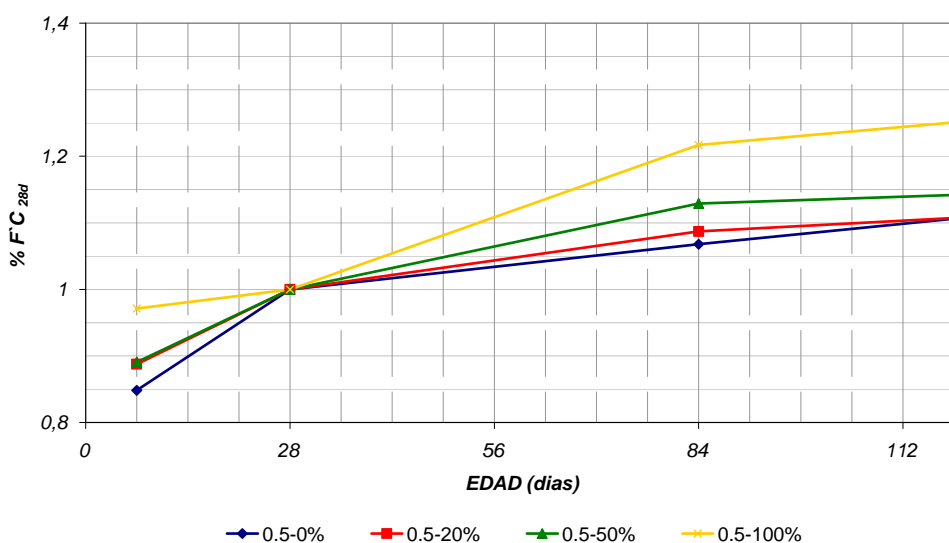


Grafico 23, Evolución de la resistencia a compresión relativa hormigón relación a/c 0.5

La relación agua /cemento al parecer no tiene influencia sobre el desarrollo de la resistencia a compresión de los hormigones reciclados, pues en los resultados de este estudio aunque la resistencia es lógicamente mayor para el hormigón con relación 0,5 no se notan diferencias entre la evolución de resistencia de este y la del hormigón 0,65 de relación agua cemento.

5.2.4 Modulo de Deformación.

Relación agua/cemento	% A. Reciclado	Modulo Elástico (MPa)
0.65	0%	35204
	20%	33186
	50%	30775
	100%	26214
0.5	0%	36678
	20%	33566
	50%	31376
	100%	26965

Tabla 27, Modulo elástico estático del hormigón reciclado

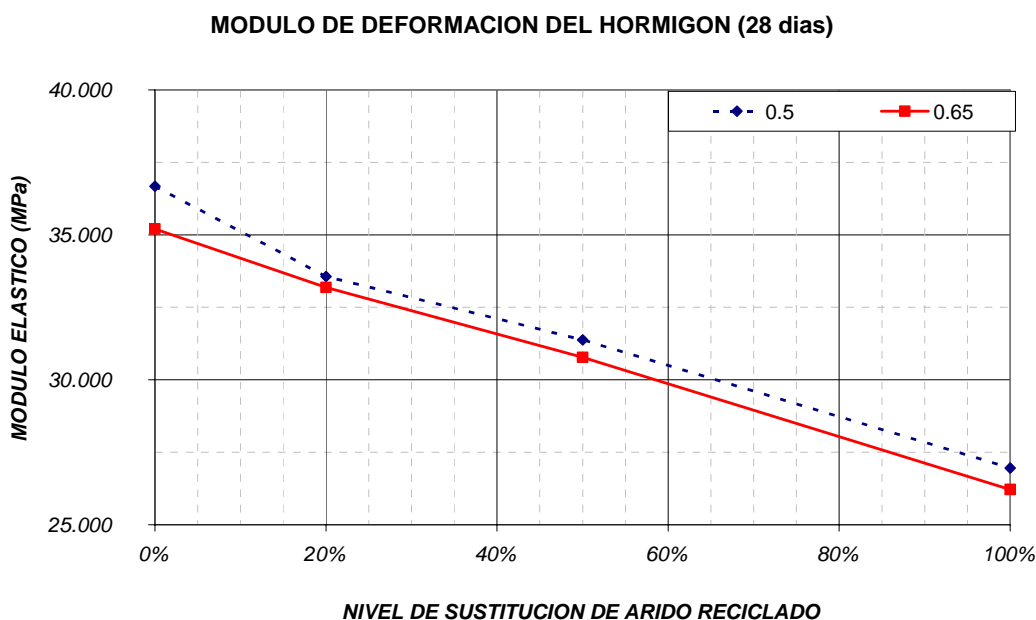


Grafico 24, Modulo Elástico del Hormigón Reciclado

A mayor contenido de áridos reciclados gruesos, el modulo elástico se afecta considerablemente, tal y como reportan los estudios consultados. También se observa como el hormigón de elevada resistencia (a/c 0.5), presenta mayores valores de modulo elástico, aunque siguiendo tendencia similar al hormigón convencional (a/c 0.65).

Relación Agua/Cemento	% A. RECICLADO	Modulo Elástico %
0.65	0%	1
	20%	0,94
	50%	0,87
	100%	0,74
0.5	0%	1
	20%	0,92
	50%	0,86
	100%	0,73

Tabla 28, Modulo elástico estático relativo del hormigón reciclado

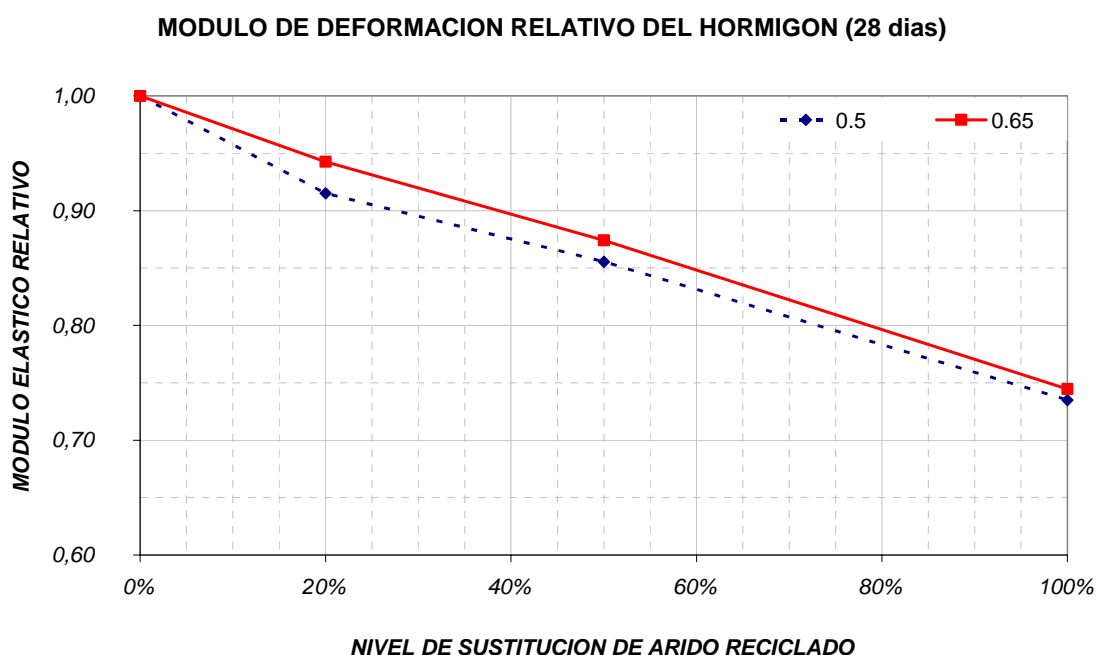


Grafico 25, Modulo de deformación relativo del hormigón reciclado (edad 28 días)

Para sustituciones del 20% de la fracción gruesa por áridos reciclados, se observa disminución de entre 6% - 8% del modulo elástico, así también para cuando la

sustitución es del 50% se nota una disminución del orden de 13% - 14%; cuando la sustitución de la fracción gruesa es total, tenemos un descenso de 26% - 27%.

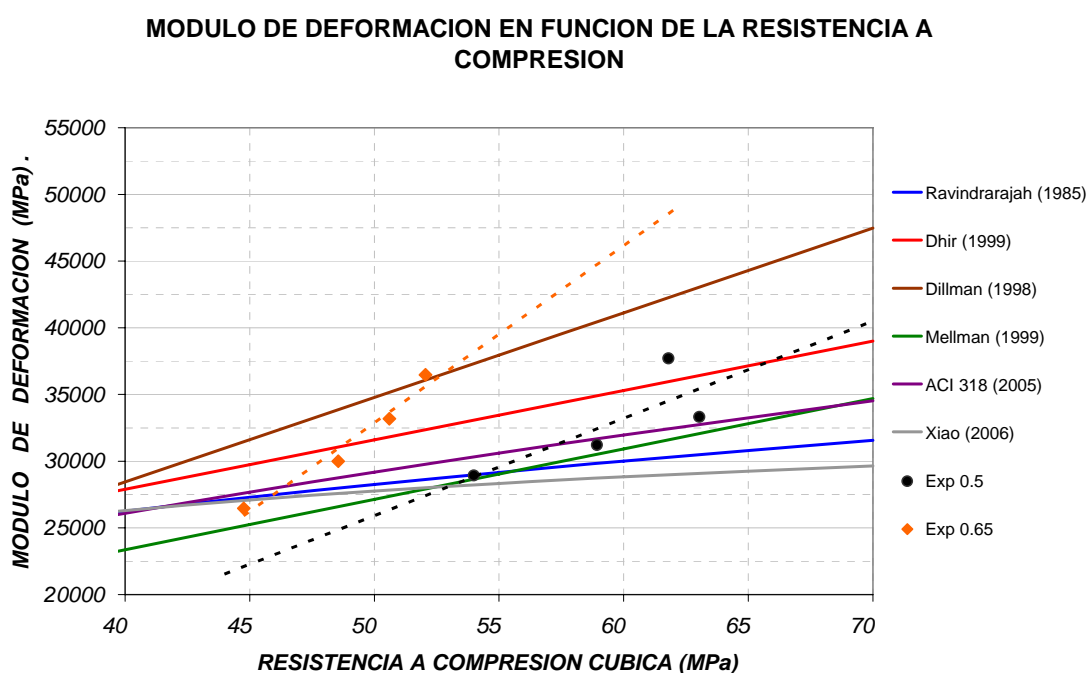


Gráfico 26, Módulo de deformación del hormigón reciclado en función de la resistencia a compresión

Al comparar los valores del módulo elástico obtenido experimentalmente, con los previstos por diferentes propuestas se nota que ninguna hace buena predicción, pues los resultados presentan una mayor pendiente, no obstante para el hormigón con relación a/c 0.5 las propuestas de Xiao (2006), ACI 318 (2005), Mellman (1999) y Ravindrarajah (1985), hacen un acercamiento aceptable.

También se puede utilizar las relaciones propuestas por Kakizaki y Zilch & Roos, los cuales incluyen tanto la resistencia a compresión como la densidad en las ecuaciones del módulo de deformación.

Relación a/c	0.5				0.65			
	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
Kakizaki (1998)	31.405	31.539	30.262	28.232	28.931	28.150	27.189	25.606
Zilch y Roos (2001)	39.614	39.546	38.376	36.149	37.866	36.901	35.789	34.080

Tabla 29, Modulo de Deformación previsto en función de la Densidad y la Resistencia a compresión.

MODULO DE DEFORMACION HORMIGON RECICLADO a/c 0.65 (28 dias)

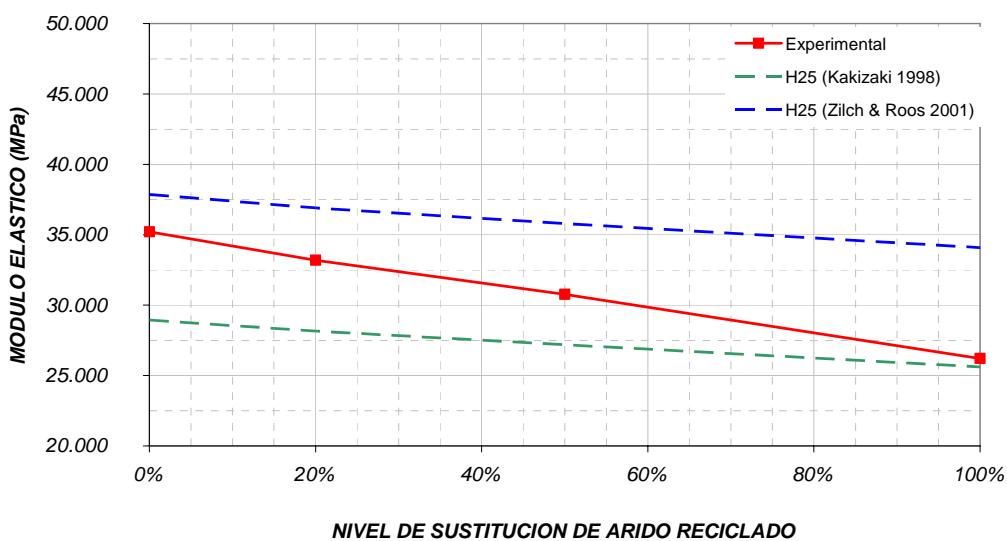


Grafico 27, Modulo de deformación, función de la densidad y la resistencia a/c 0.65

MODULO DE DEFORMACION HORMIGON RECICLADO 0.5 (28 dias)

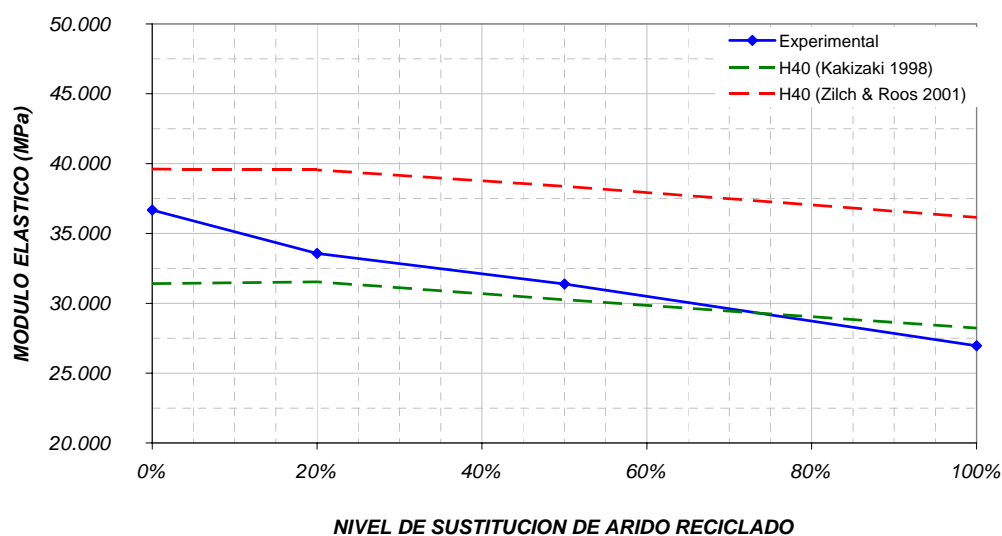


Grafico 28, Modulo de deformación, función de la densidad y la resistencia a/c 0.5

Para los dos hormigones utilizados en el estudio, los valores encontrados de modulo de deformación se encuentran dentro de las dos propuestas, por lo cual para validarlas haría falta un ajuste de pendiente en el factor multiplicador.

Modulo de Deformación 120 Días.

Relación agua/cemento	% A. Reciclado	Modulo Elástico 120 d (MPa)	Modulo Elástico (%)
0.65	0%	36084	-
	20%	34124	-3%
	50%	31180	-11%
	100%	30132	-14%
0.5	0%	37322	-
	20%	36207	-3%
	50%	34763	-7%
	100%	29287	-22%

Tabla 30, Módulo elástico 120 días, probetas expuestas a secado

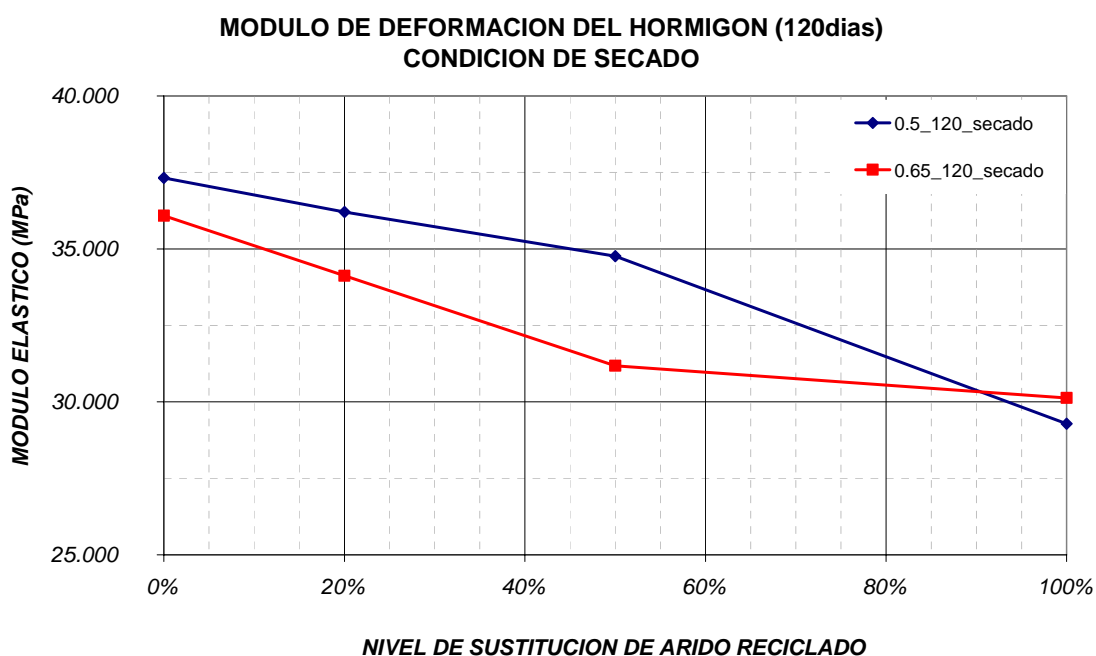


Grafico 29, Modulo de deformación hormigón reciclado 120 días, probetas expuestas a secado

A 120 Días, se ensayaron dos series de probetas cilíndricas para medir su modulo elástico, unas que permanecieron selladas a partir del fin del curado húmedo, impidiendo intercambio de humedad con el ambiente y la otra serie sin protección y por tanto en contacto con el ambiente de secado, 20°C 50% HR.

Relación agua/cemento	% A. Reciclado	Modulo Elástico (MPa)	Modulo Elástico (%)
0.65	0%	38894	-
	20%	33434	-14%
	50%	30528	-22%
	100%	27885	-28%
0.5	0%	42618	-
	20%	37897	-11%
	50%	32821	-23%
	100%	25935	-39%

Tabla 31, Módulo elástico 120 días, probetas selladas

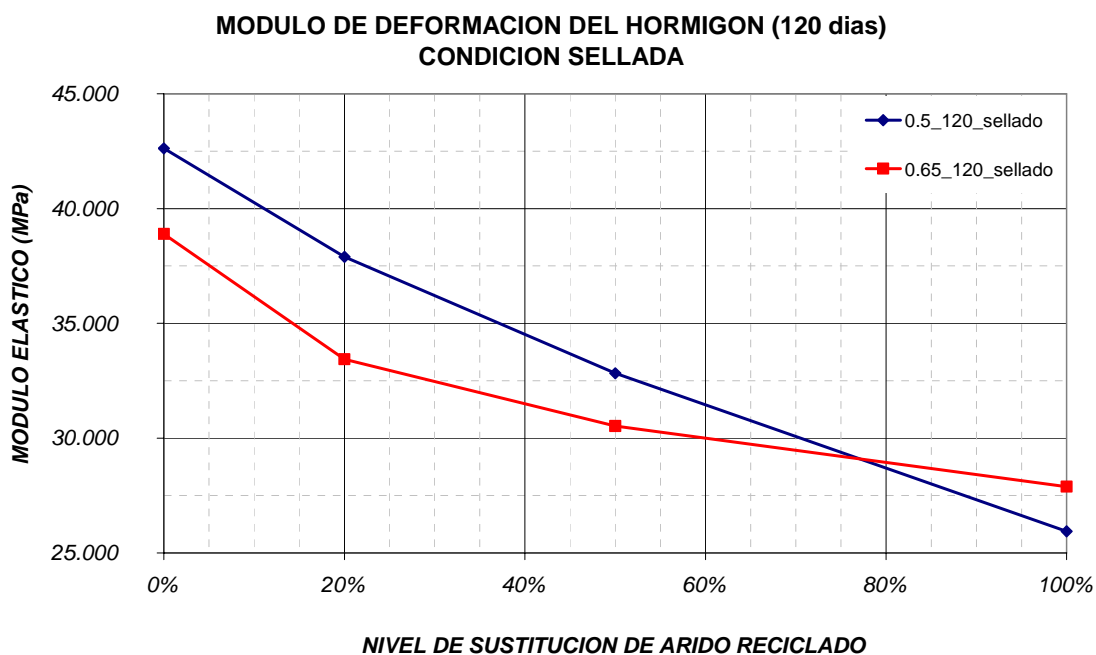


Grafico 30, Modulo de deformación hormigón reciclado 120 días, probetas selladas

En ambas situaciones de curado se observa una notable disminución del modulo

de deformación, mas intenso en condición sellada y relación agua/cemento baja, al aumentar el contenido de áridos reciclados en la mezcla, pues alcanza hasta un 39% de merma.

Esto es puede ser debido a que cuando se protege al hormigón de control de perdidas de humedad, se evade de la ventaja aparente del curado interno que tiene el hormigón reciclado al almacenar agua en su estructura porosa.

Para corroborar se realiza una comparación de los módulos de deformación del hormigón a edad de 120 días en ambas condiciones de curado, con los resultados obtenidos a 28 días.

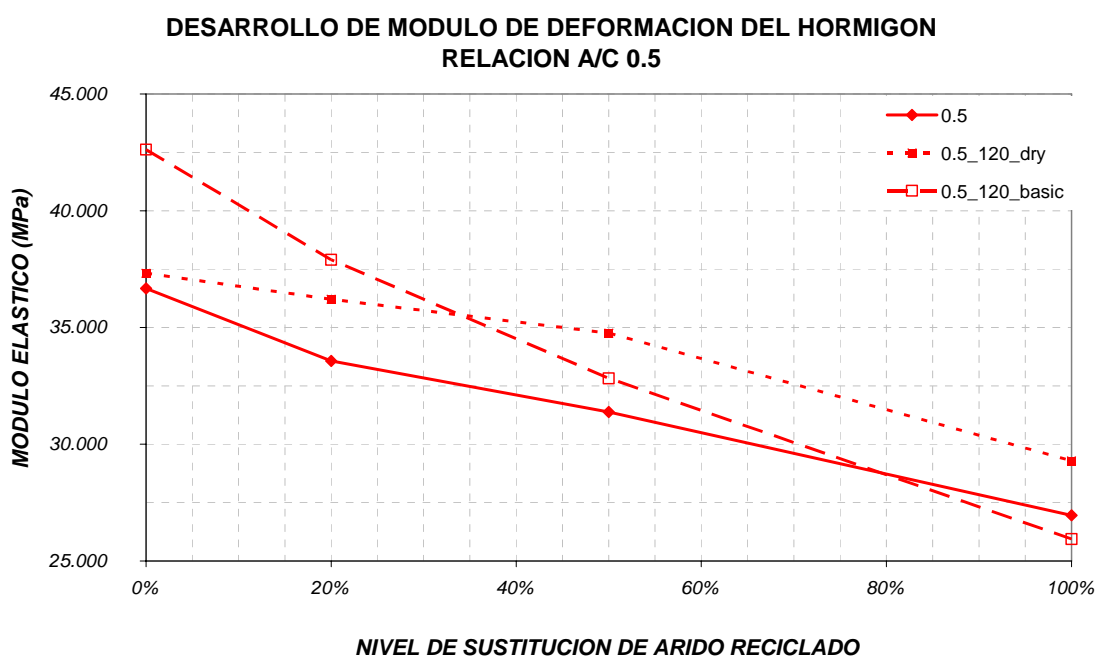


Grafico 31, Desarrollo del Modulo de Young hormigón reciclado relación a/c 0.5 en condiciones de curado diferentes

Se observa como el modulo elástico en ambiente de secado aumenta con la edad, sobretodo en los hormigones con sustitución de áridos reciclados.

Por otro lado los hormigones provistos de protección contra las pérdidas de humedad, favorece el desarrollo sobre todo del hormigón de control, lo que hace que se presenten mayores diferencia con el hormigón reciclado cuando este se cura protegido de la desecación.

Relación agua/cemento	% A. Reciclado	Modulo Elástico SECADO (%)	Modulo Elástico SELLADO (%)
0.65	0%	3%	10%
	20%	3%	1%
	50%	1%	-1%
	100%	15%	6%
0.5	0%	2%	16%
	20%	8%	13%
	50%	11%	5%
	100%	9%	-4%

Tabla 32, Módulo elástico 120 días, relativo al modulo elástico 28 días.

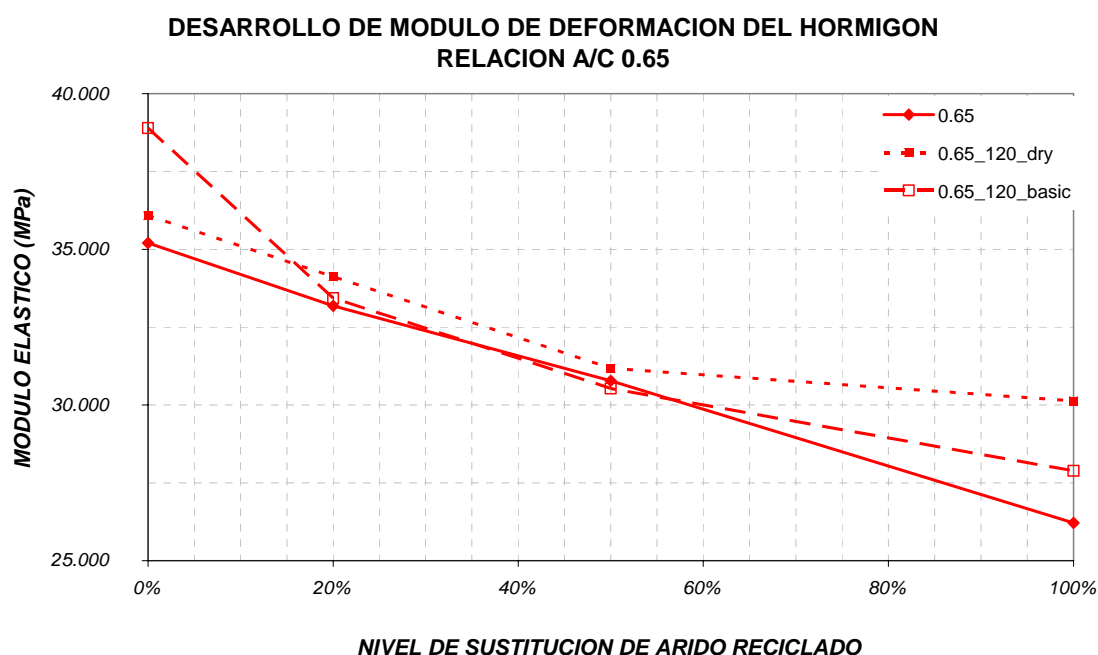


Grafico 32, Desarrollo del Modulo de Young hormigón reciclado relación a/c 0.65 en condiciones de curado diferentes

Esto deja ver la importancia del mayor tiempo de curado húmedo en el hormigón

de áridos naturales, mientras en el hormigón reciclado esto no parece afectar.

5.3 ENSAYO DE RETRACCIÓN POR SECADO

5.3.1 Retracción Hormigón a/c 0.5, Curado 7 Días, Ambiente Estándar

No se registra una diferencia apreciable en las condiciones de humedad de las probetas del hormigón 0.50 a través del tiempo, lo que indica que el secado es uniforme independientemente del contenido de áridos reciclados.

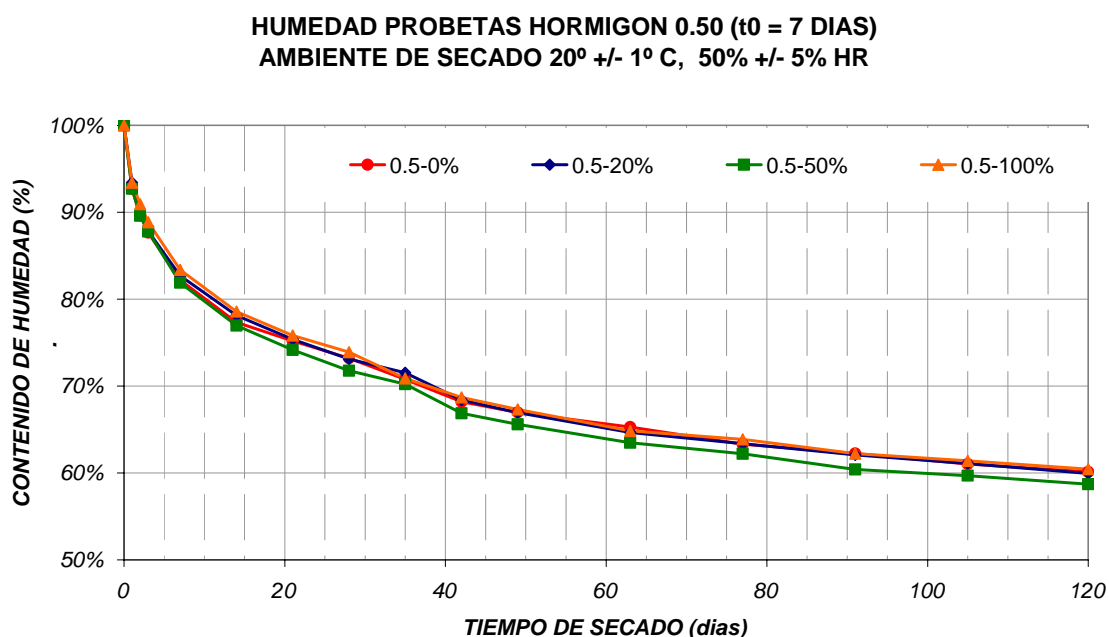


Grafico 33, Condiciones de humedad de las probetas de retracción hormigón 0.50

Hormigón a/c 0.5	Retracción 28 días		Retracción 120 días	
	µm / m	%	µm / m	%
0.5 – 0% - A1 – 7	253	1	423	1
0.5 – 20% - A1 – 7	289	1,15	477	1,13
0.5 – 50% - A1 – 7	330	1,31	565	1,34
0.5 – 100% - A1 – 7	392	1,55	674	1,60

Tabla 33, Retracción del hormigón reciclado a/c 0.50 - 28 y 120 días (t₀=7días).

A través de los resultados experimentales se observa la gran influencia de los áridos reciclados en la retracción de secado del hormigón, con incrementos de hasta un 60% para sustituciones totales de la fracción gruesa.

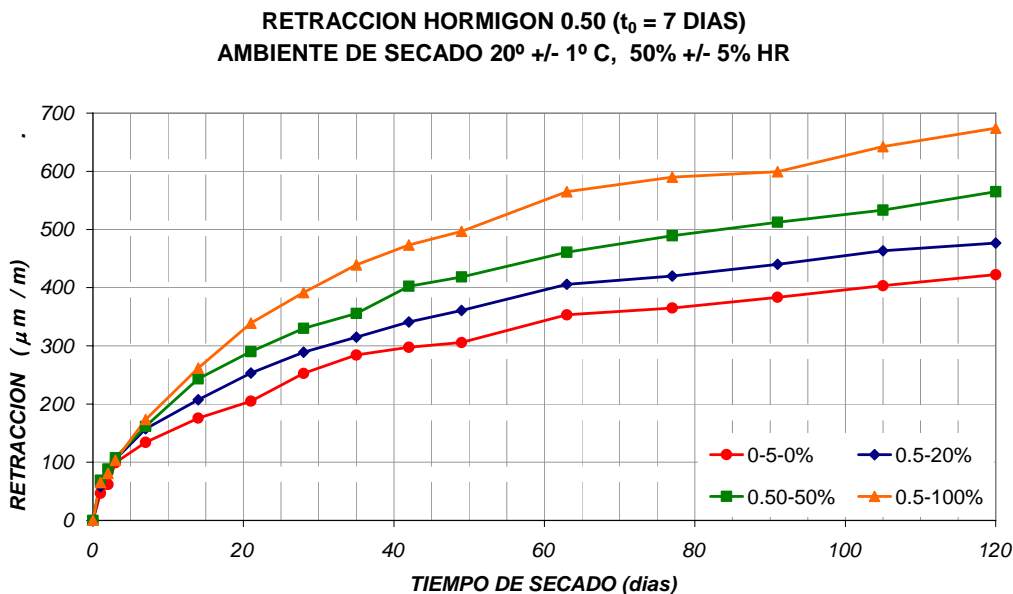


Grafico 34, Retracción Hormigón Reciclado H40, t₀=7 días, Ambiente Estándar.

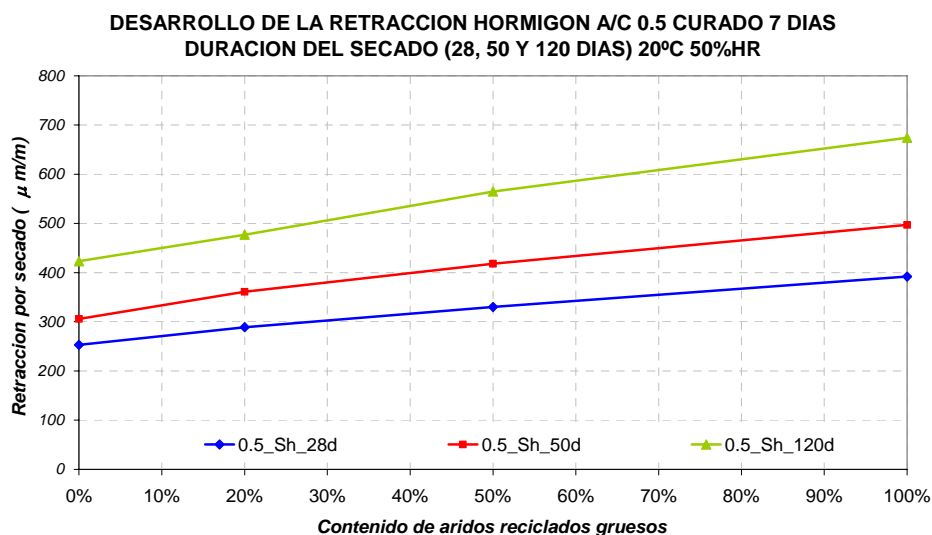


Grafico 35, Retracción hormigón a/c 0.5_7d en función del contenido de áridos reciclados gruesos, a edades de 28, 50 y 120 días

5.3.2 Retracción Hormigón a/c 0.5, Curado 28 Días, Ambiente Estándar.

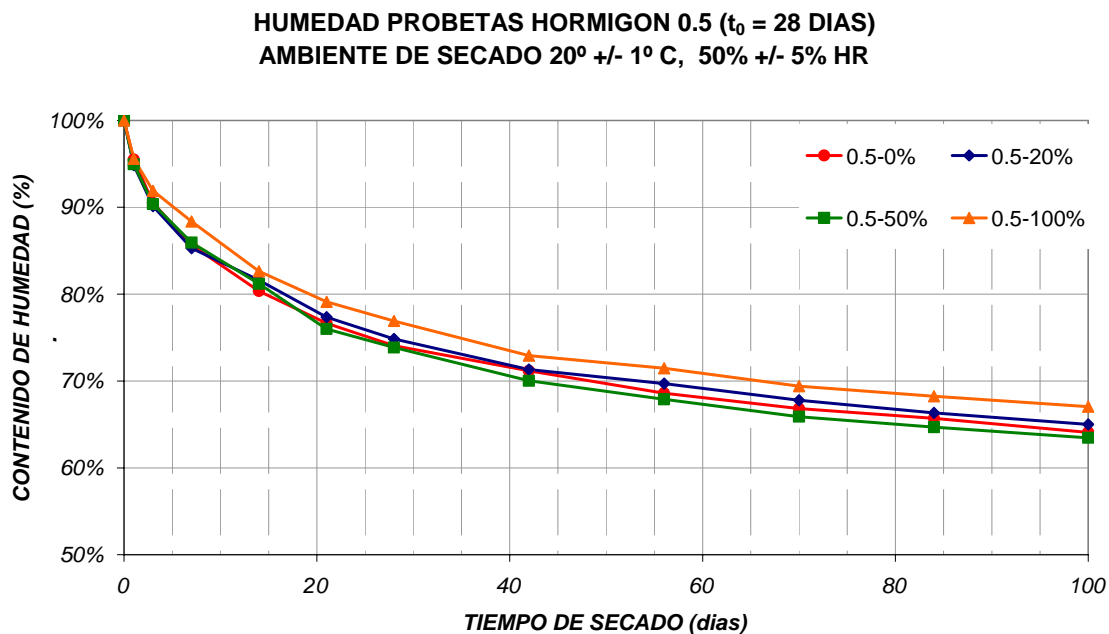


Grafico 36, Condiciones de humedad de las probetas en retracción hormigón a/c 0.5, $t_0=28$ días.

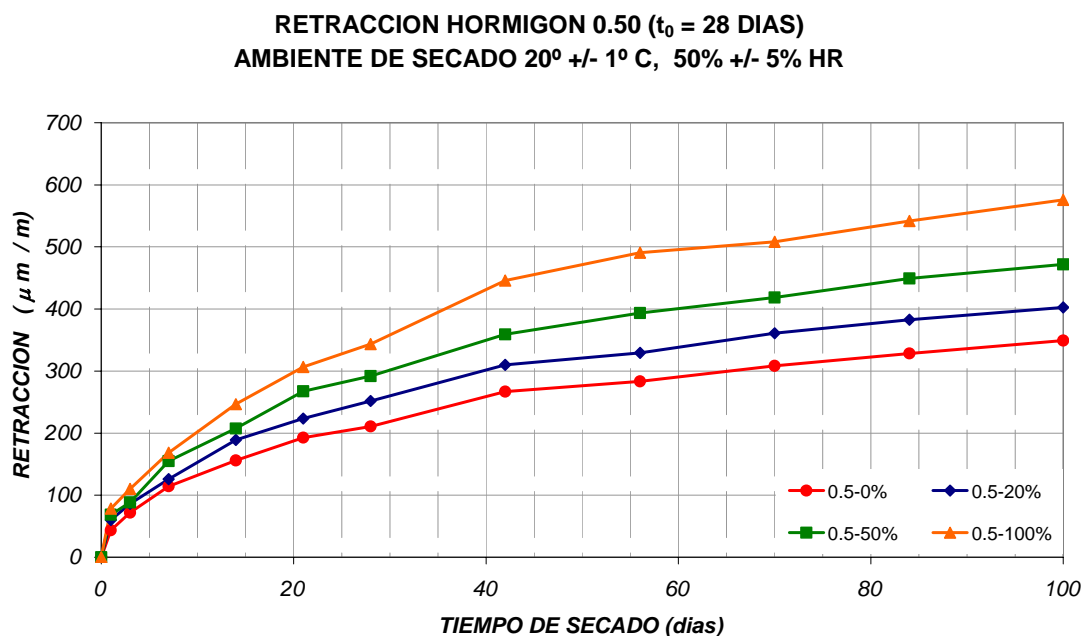


Grafico 37, Retracción Hormigón Reciclado a/c 0.5, $t_0=28$ días, Ambiente Estándar.

En el hormigón a/c 0.50, curado por un periodo de 28 días, al igual que cuando ha sido curado por 7 días, no se registra una diferencia apreciable en las condiciones de humedad de las probetas a través del tiempo de secado, lo que indica que el secado es uniforme independientemente del contenido de áridos reciclados.

No obstante el contenido de humedad presente en el hormigón curado por 7 días a los 100 días de secado es de 60%, mientras el hormigón que ha sido curado por 28 días, para el mismo tiempo, conserva un 65% de humedad.

Hormigón a/c 0.5	Retracción 28 días		Retracción 100 días	
	μm / m	%	μm / m	%
0.5 - 0% - A1 - 28	211	1	349	1
0.5 - 20% - A1 - 28	251	1,19	402	1,15
0.5 - 50% - A1 - 28	291	1,38	472	1,35
0.5 - 100% - A1 - 28	343	1,63	576	1,65

Tabla 34, Retracción absoluta y relativa del hormigón reciclado 0.50 - 28 y 100 días ($t_0=28$ días).

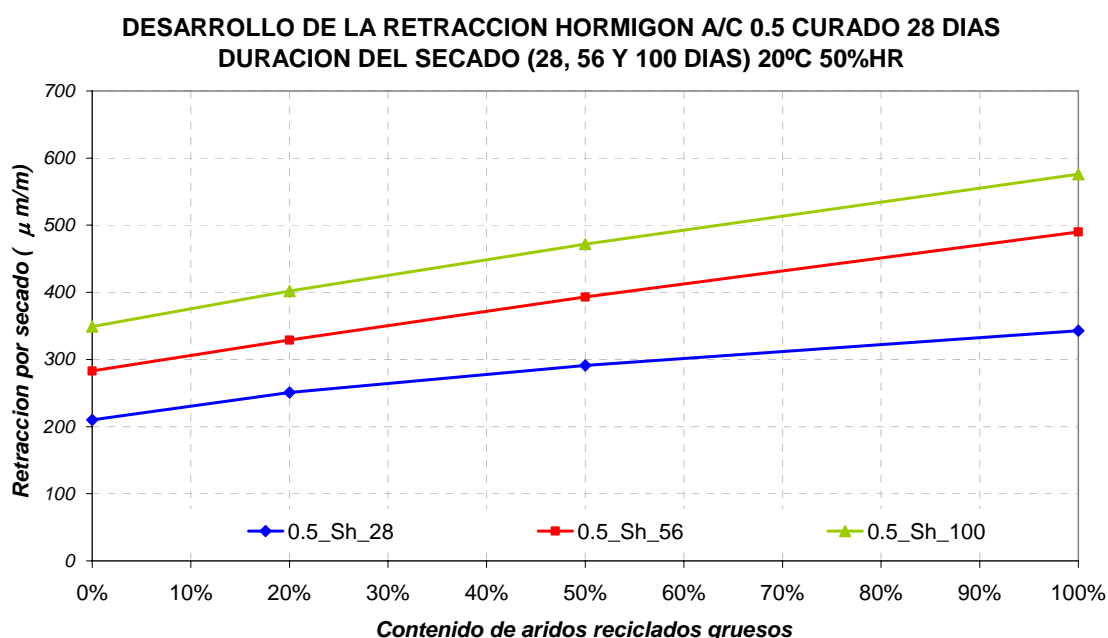


Grafico 38, Retracción hormigón a/c 0.5_28d en función del contenido de áridos reciclados gruesos, a edades de 28, 50 y 120 días

Para el hormigón reciclado con relación agua/cemento 0.50 curado por 28 días, la retracción se ve muy afectada por el contenido de áridos reciclados, obteniendo incrementos medios de 17% para sustituciones del 20% de la fracción gruesa, incrementos de 37% para la sustitución de la mitad del árido grueso y 64% para sustituciones totales de la fracción gruesa.

5.3.3 Retracción Hormigón a/c 0.5, Curado 28 Días, Ambiente 2

Como se observa en el siguiente gráfico, la tendencia de secado del hormigón esta influenciada por la presencia de los áridos reciclados, cuando la sustitución es total se resiste en mayor medida para dejar migrar al exterior el agua contenida. Después de 100 días de secado en un ambiente a 25°C y 70% de humedad relativa, el hormigón 0.50-100% conserva un 7% mas de humedad relativa que el hormigón de control.

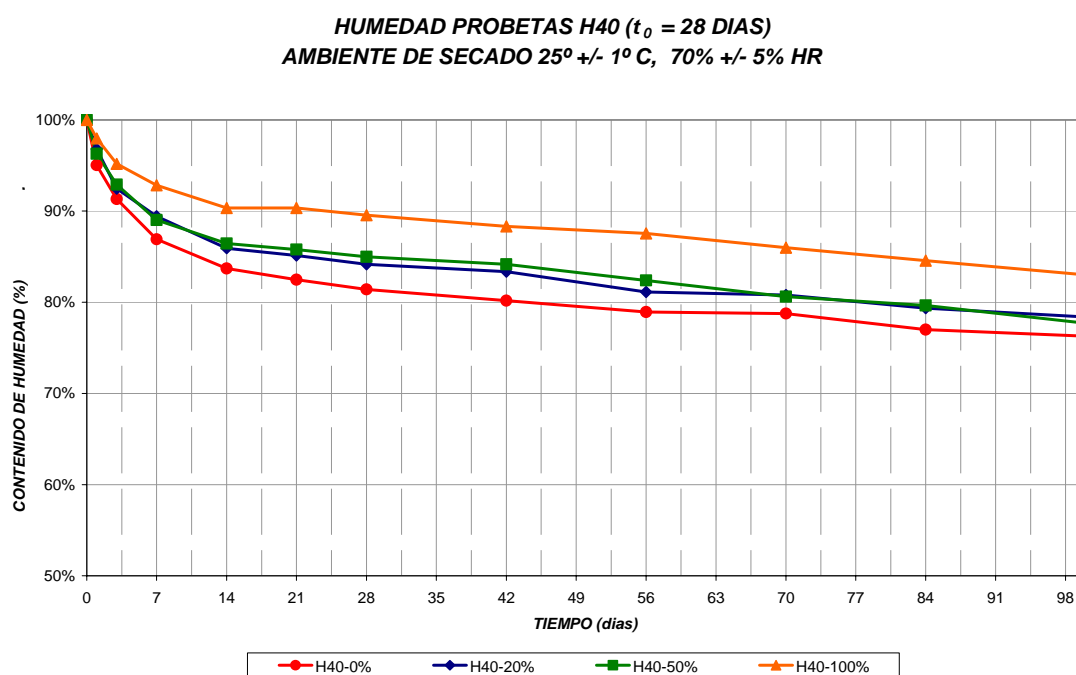


Grafico 39, Condiciones de humedad de las probetas en retracción hormigón 0.50, $t_0=28$ días, expuesto a ambiente de secado 2.

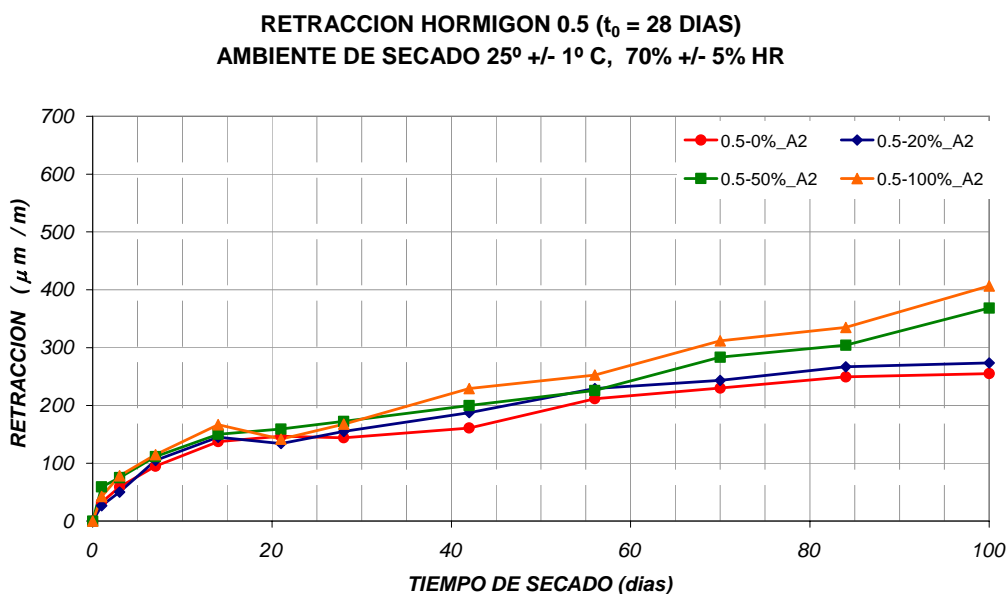


Grafico 40, Retracción Hormigón Reciclado 0.5, $t_0=28$ días, Ambiente 2 de secado.

Hormigón a/c 0.5	Retracción 28 días		Retracción 100 días	
	μm / m	%	μm / m	%
0.5 – 0% - A2 - 28	144	1	255	1
0.5 – 20% - A2 - 28	155	1,08	273	1,07
0.5 – 50% - A2 - 28	173	1,20	368	1,44
0.5 – 100% - A2 - 28	168	1,16	407	1,59

Tabla 35, Retracción hormigón reciclado a/c 0.5 - 28 y 100 días ambiente 2 ($t_0=28$ días).

A 28 días no se nota diferencias entre las diferentes sustituciones, pero ya sobre los 100 días de secado, los coeficientes son similares a los obtenidos en los ensayos en el ambiente 1 y con curado corto (7d) y estándar (28d).

5.3.4 Retracción Hormigón a/c 0.65, Curado 7 Días, Ambiente Estándar.

Las condiciones de humedad relativa de las probetas de hormigón 0.65 no son las mismas. Se observa que a mayor contenido de reciclado, mayor es el agua

retenida, pues los áridos reciclados conservan mayor contenido de humedad que los áridos naturales debido a su estructura más porosa.

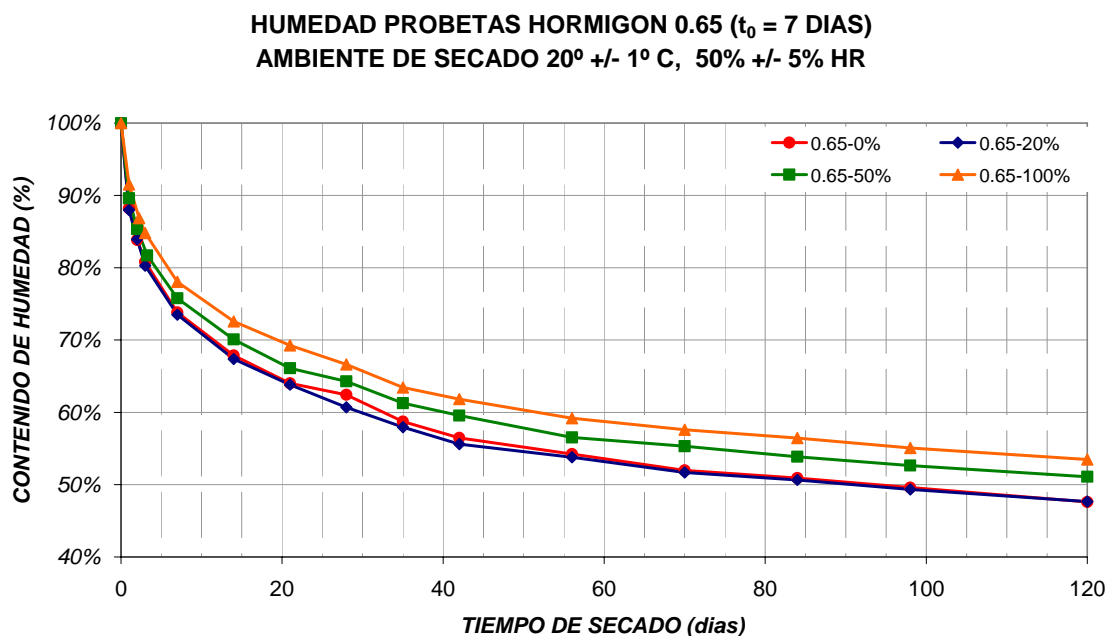


Gráfico 41, Condiciones de humedad de las probetas de retracción hormigón a/c 0.65

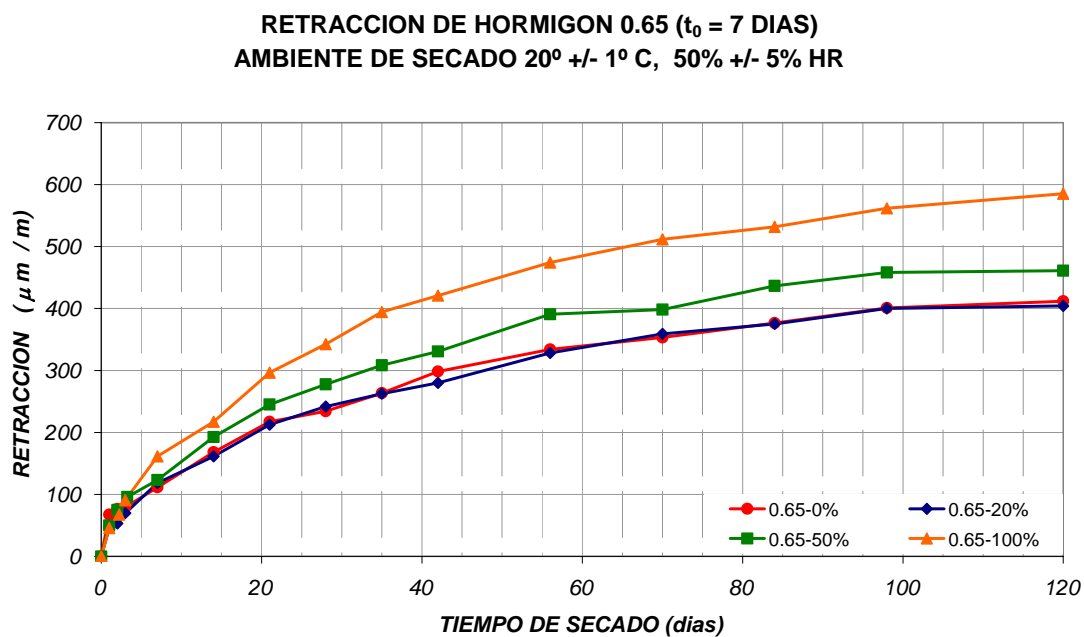


Gráfico 42, Retracción Hormigón Reciclado a/c 0.65, $t_0=7$ días, Ambiente Estándar

Hormigón a/c 0.65	Retracción 28 días		Retracción 120 días	
	μm / m	%	μm / m	%
0.65 – 0% - A1 - 7	234	1	412	1
0.65 – 20% - A1 - 7	242	1,03	404	0,98
0.65 – 50% - A1 - 7	277	1,19	461	1,12
0.65 – 100% - A1 - 7	342	1,46	585	1,42

Tabla 36, Retracción del hormigón reciclado a/c 0.65, 28 y 120 días ($t_0=7$ días).

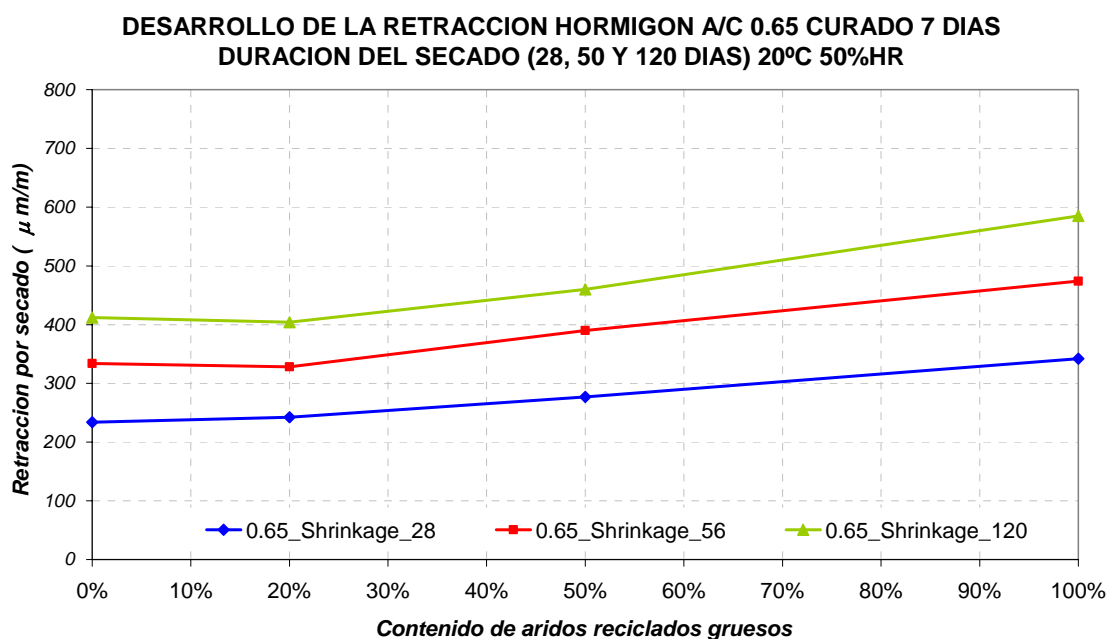


Grafico 43, Retracción hormigón a/c 0.5_28d en función del contenido de áridos reciclados gruesos, a edades de 28, 50 y 120 días

A través de los resultados experimentales se observa una menor influencia de los áridos reciclados en la retracción de secado del hormigón al aumentar la relación agua/cemento de 0.50 a 0.65, el incremento de retracción es del 45% para sustituciones totales de la fracción gruesa, cercanas a 15% para sustituciones de la mitad de la fracción gruesa y para sustituciones del 20% no se nota diferencia con el hormigón de control.

5.3.5 Retracción Hormigón a/c 0.65, Curado 28 Días, Ambiente Estándar.

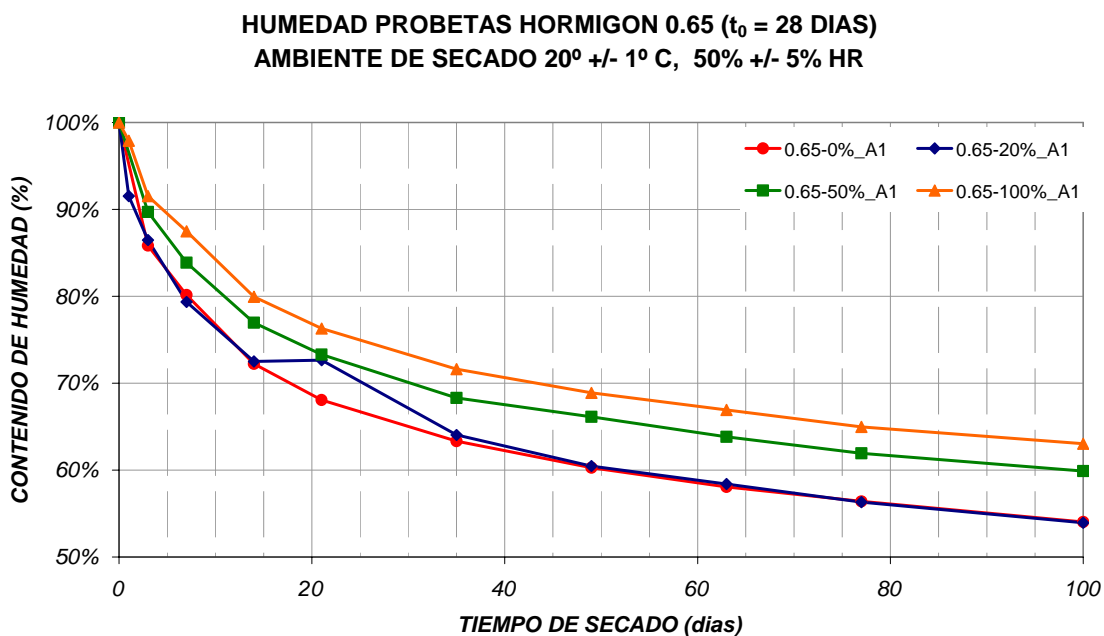


Gráfico 44, Condiciones de humedad de las probetas en retracción hormigón a/c 0.65, $t_0=28$ días.

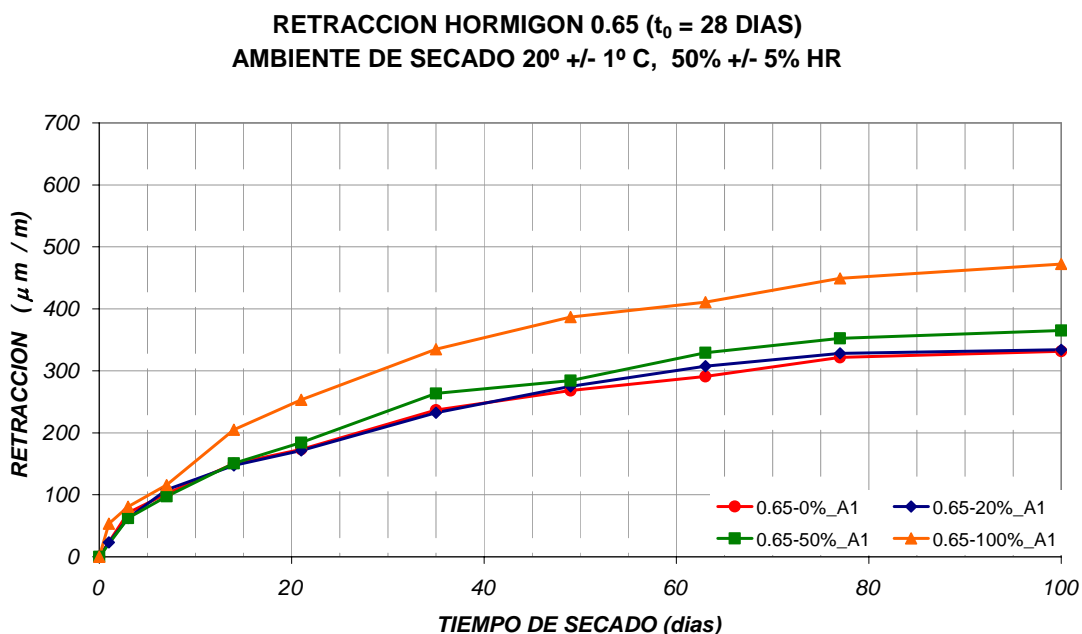


Gráfico 45, Retracción Hormigón Reciclado a/c 0.65, $t_0=28$ días, Ambiente Estándar.

Contrario a lo sucedido para el hormigón de relación a/c 0.5, ensayado a la misma edad, en el hormigón 0.65 si se observa gran diferencia en las condiciones de humedad de las probetas en el tiempo de secado. La tasa de secado disminuye con el aumento en el contenido de áridos reciclados.

Hormigón a/c 0.65	Retracción 35 días		Retracción 100 días	
	μm / m	%	μm / m	%
0.65 – 0% - A1 – 28	237	1	332	1
0.65 – 20% - A1 – 28	232	0,98	334	1,01
0.65 – 50% - A1 – 28	263	1,11	365	1,10
0.65 – 100% - A1 – 28	335	1,42	472	1,42

Tabla 37, Retracción del hormigón reciclado a/c 0.65, 35 y 100 días ($t_0=28$ días).

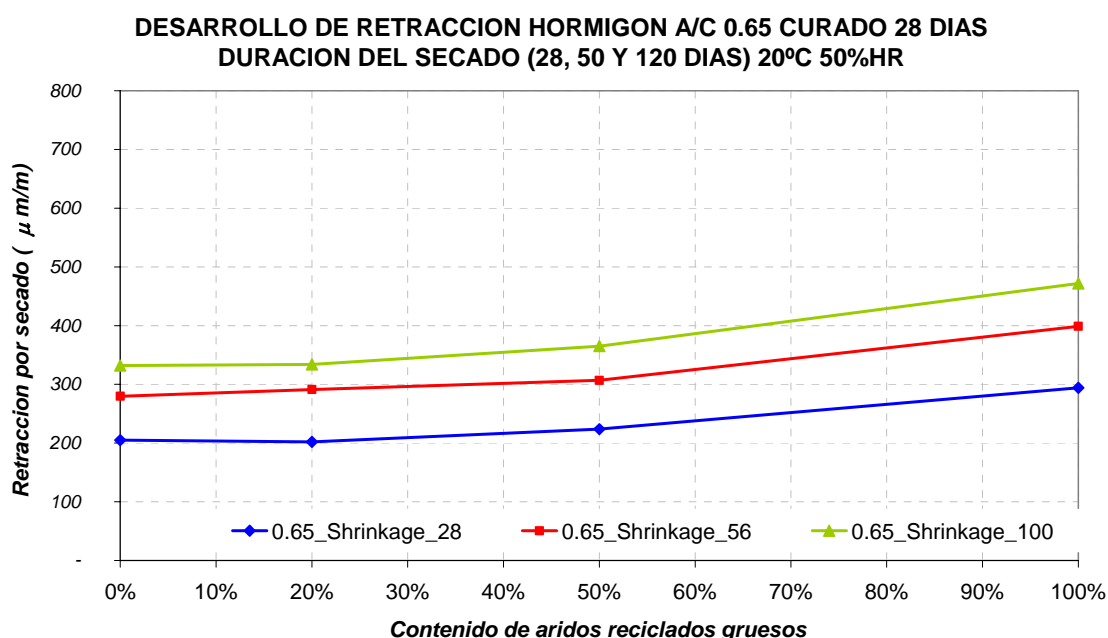


Grafico 46, Retracción hormigón a/c 0.5_28d en función del contenido de áridos reciclados gruesos, a edades de 28, 50 y 120 días

La retracción en el hormigón a/c 0.65 curado por 28 días, similar al que ha sido curado por 7 días, sufre un incremento hasta del 42% para sustituciones totales de la fracción gruesa, para contenidos de áridos reciclados <50% el incremento de la deformación de retracción no supera el 10% y no se observa diferencias con el hormigón de control cuando la sustitución no supera el 20%.

5.3.6 Retracción Hormigón a/c 0.65, Curado 28 Días, Ambiente 2

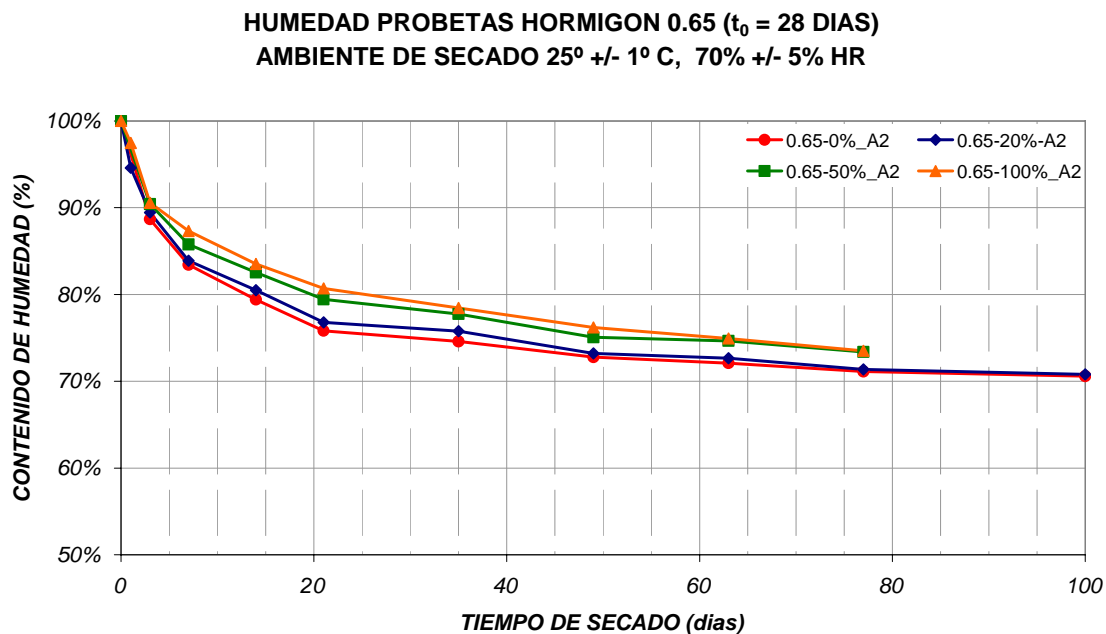


Grafico 47, Condiciones de humedad de las probetas en retracción hormigón a/c 0.65, $t_0=28$ días, expuesto a ambiente de secado 2.

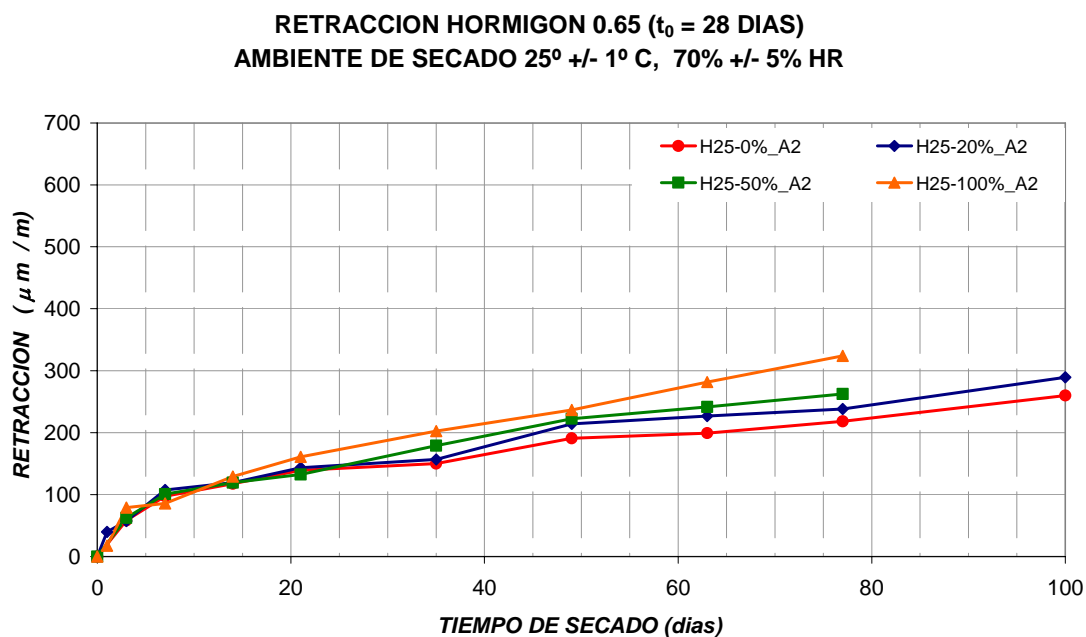


Grafico 48, Retracción Hormigón Reciclado 0.65, $t_0=28$ días, Ambiente2 de secado.

Hormigón a/c 0.65	Retracción 35 días		Retracción 77 días	
	μm / m	%	μm / m	%
0.65 – 0% - A2 – 28	150	1	218	1
0.65 – 20% - A2 – 28	157	1,04	238	1,09
0.65 – 50% - A2 – 28	179	1,19	262	1,2
0.65 – 100% - A2 – 28	202	1,35	324	1,48

Tabla 38, Retracción del hormigón reciclado a/c 0.65, 28 y 100 días ambiente 2 ($t_0=28$ días).

Como ha sucedido en los otros casos, el hormigón con mayor sustitución de áridos reciclados se resiste más al secado, de la misma forma A 77 días se observa la gran influencia que tienen los áridos reciclados sobre los con incrementos en la deformación por retracción, con incrementos proporcionales al contenido de árido reciclado grueso.

5.3.7 Influencia de las Proporciones de la Mezcla en las Deformaciones por Retracción.

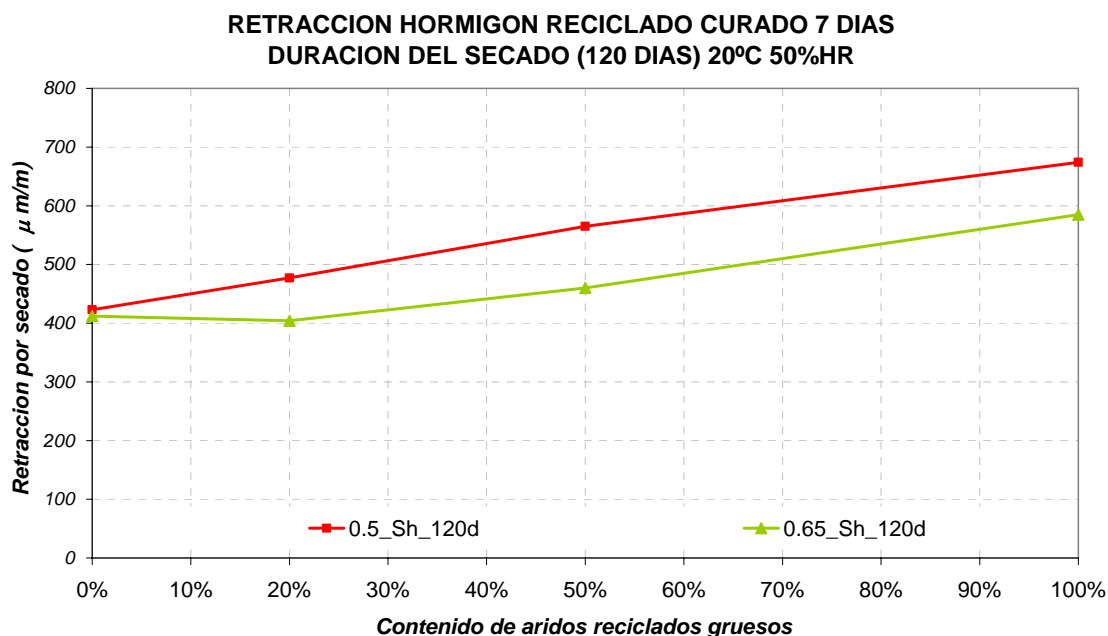


Grafico 49, Influencia de las proporciones de la mezcla del hormigón reciclado curado 7 días

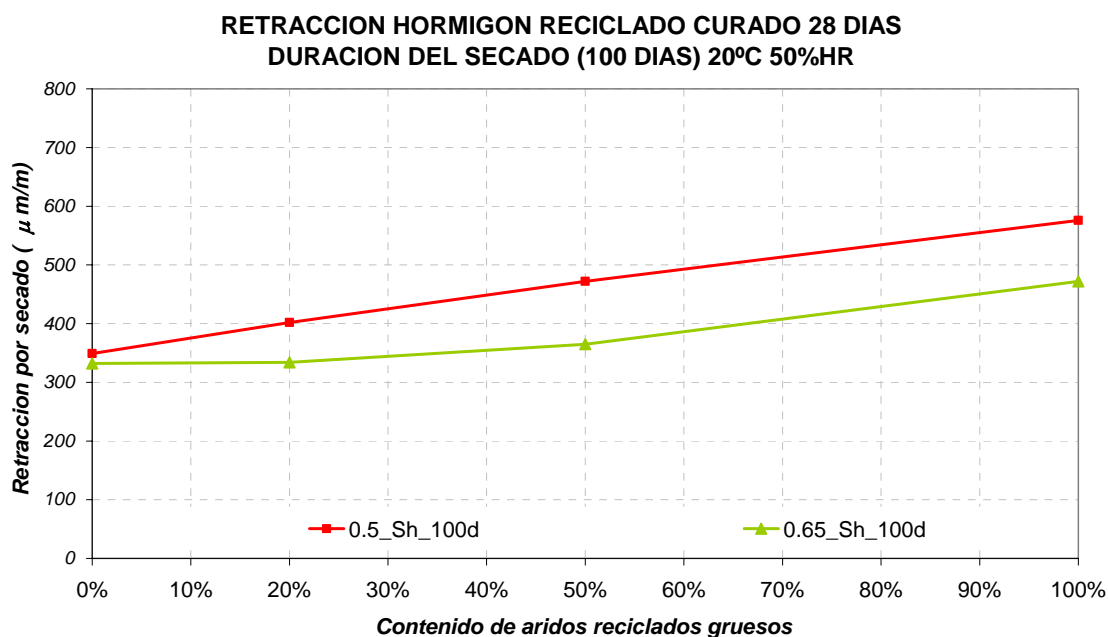


Grafico 50, Influencia de las proporciones de la mezcla del hormigón reciclado curado 28 días

Como observamos en los dos anteriores gráficos, independiente del tiempo de curado, el hormigón de relación agua/cemento 0,5 aunque sufre una mayor deformación por retracción, sigue la misma tendencia que el hormigón de relación agua cemento 0.65, exceptuando el hecho de que aun a bajos niveles de sustitución el aumento de la retracción ya es evidente.

5.3.8 Influencia de las Condiciones y Duración del Curado en las Deformaciones de Retracción del Hormigón.

HORMIGÓN	Retracción 100 días Amb 2/Amb 1
0.5 – 0%	0,73
0.5 – 20%	0,68
0.5 – 50%	0,78
0.5 – 100%	0,71

Tabla 39, Retracción a 100 días en el ambiente 2 relativa a la obtenida en ambiente 1, Hormigón 0.5

HORMIGÓN	Retracción 100 días Amb 2/Amb 1
0.65 – 0%	0,68
0.65 – 20%	0,73
0.65 – 50%	0,74
0.65 – 100%	0,72

Tabla 40, Retracción a 77 días en el ambiente 2 relativa a la obtenida en ambiente 1, Hormigón 0.65

En el segundo ambiente (Humedad Relativa del 70%), la retracción es menor, se nota así el gran efecto que tiene la humedad del ambiente sobre la deformación de retracción, alcanzando en este caso entre 68% - 78% aproximadamente de la deformación obtenida en ambiente estándar (50% HR), por debajo de la relación prevista por el ACI 209r (78%)..

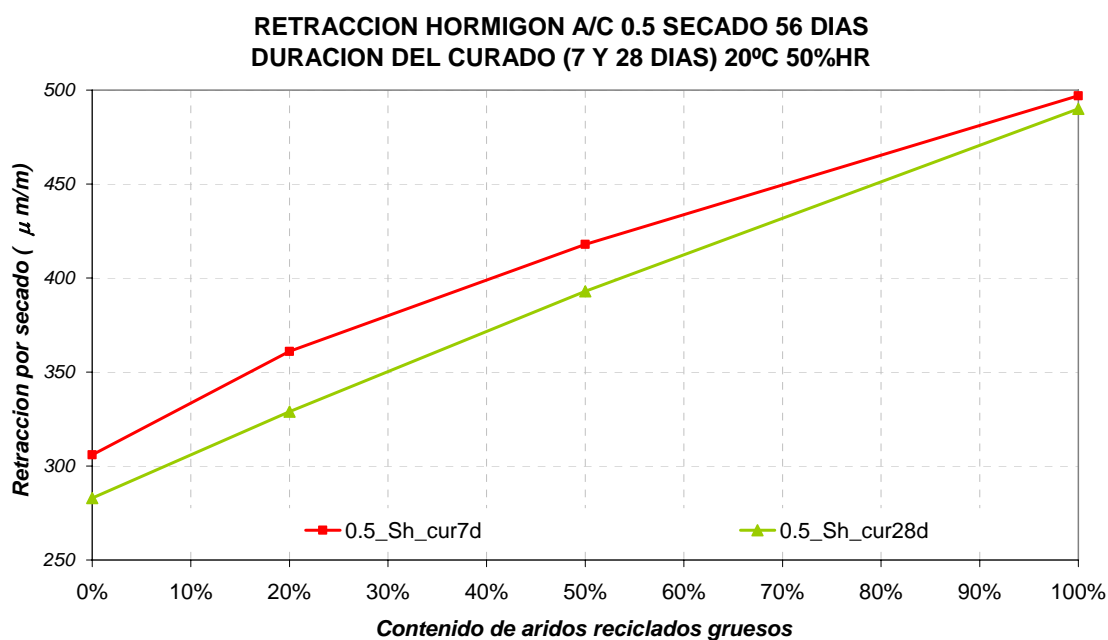


Grafico 51, Relación retracción del hormigón reciclado relación a/c 0.5 con la duración del curado

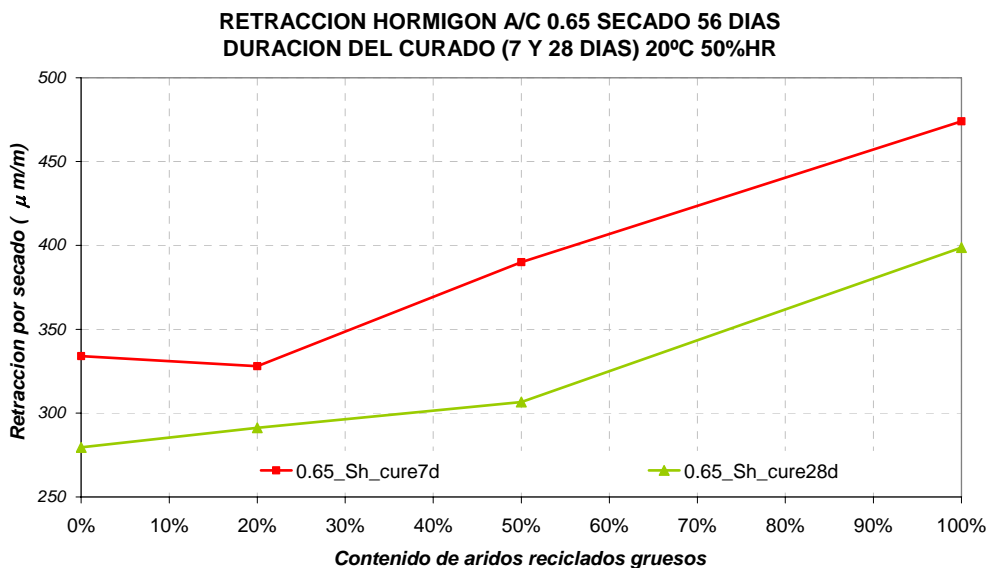


Grafico 52, Relación retracción del hormigón reciclado a/c 0.65 con la duración del curado

Otro factor que se observa es la influencia del tiempo de curado, puesto que el hormigón curado 28 días obtiene una deformación de retracción aproximada del 86% de la deformación del hormigón curado por 7 días. (ACI 209r)

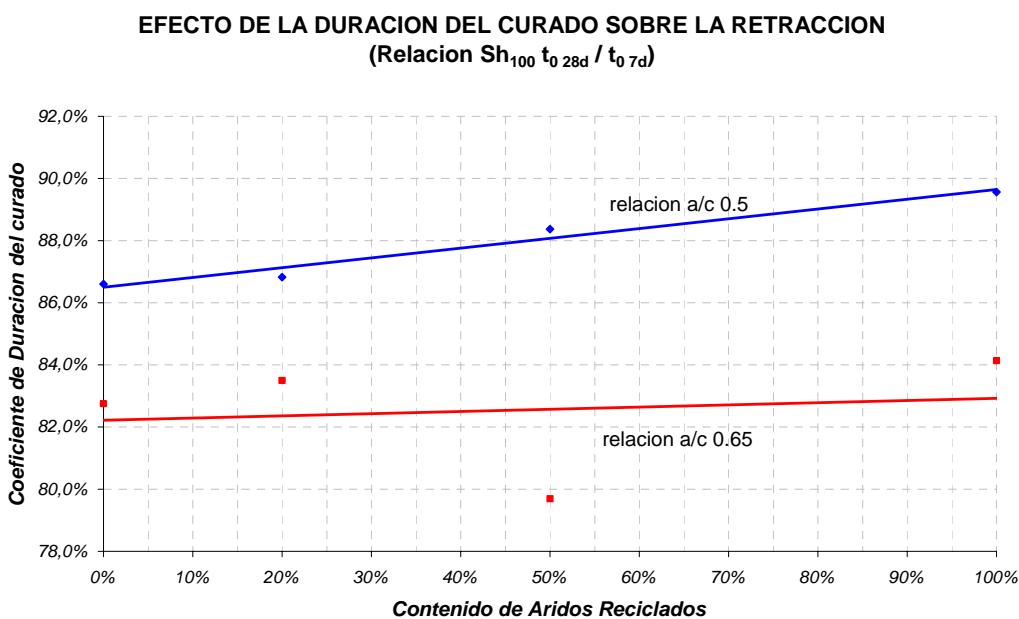


Grafico 53, Efecto de duración del curado sobre la deformación de retracción

Según el estudio experimental la relación entre el factor de corrección por duración del curado, fue 0.866 para el hormigón de control, 0.868 cuando la sustitución es del 20%, 0.884 cuando la sustitución es del 50% y 0.896 para sustituciones totales, por tanto el efecto se atenúa con el aumento del contenido de áridos reciclados.

En el hormigón con relación agua/cemento 0.65 el efecto de duración del curado sobre la retracción parece ser mas importante que en el hormigón de relación a/c 0.5, con valores menores a 0.841 en todos los casos, aunque la influencia del contenido de áridos reciclados afecta este en menor medida, por debajo del 0,86 referenciado por ACI 209_r, alternando valores entre 0,8 y 0,84.

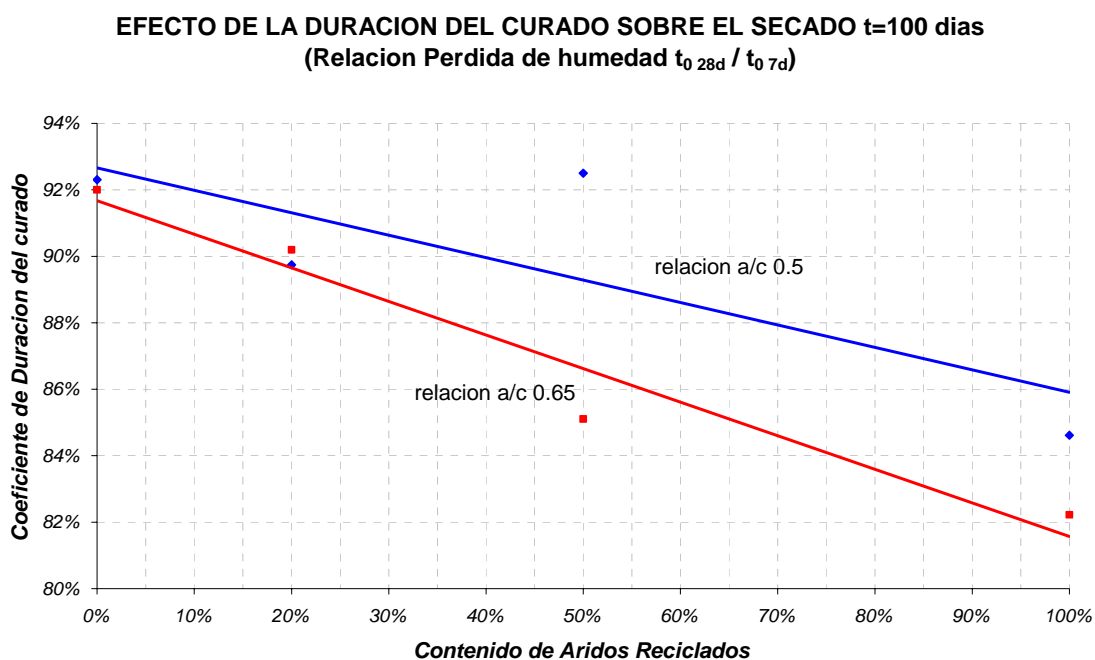


Gráfico 54, Efecto de duración del curado sobre el secado del hormigón

Al igual que con la retracción, el efecto de un curado mas largo es mas beneficioso

en el hormigón convencional (a/c 0.65), aunque a mayor contenido de áridos reciclados, el hormigón pierde menos humedad cuando se deja curar un mayor tiempo.

5.4 MODELOS DE PREDICCIÓN DE RETRACCIÓN

5.4.1 Modelación Numérica de Retracción del Hormigón Relación a/c 0.5

Se realizó una modelación de la deformación debida a la retracción utilizando los 3 modelos consultados, evaluando su precisión a edades de 28 días y 120 días, a partir de los datos experimentales, y utilizando las constantes propuestas por los autores en los modelos.

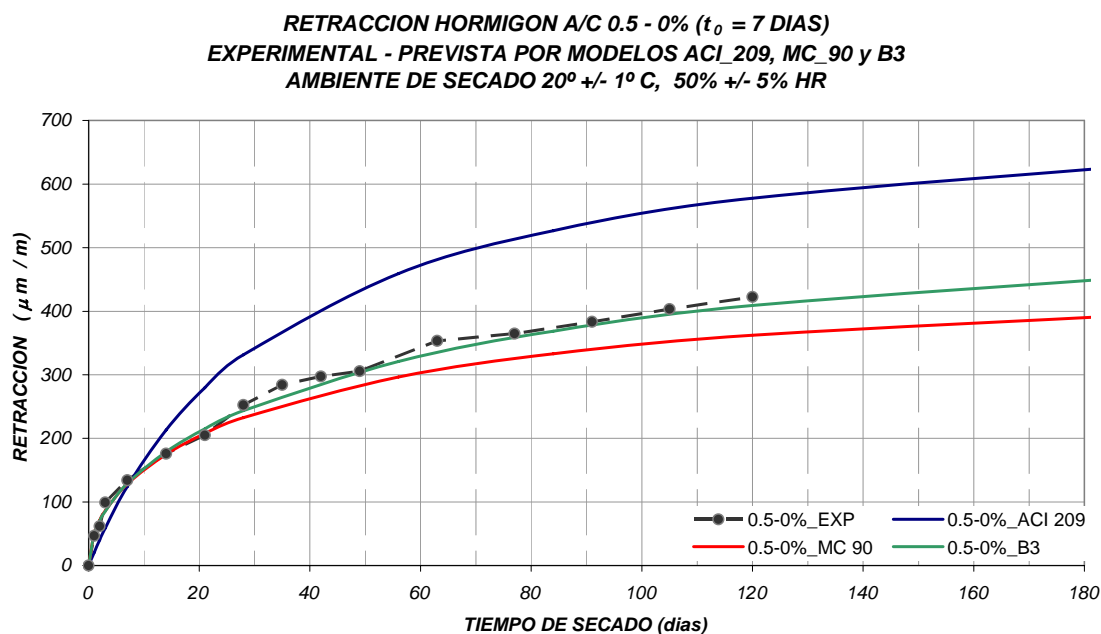


Gráfico 55, Retracción Hormigón 0.5-0%, curado 7 días, comparada con modelos de predicción

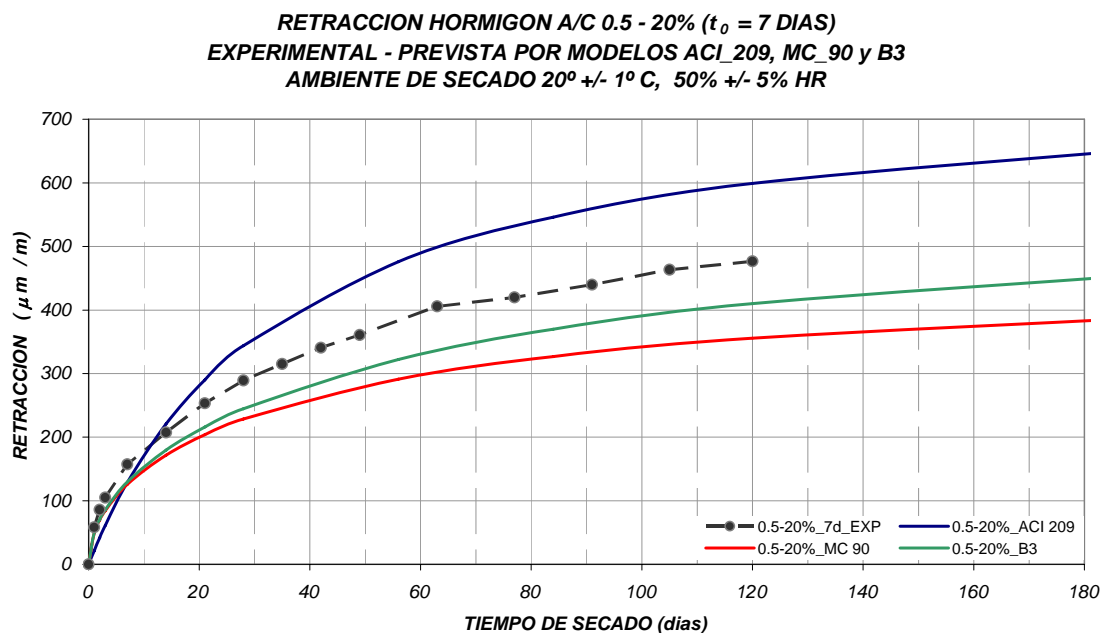


Grafico 56, Retracción Hormigón 0.5-20%, curado 7 días, comparada con modelos de predicción

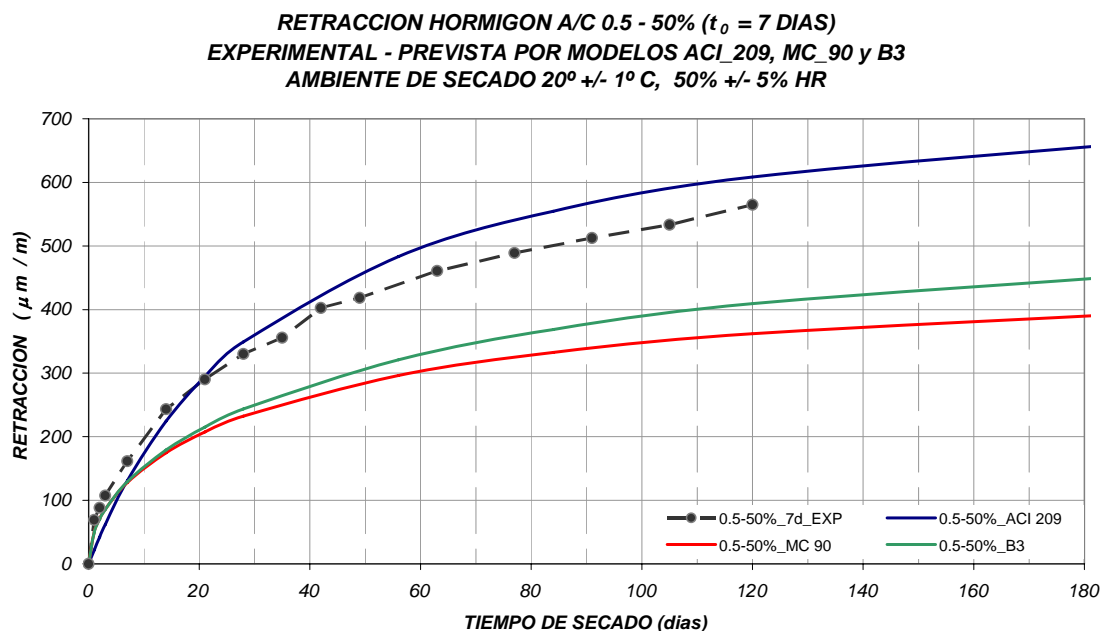


Grafico 57, Retracción Hormigón 0.5-50%, curado 7 días, comparada con modelos de predicción

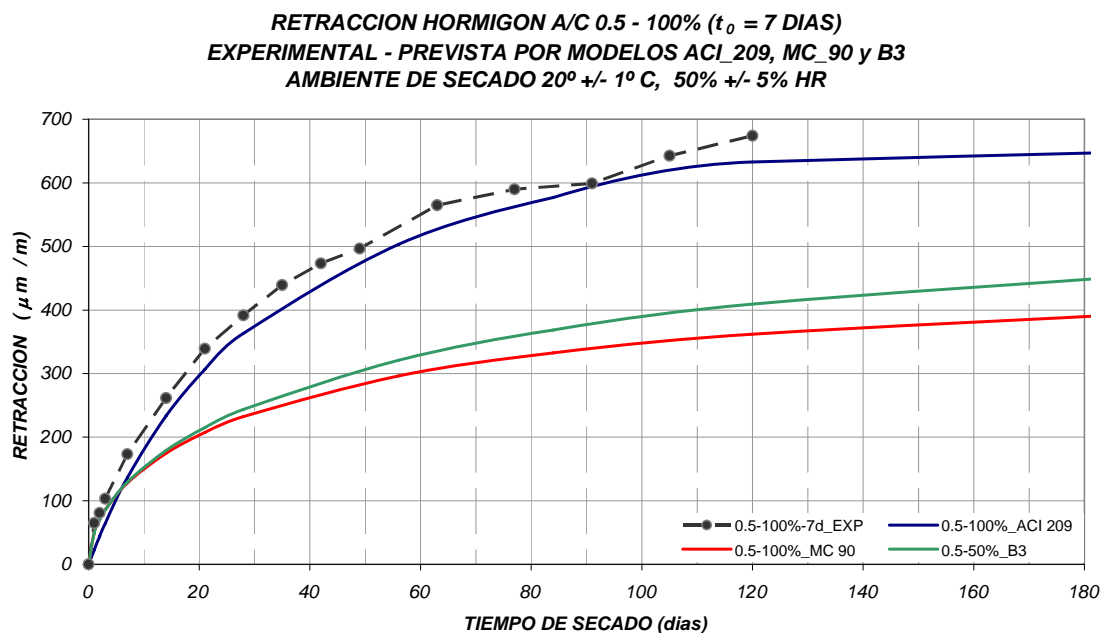


Grafico 58, Retracción Hormigón 0.5-100%, curado 7 días, comparada con modelos de predicción

Hormigon	ACI 209		MC_90		B3	
	μ m/m	E	μ m/m	e	μ m/m	E
0.5-0%_7d	578	26,9%	362	-16,6%	546	-3,3%
0.5-20%_7d	599	20,4%	348	-34%	549	-16,2%
0.5-50%_7d	608	7,1%	362	-56,1%	546	-38,1%
0.5-100%_7d	633	-6,5%	362	-86,3%	546	-64,8%

Tabla 41, Evaluación de modelos de predicción de retracción de hormigón a/c 0.5 en ambiente estándar, curado por 7 días

Para el hormigón de control (0.5-0%_7d) y la sustitución inicial (0.5-20%_7d), el predictor que mas se acerca a las deformaciones de retracción experimentales al final del ensayo resulto ser el B3, reflejando valores con muy poco error en el primero y un error mayor en el segundo caso, subestimando las deformaciones en ambos casos. El predictor mas aproximado de deformaciones de retracción cuando se utilizan áridos reciclados y en las situaciones evaluadas, con la suerte de que sobrevalora las deformaciones, exceptuando la sustitución total (0.5-100%_7d) en la que los modelos utilizados previeron valores inferiores.

**RETRACCION HORMIGON A/C 0.50 - 0% ($t_0 = 28$ DIAS)
 EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELOS ACI 209, MC 90 y B3
 AMBIENTE DE SECADO $20^{\circ} \pm 1^{\circ} C$, $50\% \pm 5\% HR$**

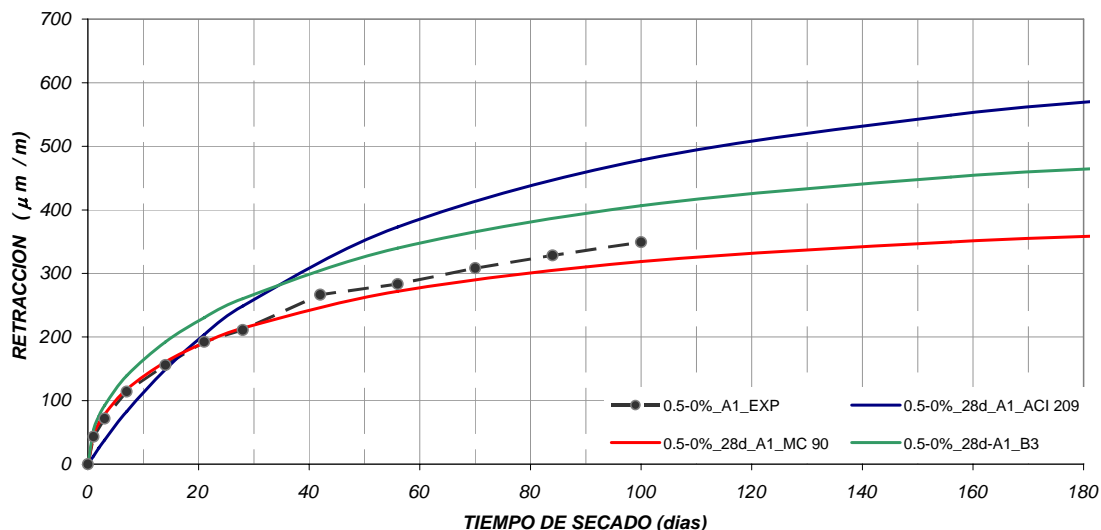


Grafico 59, Retracción Hormigón 0.5-0% Ambiente 1, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

**RETRACCION HORMIGON A/C 0.5 - 20% ($t_0 = 28$ DIAS)
 EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELOS ACI 209, MC 90 y B3
 AMBIENTE DE SECADO $20^{\circ} \pm 1^{\circ} C$, $50\% \pm 5\% HR$**

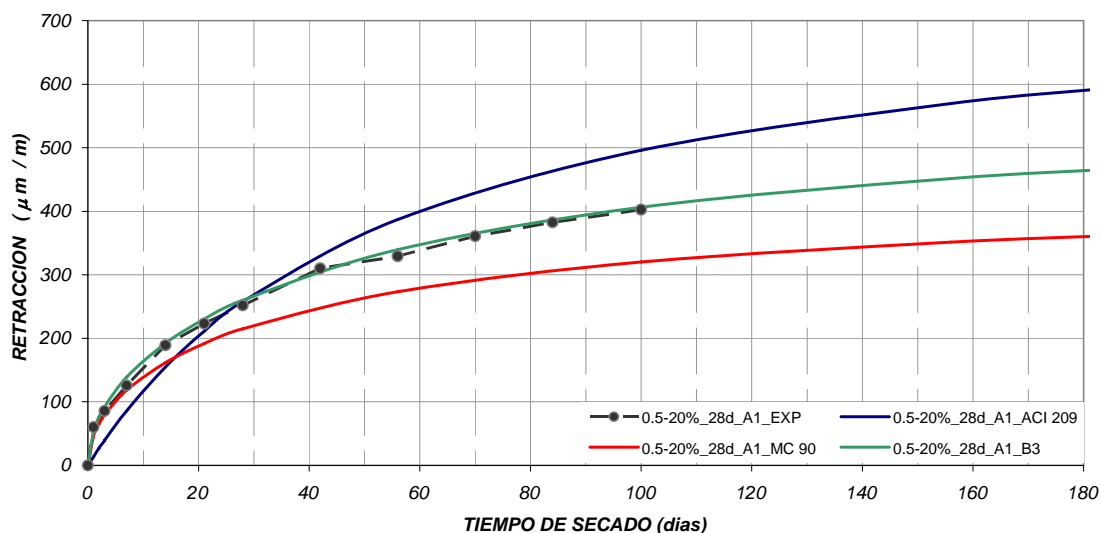


Grafico 60, Retracción Hormigón 0.5-20% Ambiente 1, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

**RETRACCION HORMIGON A/C 0.5 - 50% ($t_0 = 28$ DIAS)
 EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELOS ACI 209, MC 90 y B3
 AMBIENTE DE SECADO $20^\circ \pm 1^\circ$ C, 50% \pm 5% HR**

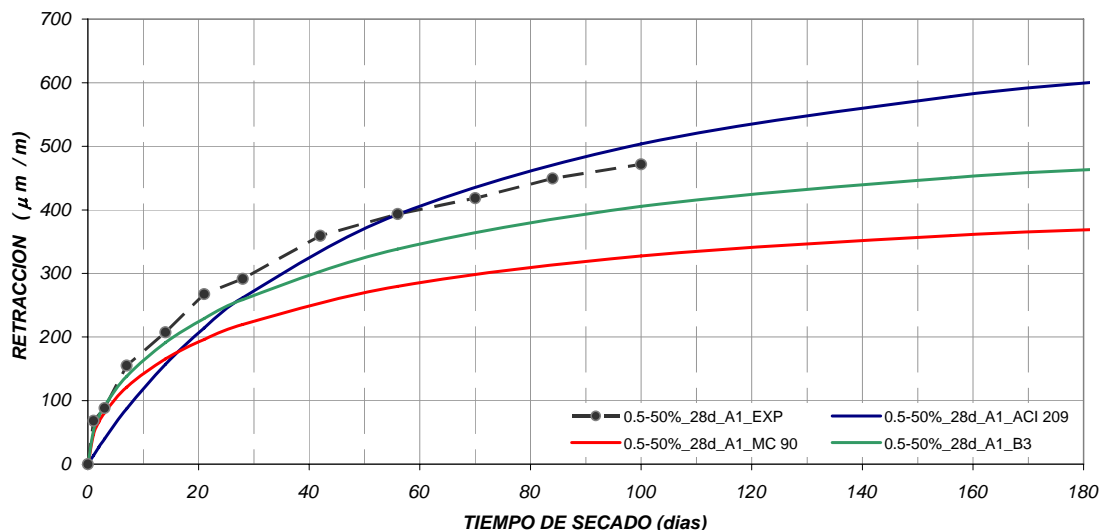


Grafico 61, Retracción Hormigón 0.5-50% Ambiente 1, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

**RETRACCION HORMIGON A/C 0.5 - 100% ($t_0 = 28$ DIAS)
 EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELOS ACI 209, MC 90 y B3
 AMBIENTE DE SECADO $20^\circ \pm 1^\circ$ C, 50% \pm 5% HR**

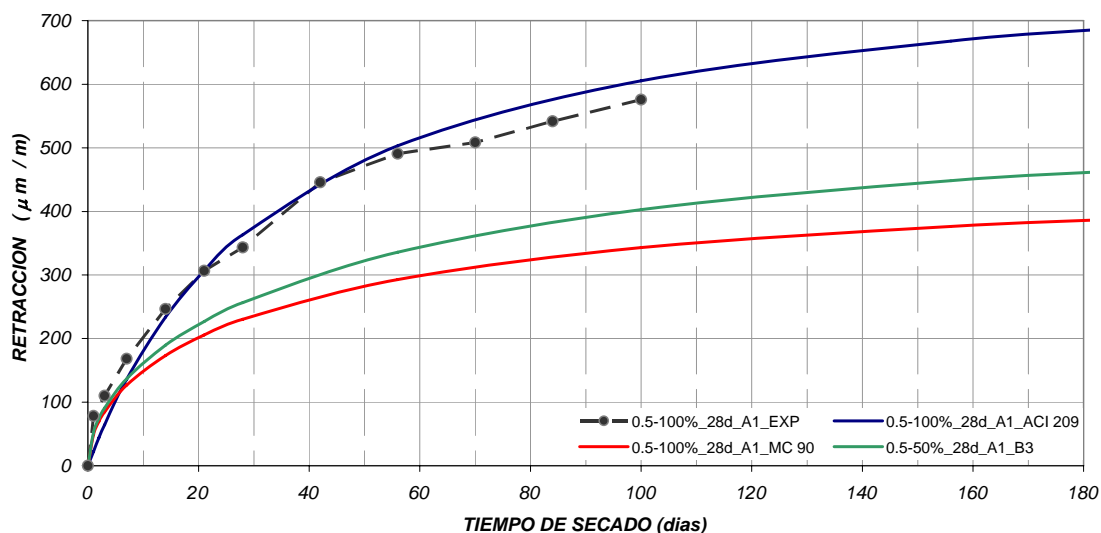


Grafico 62, Retracción Hormigón 0.5-100% Ambiente 1, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

Hormigón	ACI 209		MC_90		B3	
	μ m/m	E	μ m/m	e	μ m/m	E
0.5-0%_28d_A1	478	27,0%	348	-9,6%	542	14,2%
0.5-20%_28d_A1	496	18,9%	334	-25,7%	543	1%
0.5-50%_28d_A1	504	6,4%	348	-44%	540	-16,4%
0.5-100%_28d_A1	606	4,9%	348	-67,9%	537	-42,9%

Tabla 42, Evaluación de modelos de predicción de retracción de Hormigón 0.5 en ambiente estándar, curado por 28 días

Para el hormigón de control (0.5-0%_28d), el modelo que mejor representa las deformaciones de retracción evaluada al final del ensayo es el propuesto por el Código Modelo. Cuando el nivel de sustitución de áridos reciclados aumenta al 20% (0.5-20%_28d), el Modelo B3 realiza una predicción muy acertada y Cuando el hormigón contiene un 50% y 100% de áridos reciclado es el ACI_209 el que predice de forma mas ajustada las deformaciones de retracción.

RETRACCION HORMIGON A/C 0.5 - 0% ($t_0 = 28$ DIAS)
 EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELOS ACI_209, MC_90 y B3
 AMBIENTE DE SECADO 25° +/- 1° C, 70% +/- 5% HR

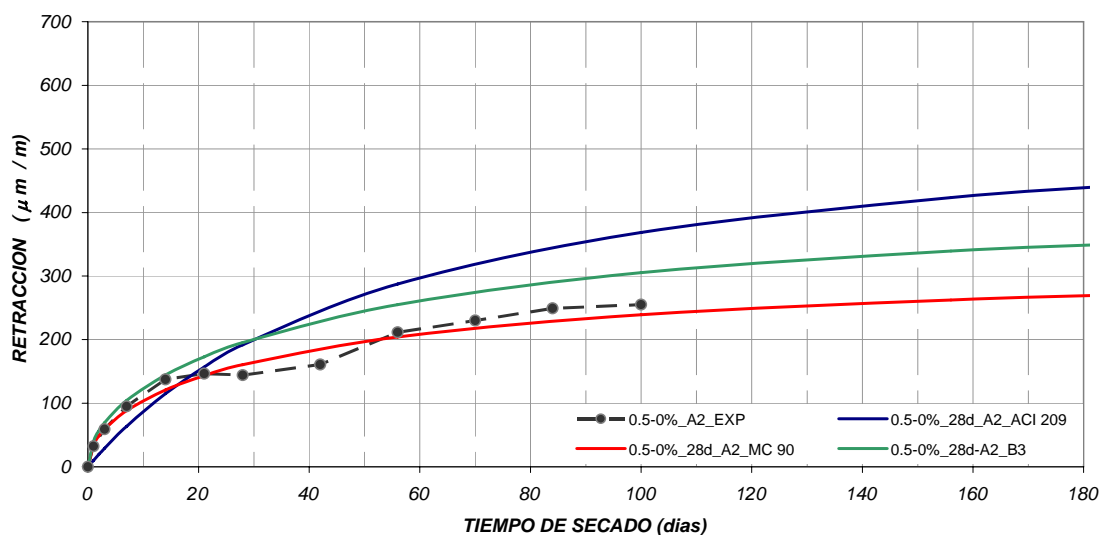


Grafico 63, Retracción Hormigón 0.5-0% Ambiente 2, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

**RETRACCION HORMIGON A/C 0.5 - 20% ($t_0 = 28$ DIAS)
 EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELOS ACI 209, MC 90 y B3
 AMBIENTE DE SECADO 25° +/- 1° C, 70% +/- 5% HR**

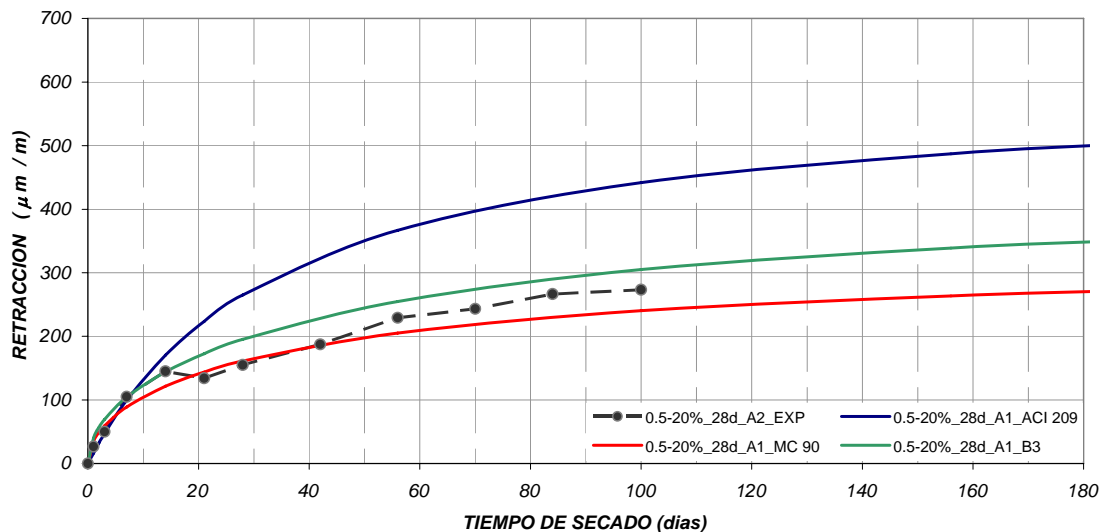


Grafico 64, Retracción Hormigón 0.5-20% Ambiente 2, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

**RETRACCION HORMIGON A/C 0.5 - 50% ($t_0 = 28$ DIAS)
 EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELOS ACI 209, MC 90 y B3
 AMBIENTE DE SECADO 25° +/- 1° C, 70% +/- 5% HR**

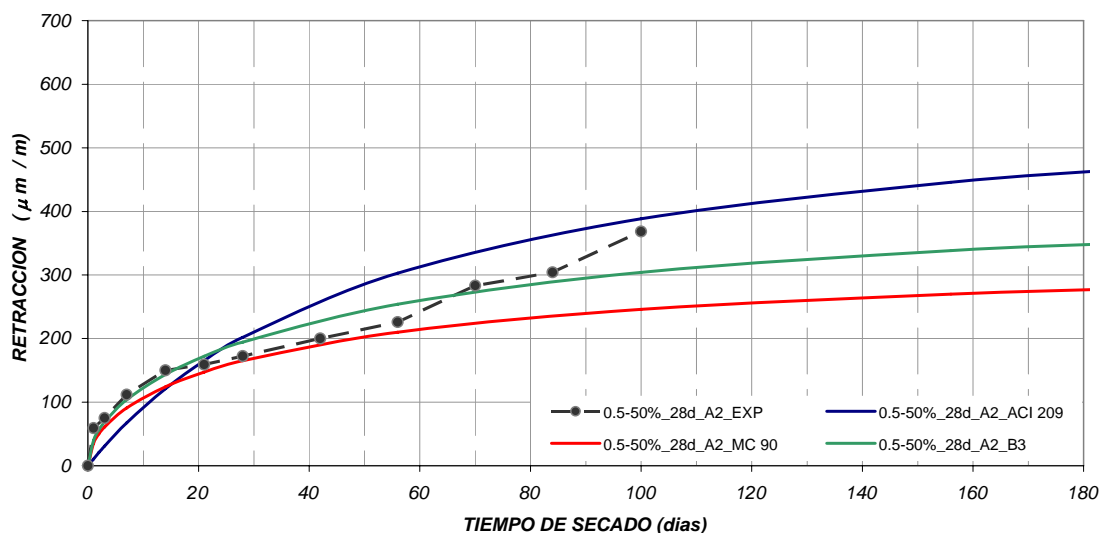


Grafico 65, Retracción Hormigón 0.5-50% Ambiente 2, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

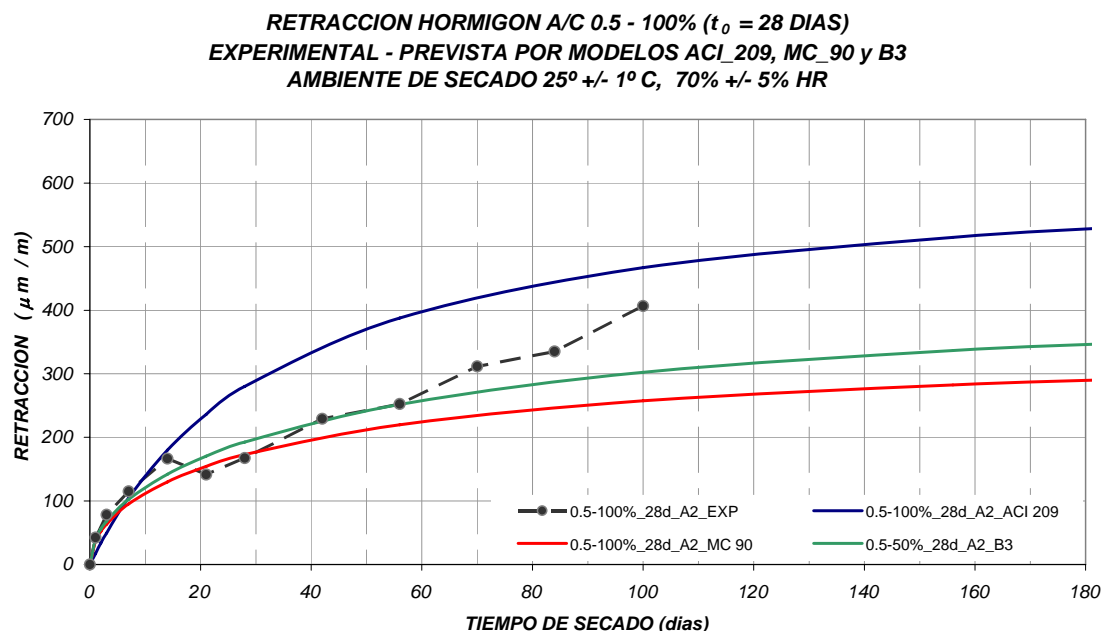


Grafico 66, Retracción Hormigón 0.5-100% Ambiente 2, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

Hormigón	ACI 209		MC 90		B3	
	μ m/m	E	μ m/m	e	μ m/m	E
0.5-0%_28d_A2	369	30,8%	239	-6,6%	407	16,5%
0.5-20%_28d_A2	442	38,1%	236	-13,7%	408	10,4%
0.5-50%_28d_A2	388	5,1%	246	-49,7%	406	-21,0%
0.5-100%_28d_A2	467	12,9%	258	-57,9%	403	-34,5%

Tabla 43, Evaluación de modelos de predicción de retracción de Hormigón 0.5 en ambiente 2, curado por 28 días

Para el hormigón de control (0.5-0%_28d2) la deformación obtenida a 100 días a causa de la retracción se comportan similar a lo reportado por el Código Modelo aunque este la subestime. Cuando el nivel de sustitución de áridos reciclados alcanza el 20%, es el modelo B3 el predictor mas acertado y finalmente es el ACI_209 el que parece acercarse más al comportamiento de la retracción del

hormigón 0.5 cuando se le ha sustituido la mitad y la totalidad de la fracción gruesa por áridos reciclados (0.5-50%_28d2) y (0.5-100%_28d2) pues los otros dos modelos, al tiempo que se alejan infravaloran la deformación.

5.4.2 Modelación Numérica de Retracción del Hormigón Relación a/c 0.65

Hormigon	ACI 209		MC_90		B3	
	μ m/m	E	μ m/m	e	μ m/m	E
0.65-0%	538	23,4%	389	-5,9%	496	-10,6%
0.65-20%	551	26,6%	392	-3,0%	495	-8,8%
0.65-50%	570	19,1%	394	-16,8%	495	-24,2%
0.65-100%	458	-27,8%	392	-49,2%	496	-57,4%

Tabla 44, Evaluación de modelos de predicción de retracción de Hormigón a/c 0.65 en ambiente estándar, curado por 7 días

Para el hormigón con relación agua/cemento 0.65, la predicción mas cercana al valor experimental de deformación por retracción la hace el Código modelo, exceptuando la sustitución total (0.65-100%_7d) para el cual, el mejor predictor es el ACI 209, aunque en todos los casos los modelos consultados subestiman gravemente la retracción.

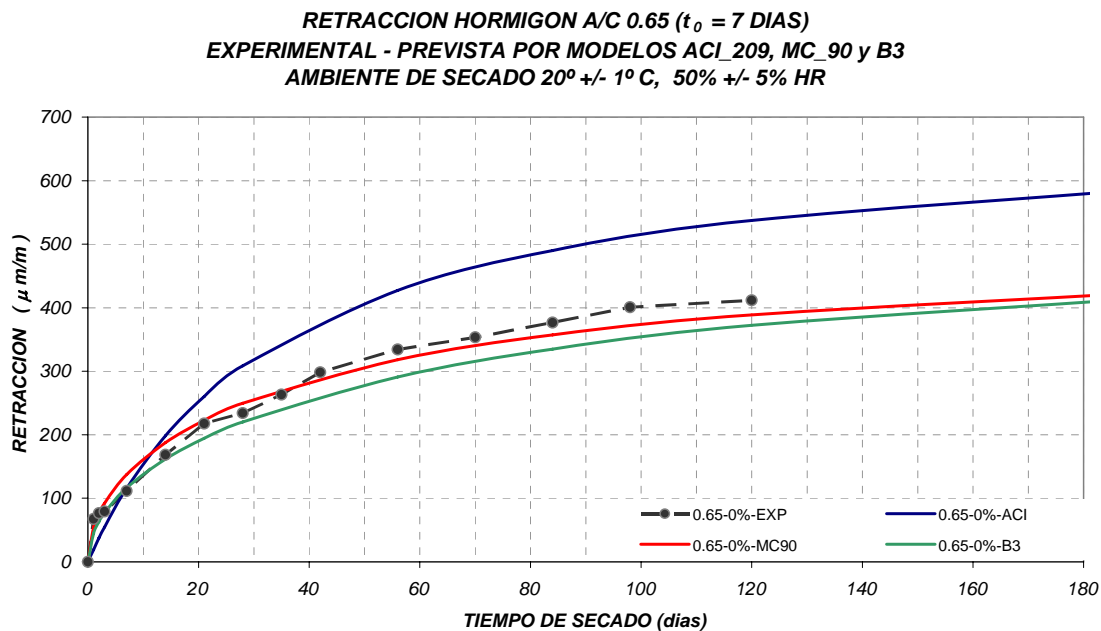


Grafico 67, Retracción Hormigón a/c 0.65-0%, curado 7 días, comparada con modelos de predicción

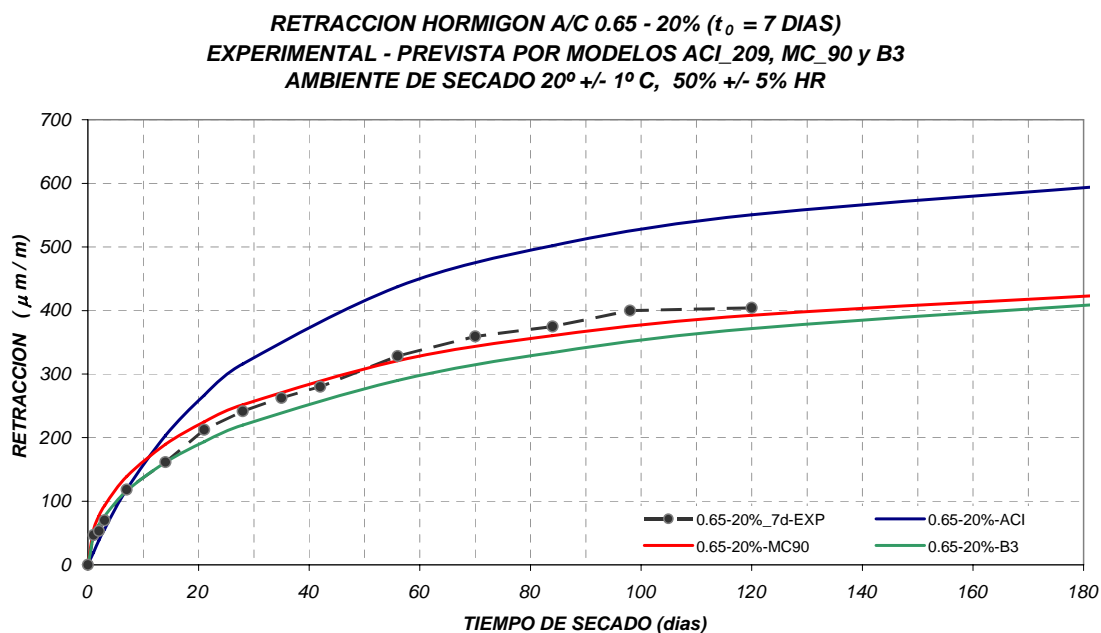


Grafico 68, Retracción Hormigón a/c 0.65-20%, curado 7 días, comparada con modelos de predicción

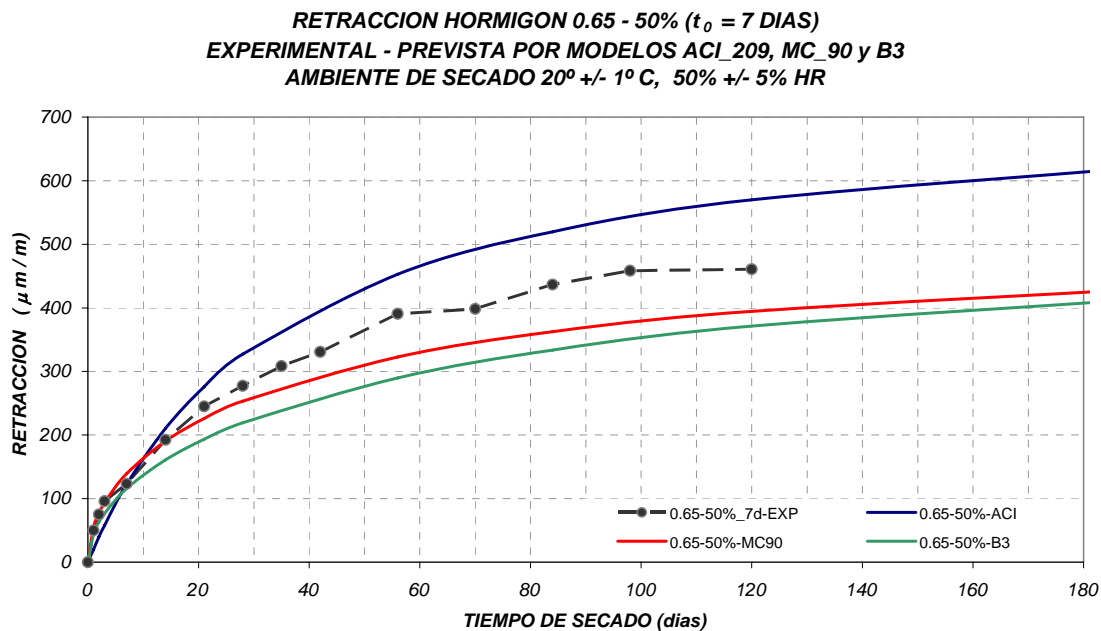


Grafico 69, Retracción Hormigón a/c 0.65-50%, curado 7 días, comparada con modelos de predicción

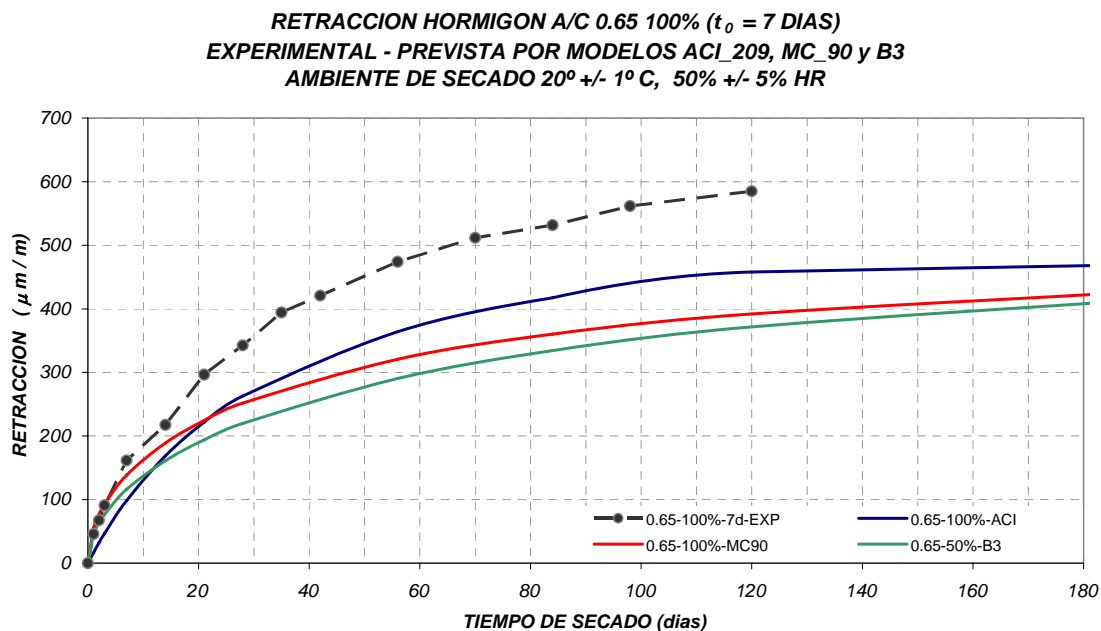


Grafico 70, Retracción Hormigón a/c 0.65-100%, curado 7 días, comparada con modelos de predicción

**RETRACCION HORMIGON A/C 0.65 - 0% ($t_0 = 28$ DIAS)
 EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELOS ACI_209, MC_90 y B3
 AMBIENTE DE SECADO $20^\circ \pm 1^\circ$ C, 50% \pm 5% HR**

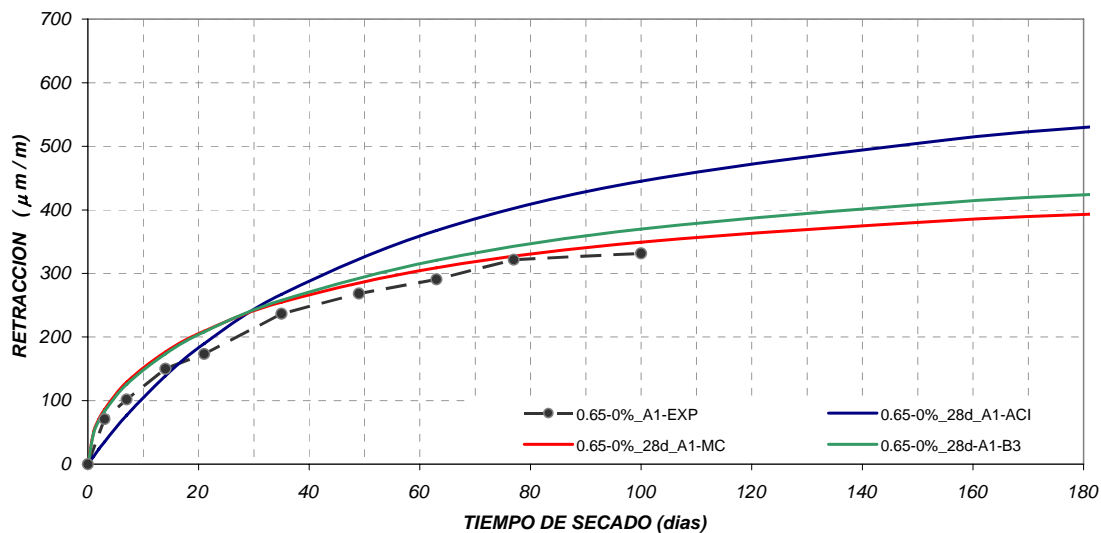


Grafico 71, Retracción Hormigón a/c 0.65-0% ambiente 1, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

**RETRACCION HORMIGON A/C 0.65-20% ($t_0 = 28$ DIAS)
 EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELOS ACI_209, MC_90 y B3
 AMBIENTE DE SECADO $20^\circ \pm 1^\circ$ C, 50% \pm 5% HR**

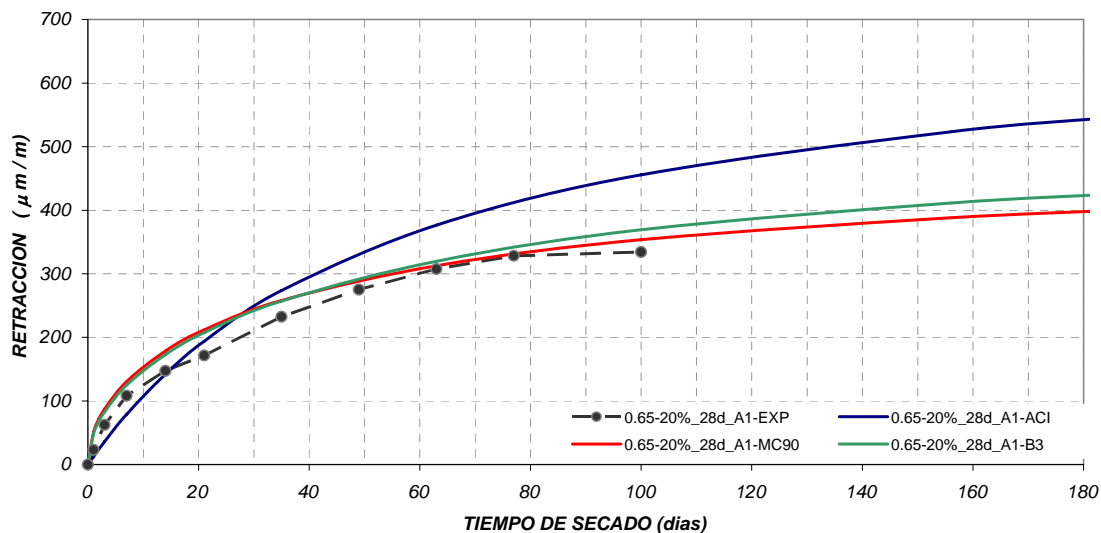


Grafico 72, Retracción Hormigón a/c 0.65-20% ambiente 1, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

RETRACCION HORMIGON A/C 0.65 - 50% ($t_0 = 28$ DIAS)
EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELOS ACI_209, MC_90 y B3
AMBIENTE DE SECADO 20° +/- 1° C, 50% +/- 5% HR

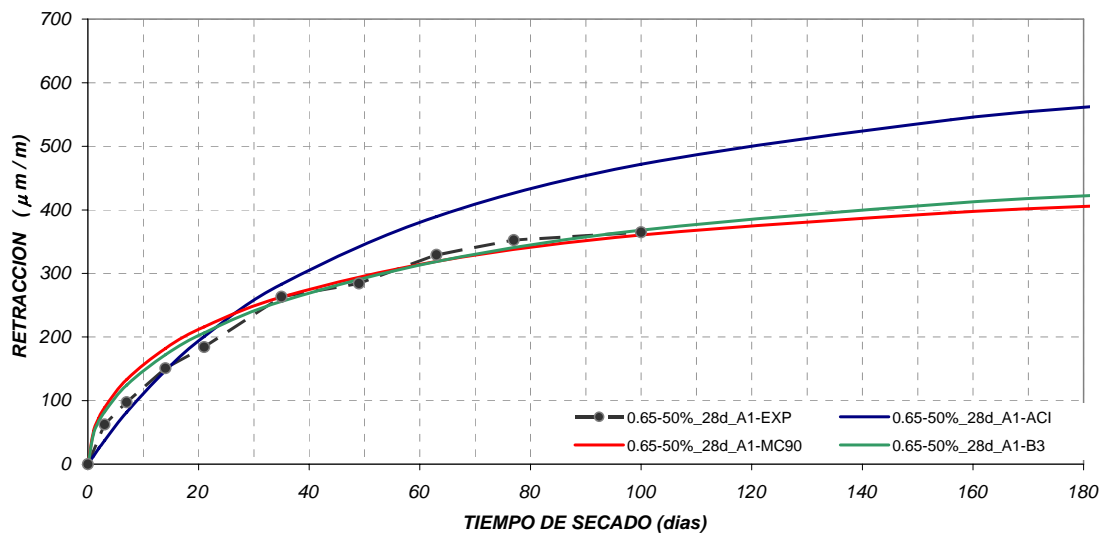


Grafico 73, Retracción Hormigón a/c 0.65-50% ambiente 1, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

RETRACCION HORMIGON A/C 0.65 - 100% ($t_0 = 28$ DIAS)
EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELOS ACI_209, MC_90 y B3
AMBIENTE DE SECADO 20° +/- 1° C, 50% +/- 5% HR

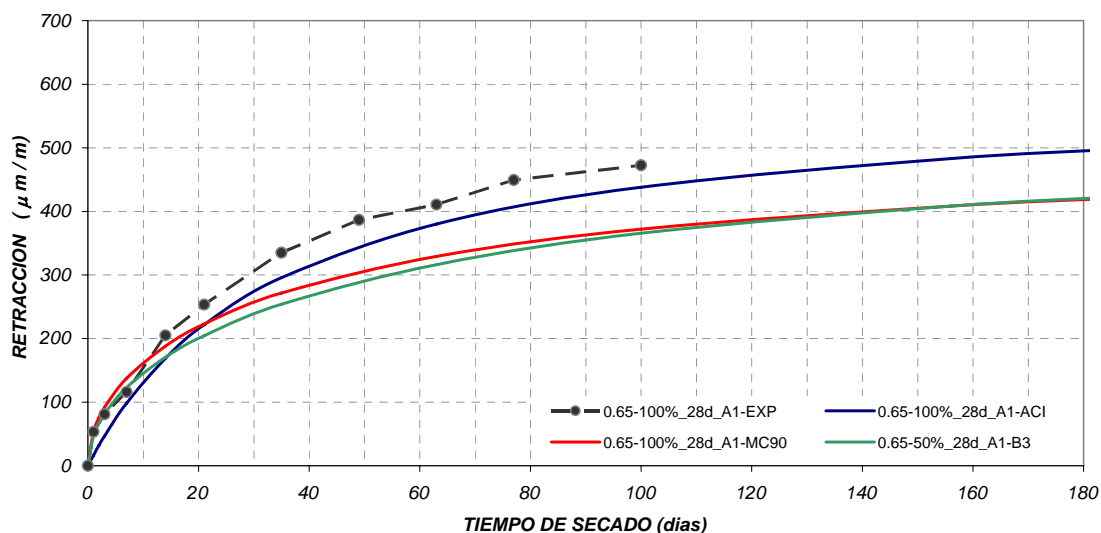


Grafico 74, Retracción Hormigón a/c 0.65-100% ambiente 1, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

Hormigón	ACI 209		MC_90		B3	
	μ m/m	e	μ m/m	E	μ m/m	E
0.65-0%_28d_A1	445	25,5%	349	5,1%	493	10,3%
0.65-20%_28d_A1	456	26,7%	354	5,5%	492	9,5%
0.65-50%_28d_A1	472	22,6%	360	-1,3%	491	0,8%
0.65-100%_28d_A1	438	-7,9%	372	-26,9%	488	-29,2%

Tabla 45, Evaluación de modelos de predicción de retracción de Hormigón 0.65 en ambiente estándar y curado por 28 días

Para el hormigón con relación agua/cemento 0.65, curado por 28 días en ambiente de 20°C. 50% de humedad relativa, el mejor predictor resulta ser el método propuesto por el Código Modelo, exceptuando la sustitución total de la fracción gruesa (0.65-100%_28d) pues para este resulta ser mejor predictor el ACI_209.

RETRACCION HORMIGON A/C 0.65 - 0% ($t_0 = 28$ DIAS)
 EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELOS ACI_209, MC_90 y B3
 AMBIENTE DE SECADO 25° +/- 1° C, 70% +/- 5% HR

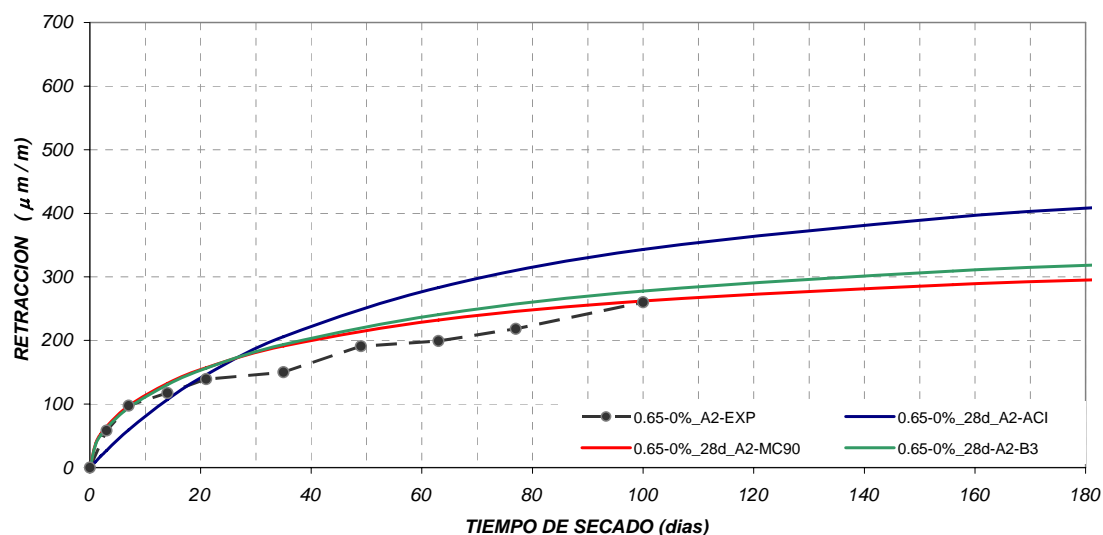


Grafico 75, Retracción Hormigón a/c 0.65-0% ambiente 2, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

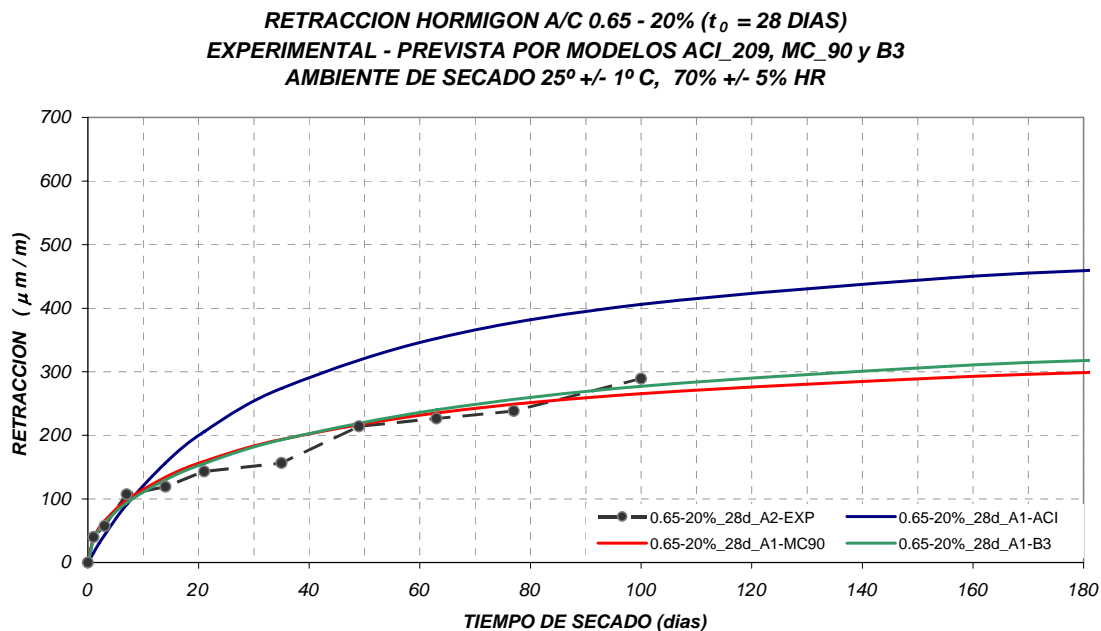


Grafico 76, Retracción Hormigón a/c 0.65-20% ambiente 2, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

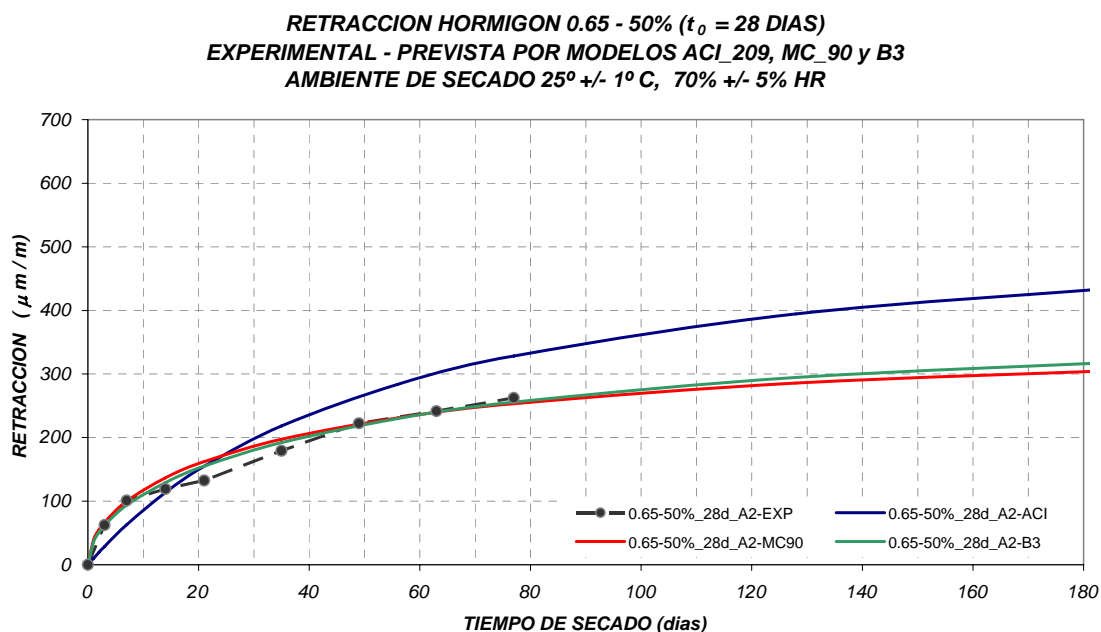


Grafico 77, Retracción Hormigón a/c 0.65-50% ambiente 2, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

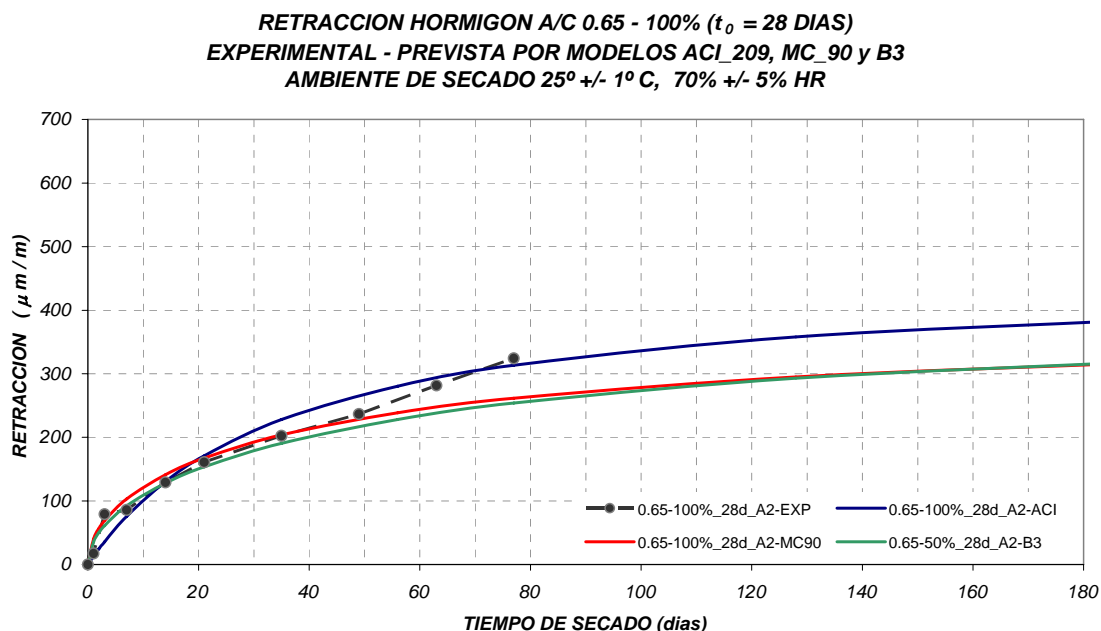


Grafico 78, Retracción Hormigón a/c 0.65-100% ambiente 2, curado 28 días, comparada con modelos de predicción

Hormigón	ACI 209		MC 90		B3	
	μ m/m	E	μ m/m	E	μ m/m	E
0.65-0%_28d_A2	343	24,2%	262	0,9%	370	6,4%
0.65-20%_28d_A2	406	28,8%	266	-8,9%	370	-4,3%
0.65-50%_28d_A2	328	20,1%	253	-3,6%	341	-2,7%
0.65-100%_28d_A2	313	-3,4%	262	-23,9%	339	-27,7%

Tabla 46, Evaluación de modelos de predicción de retracción de Hormigón 0.65 en ambiente 2, curado por 28 días

En general y según los resultados experimentales para el hormigón reciclado 0.65, el mejor predictor de las deformaciones de retracción resulta ser el modelo propuesto por el ACI, con una mejor aproximación en el 50% de las situaciones evaluadas; Para la relación agua/cemento 0.5 igualmente en el 50% de los casos la realiza el código modelo MC-90 de forma mas acertada que los otros modelos

consultados.

Si tenemos en cuenta el contenido de áridos reciclados, resulta el modelo propuesto por el FIB (MC - 90) el que se aproxima mejor a los valores experimentales encontrados para el hormigón de control. Cuando la sustitución de áridos reciclados alcanza el 20%, los valores experimentales se acercan a las previstas con el modelo B3. Las sustituciones del 50% y 100% de áridos reciclados son mejor previstas por el modelo ACI.

5.5 ENSAYO DE FLUENCIA.

5.5.1 Fluencia de Hormigón Reciclado A/C 0.5 Condición Expuesta

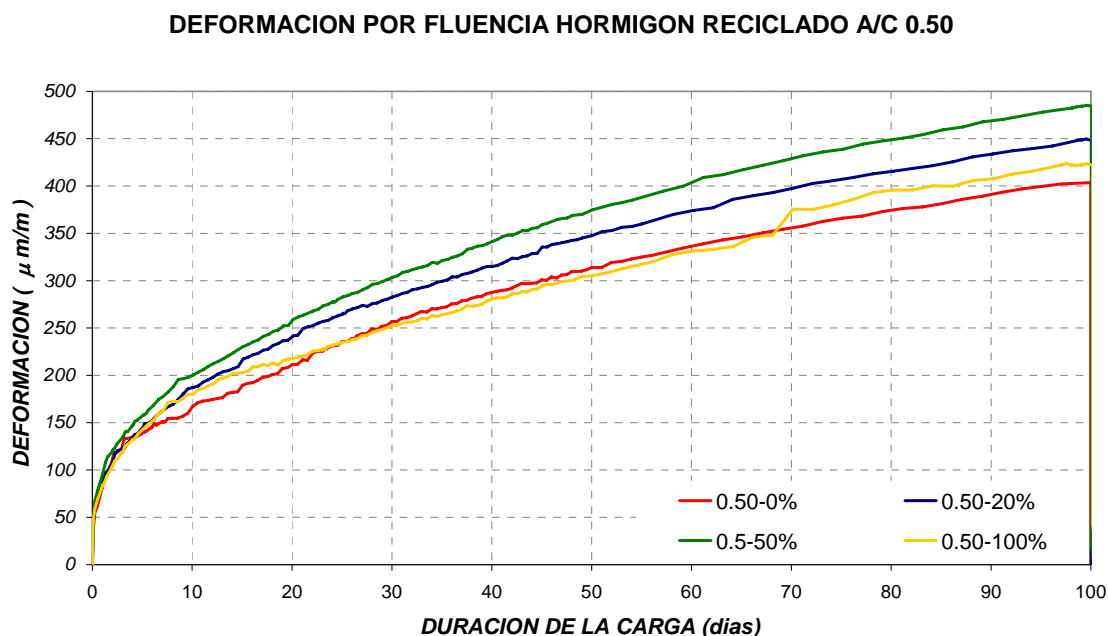


Grafico 79, Deformación Total por fluencia de hormigón reciclado a/c 0.5

A partir de los ensayos se puede afirmar que la deformación de fluencia en las probetas de hormigón se incrementa al aumentar el contenido de áridos reciclados, atribuido al mayor contenido de mortero del hormigón reciclado.

Al observar los resultados de fluencia del hormigón a/c 0.5 llama la atención que el hormigón con un nivel de sustitución total de la fracción gruesa (0.5-100%_dry) sufra una deformación menor a la de los demás niveles de sustitución utilizados y similar la obtenida para el hormigón de control, pero esto se puede explicar en la menor carga que fue aplicada a cada hormigón.

sustitución	Carga aplicada (Ton)
0%	31
20%	31
50%	29
100%	20

Tabla 47, Carga aplicada en ensayo de fluencia a hormigones de relación a/c 0.5

COEFICIENTE DE FLUENCIA TOTAL HORMIGON RECICLADO A/C 0.5

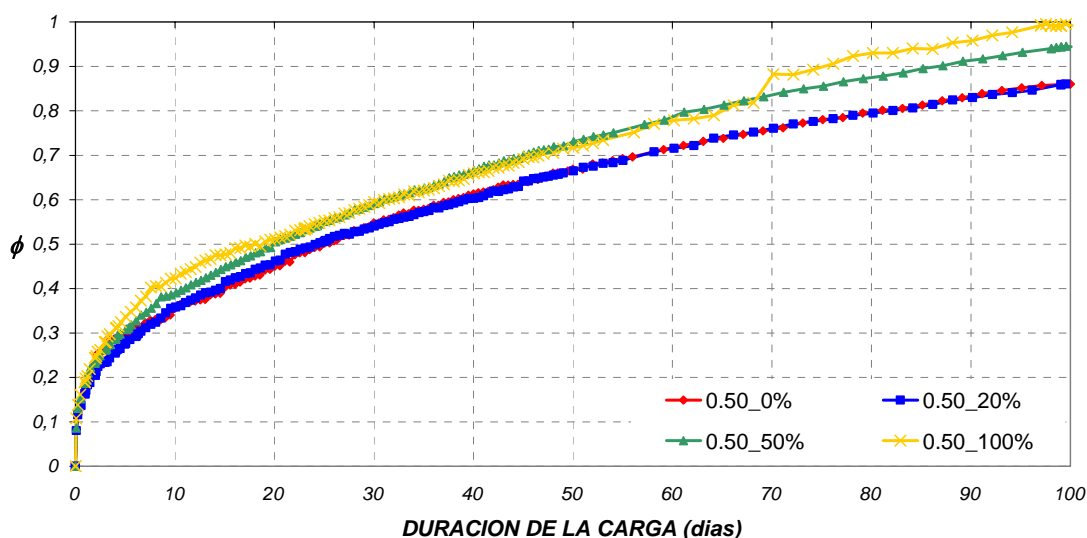


Grafico 80, Coeficiente de fluencia de hormigón reciclado relación a/c 0.5

Al relacionar las deformaciones de fluencia con la deformación elástica inicial a través del coeficiente de fluencia (ϕ), observamos que hay un comportamiento similar entre ellos y conservan en buena parte la tendencia de deformación elástica instantánea, mientras el hormigón con un 20% de sustitución (0.5-20%_dry) no presenta diferencia con el hormigón de control, los hormigones con 50% y 100% de sustitución superan levemente los anteriores en un 12% y 18% respectivamente

Como se explico antes, los hormigones ensayados se sometieron a diferentes cargas y para relacionarlos y realizar comparaciones entre ellos, recurrimos a la deformación específica de fluencia, relacionando la deformación de fluencia con la tensión aplicada.

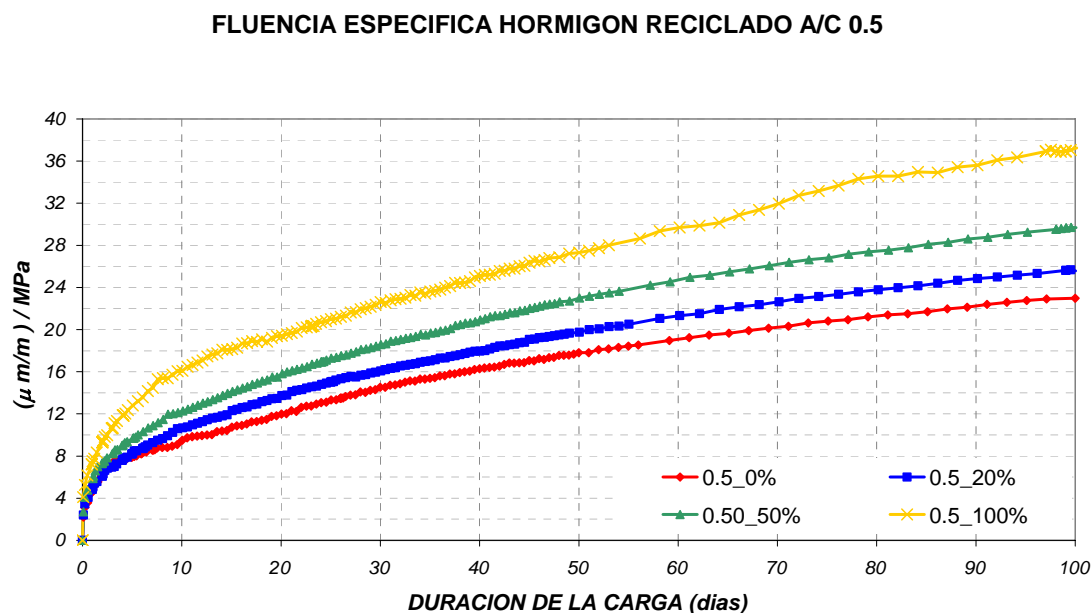


Grafico 81, Fluencia específica de hormigón reciclado a/c 0.5

En este gráfico se puede apreciar mejor las diferencias entre cada uno de los hormigones reciclados con relación agua/cemento 0.65, en el se observa una relación directa entre el contenido de áridos reciclados y la fluencia específica del hormigón, con aumentos de entre un 10% a 12% para sustituciones del 20%, incremento de 27% al 31% para sustituciones del 50% de la fracción gruesa e incrementos de entre un 54% a 61% para sustituciones totales (0.5.100%_dry).

5.5.2 Fluencia de Hormigón Reciclado relación a/c 0.5 Condición Sellada

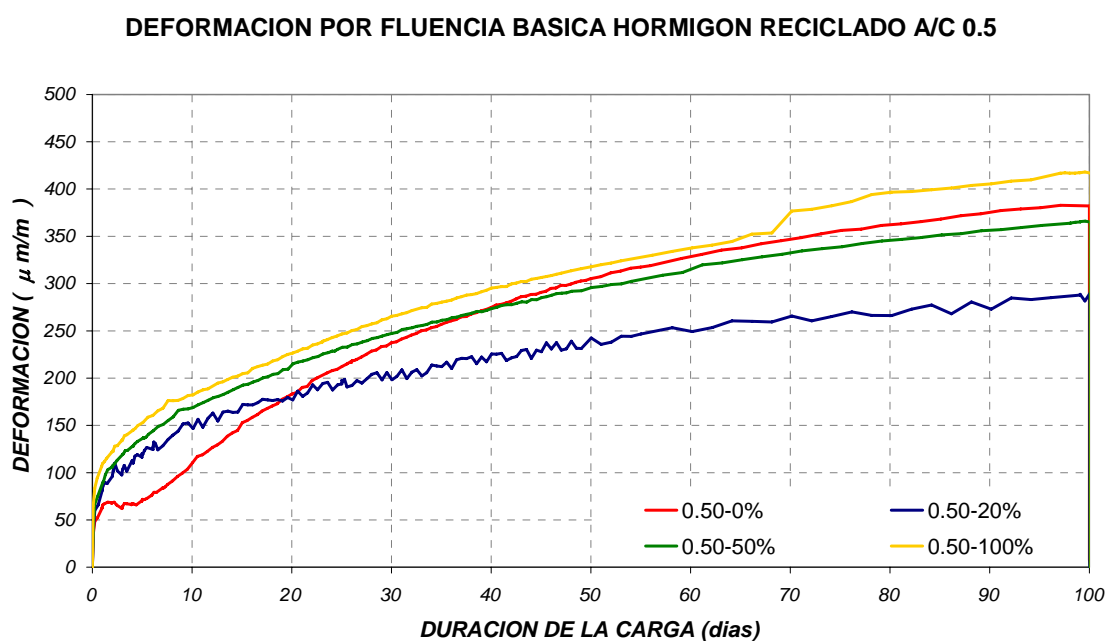


Grafico 82, Deformación por fluencia básica de hormigón reciclado relación a/c 0.5

En este caso lo extraño es ver la deformación por fluencia básica del hormigón de control (0.5-0%_dry) que aunque inicia por debajo, en pocos días aumenta la deformación, indicativo de que en los hormigones reciclados, al desacelerar el proceso de secado interno, a causa del agua retenida en los áridos, se disminuye

la tasa de fluencia básica, como podemos corroborar en el grafico de coeficiente de fluencia del hormigón en condiciones de sellado.

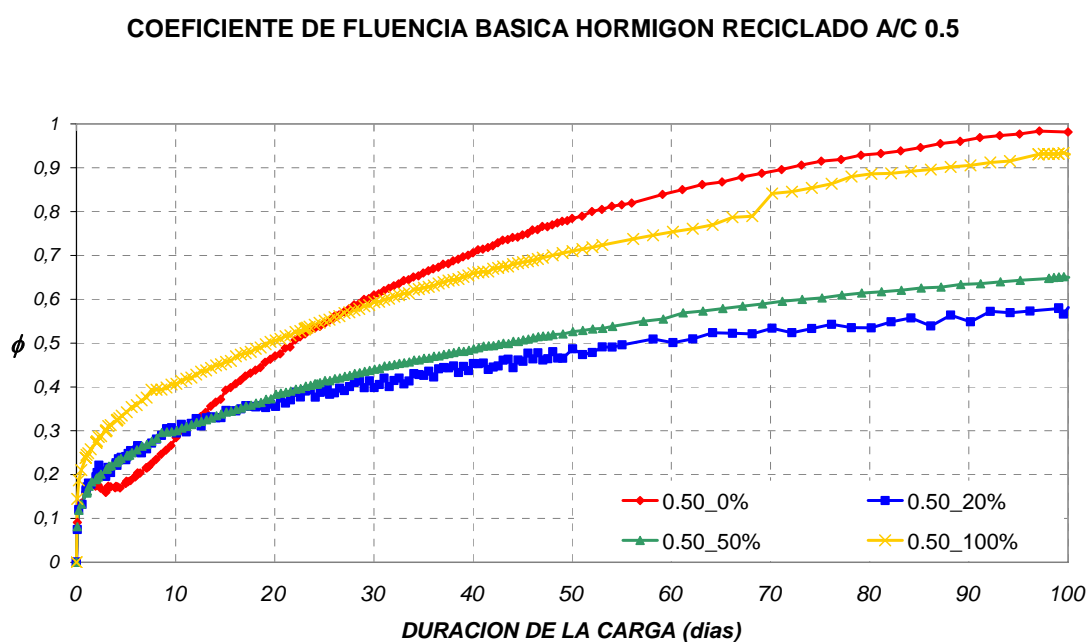


Grafico 83, Coeficiente de fluencia básica de hormigón reciclado relación a/c 0.5

Nos debemos Remitir nuevamente a la fluencia específica para realizar comparaciones entre los 4 hormigones reciclados de relación agua/cemento 0.50 protegidos del secado.

En el siguiente grafico se puede apreciar como mientras los hormigones reciclados mantienen una relación directa entre el contenido de áridos reciclados y fluencia específica básica del hormigón, el hormigón de control aunque inicia con una tasa menor que los demás, termina por obtener valores similares a los obtenidos para sustitución de la mitad de la fracción gruesa (0.5-50%_basic).

FLUENCIA ESPECIFICA BASICA HORMIGON RECICLADO A/C 0.5

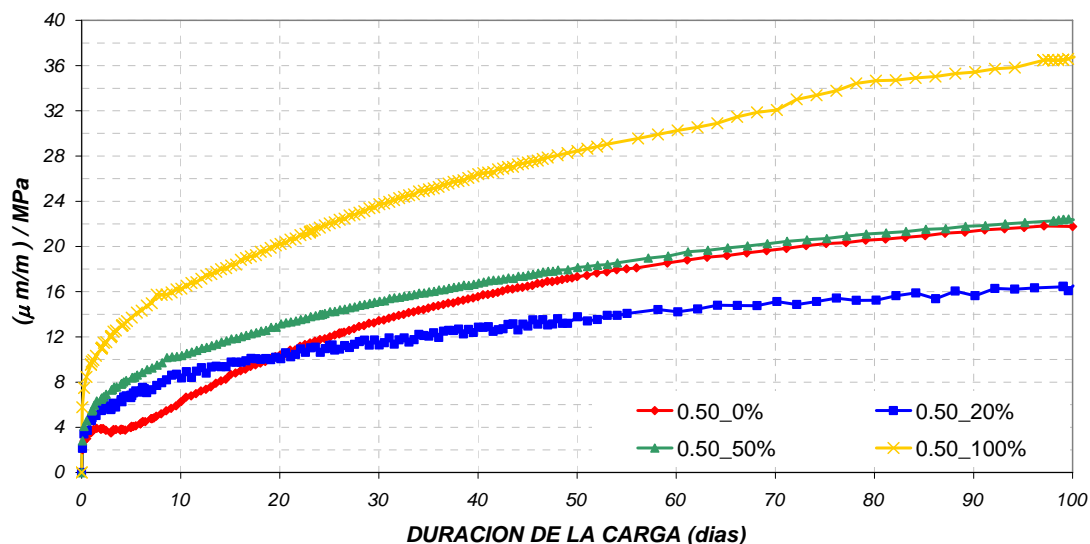


Gráfico 84, Fluencia específica básica de hormigón reciclado relación a/c 0.5

5.5.3 Fluencia de Hormigón Reciclado Relación a/c 0.65 Condición Expuesta.

sustitución	Carga aplicada (Ton)
0%	26
20%	25
50%	26
100%	26

Tabla 48, Carga aplicada en ensayo de fluencia a hormigones relación a/c 0.65

Aunque los hormigones reciclados con relación agua/cemento 0.65 fueron sometidos a una carga muy similar, el hormigón con sustitución total de la fracción gruesa por áridos reciclados gruesos (0.65-100%_dry) presenta una gran deformación comparada con los demás hormigones, tal y como sucedía en el ensayo de retracción por secado.

DEFORMACIONES DIFERIDAS POR FLUENCIA HORMIGON A/C 0.65

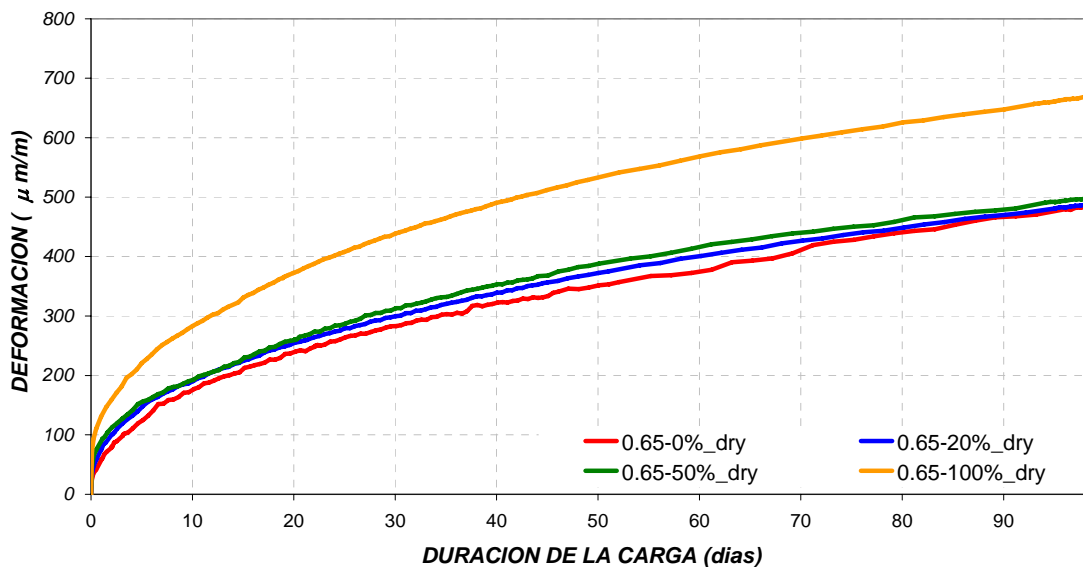


Grafico 85, Deformación total de fluencia de hormigón reciclado relación a/c 0.65

COEFICIENTE DE FLUENCIA TOTAL HORMIGON RELACION A/C 0.65

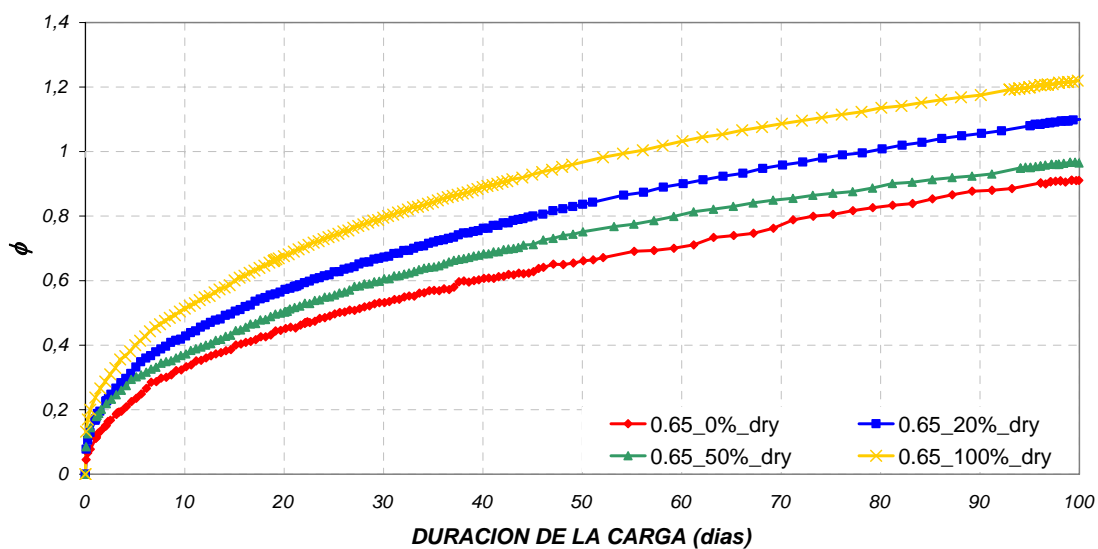


Grafico 86, Coeficiente fluencia de hormigón reciclado relación a/c 0.65

Contrario a lo sucedido en el hormigón de relación agua/cemento 0.5, en el 0.65, si hay diferencias apreciables entre cada uno de los niveles de sustitución utilizados, indicando que el hormigón reciclado con relación agua/cemento 0.65 además de que incrementa su deformación elástica instantánea al incrementar el contenido de áridos reciclados, aumenta la tasa de deformación con el tiempo bajo carga sostenida.

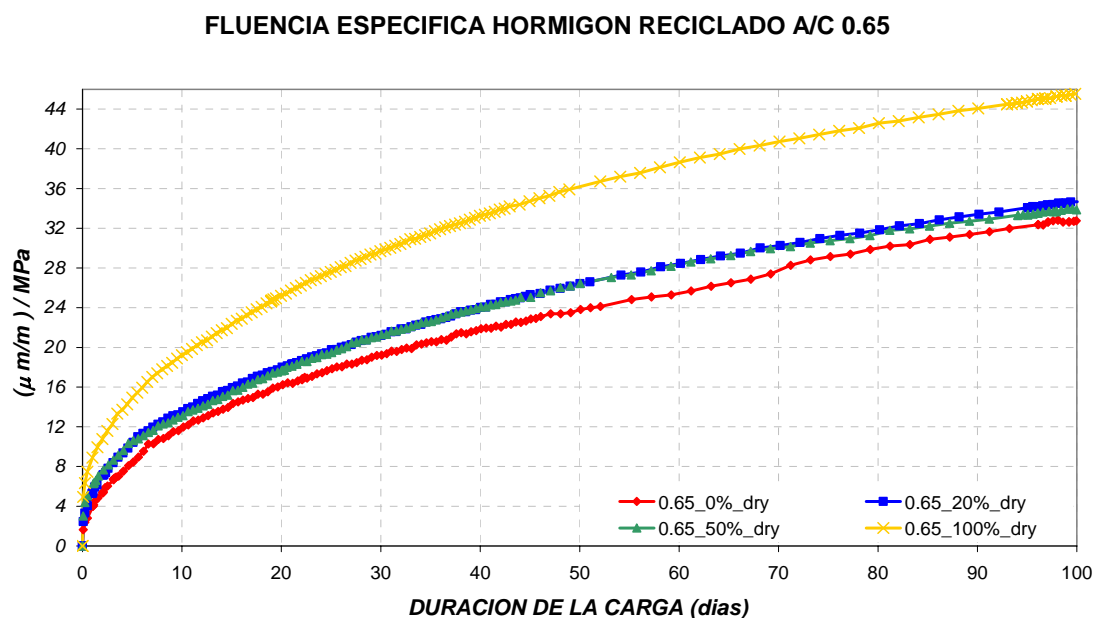


Grafico 87, Fluencia específica de hormigón reciclado relación a/c 0.65

En este caso los hormigones de relación a/c 0.65, de control, con sustitución 20% y con sustitución 50% obtienen similar deformación por unidad de tensión aplicada, mientras el hormigón con 100% de sustitución, alcanza un valor, 34% mayor a estos.

5.5.4 Fluencia de Hormigón Reciclado relación a/c 0.65 Condición Sellada

Sucede de igual forma que para el hormigón 0.5 sellado, la deformación básica en el hormigón sin reciclado es mayor de la que se espera, sin embargo en los primeros días del ensayo la deformación es menor.

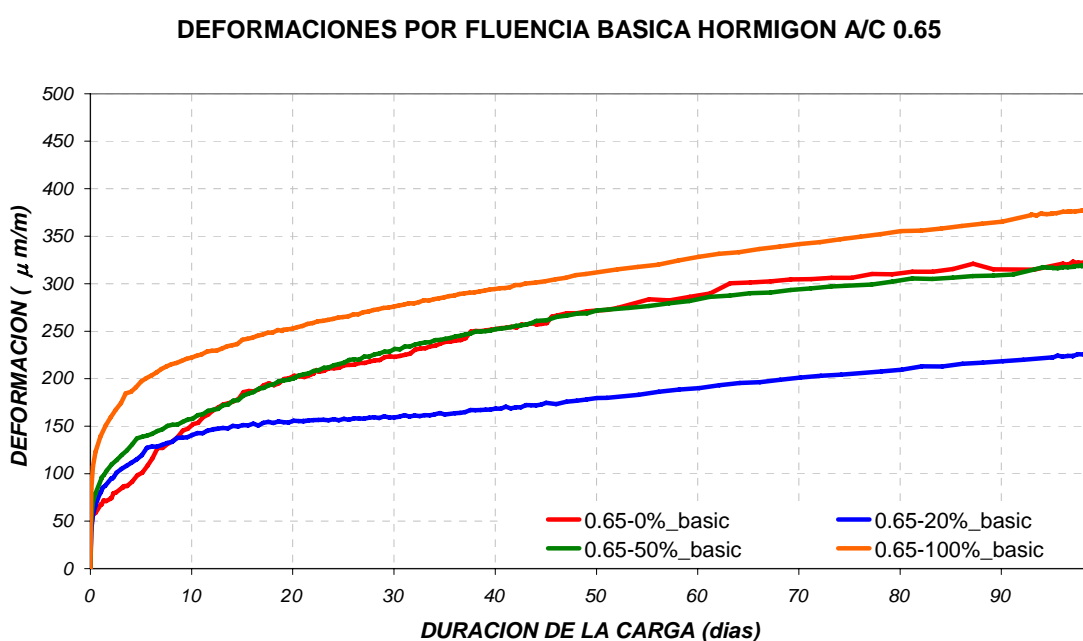


Grafico 88, Deformación de fluencia básica del hormigón reciclado relación a/c 0.65

De forma similar que en el hormigón reciclado relación a/c 0.5 sellado, el hormigón de control (0.65-0%_basic) tiene un alto valor de coeficiente de fluencia con respecto al hormigón reciclado no obstante alrededor del día 70 de fluencia se observa que la tasa de fluencia empieza a decrecer.

COEFICIENTE DE FLUENCIA BASICA HORMIGON RECICLADO A/C 0.65

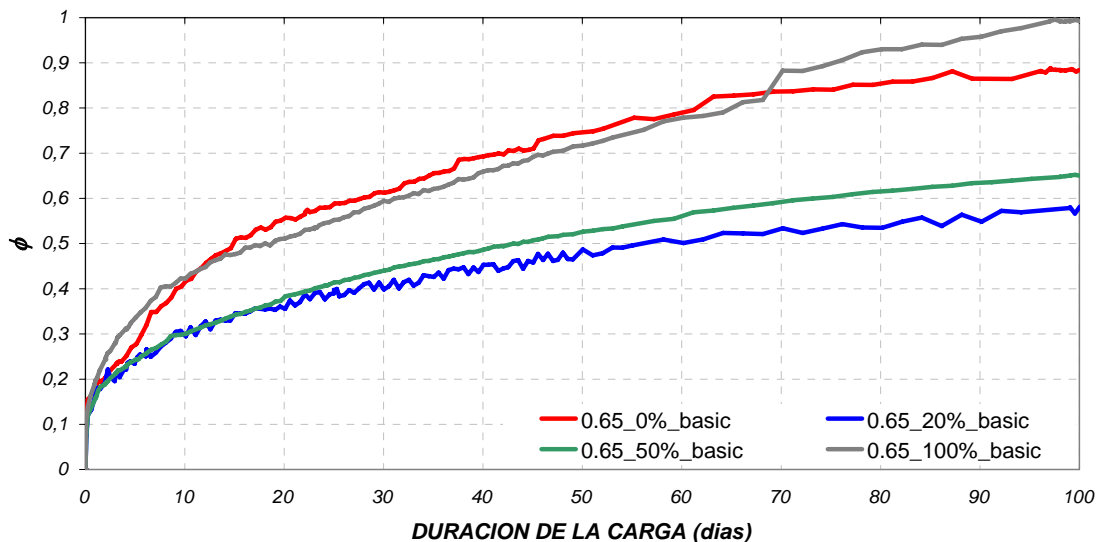


Grafico 89, Coeficiente fluencia básica del hormigón reciclado relación a/c 0.65

FLUENCIA ESPECIFICA HORMIGON RECICLADO A/C 0.65

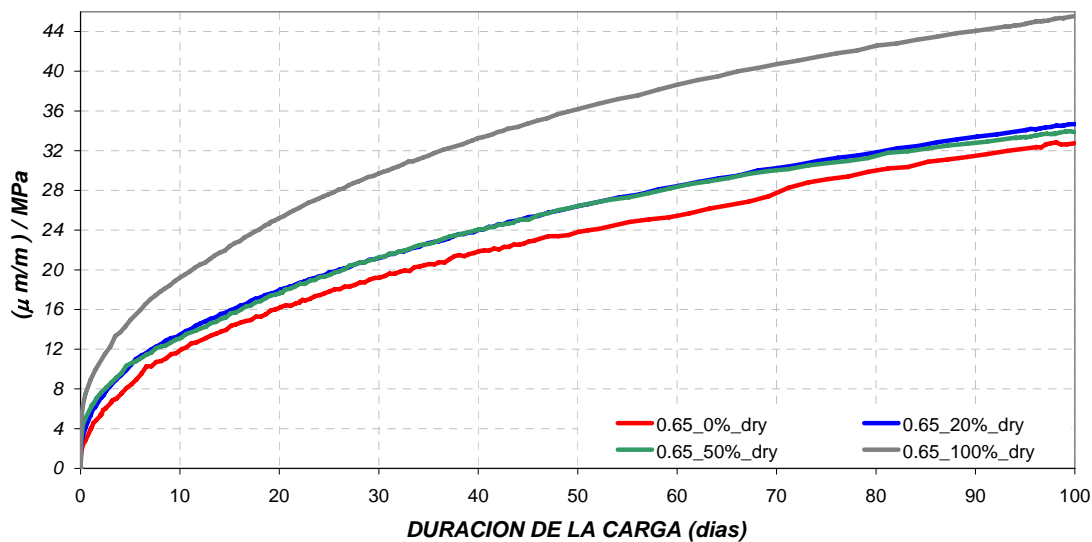


Grafico 90, Fluencia específica básica de hormigón reciclado relación a/c 0.65

5.6 EVALUACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN DE FLUENCIA.

Para la evaluación de los modelos de fluencia se utilizaron los modelos propuestos por el comité 209 del ACI, el Código modelo del 90 y el propuesto por Bazant (B3). Para ello se utilizaron los resultados de cada mezcla, tales como dosificación, consistencia, resistencia a compresión, modulo elástico y condiciones ambientales. Además para los valores “constante” de cada modelo se recurrió a los recomendados por cada propuesta.

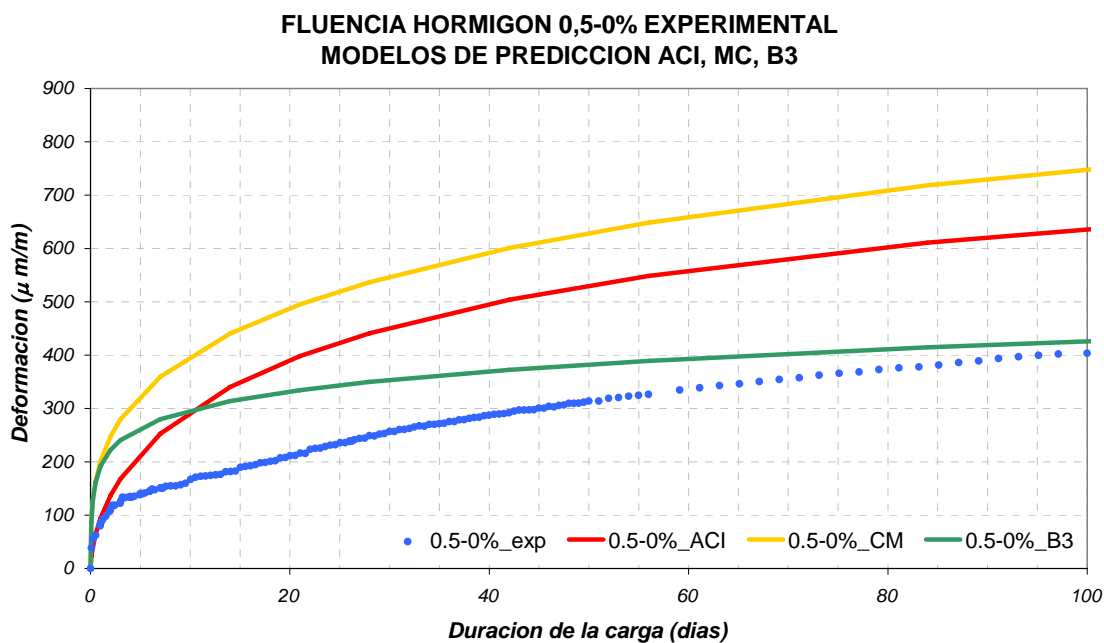


Grafico 91, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.5_0%

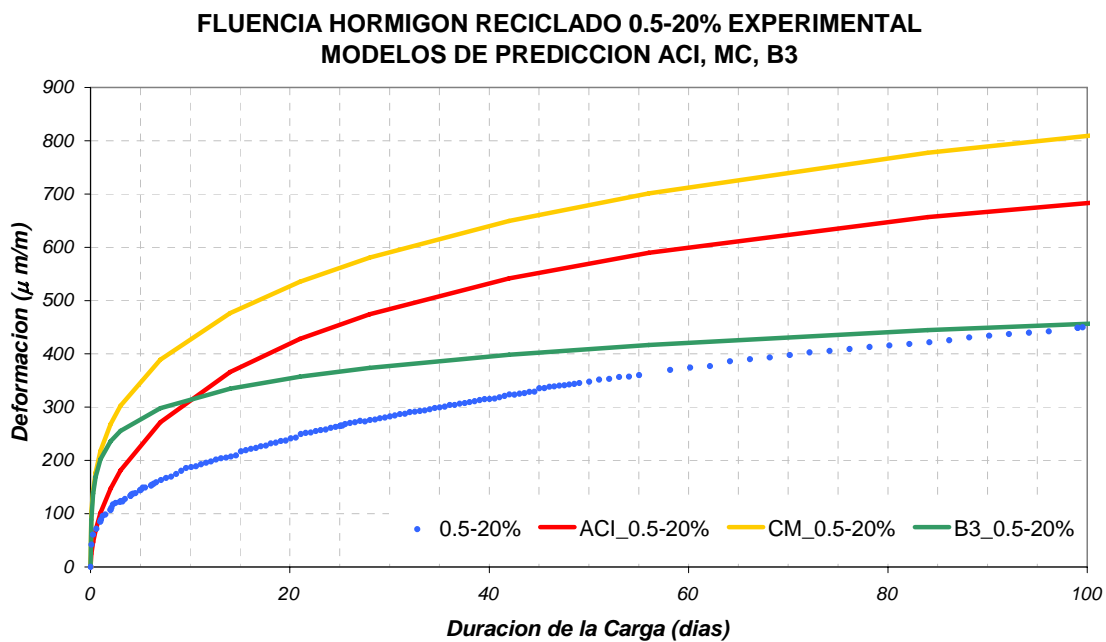


Grafico 92, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.5_20%.

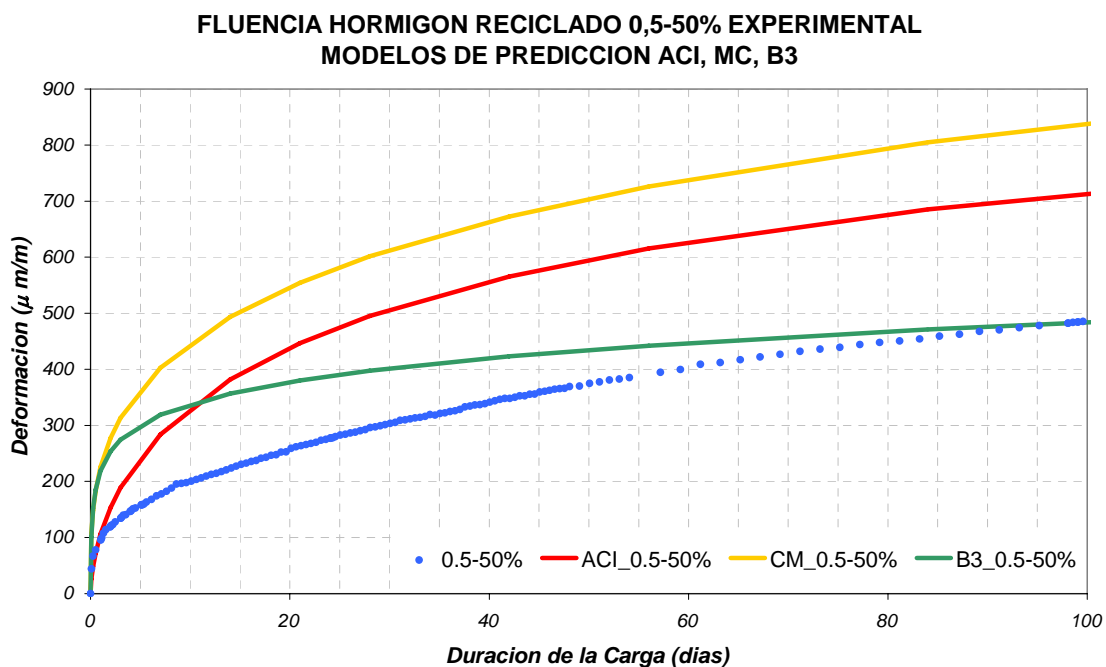


Grafico 93, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.5_50%.

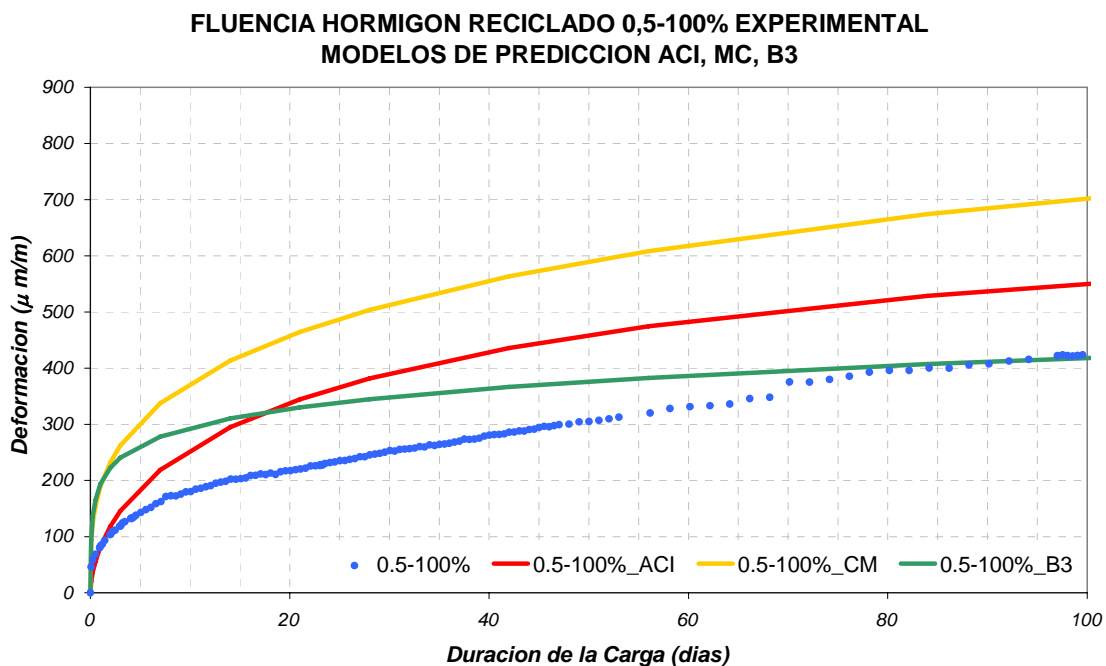


Grafico 94, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.5_100%.

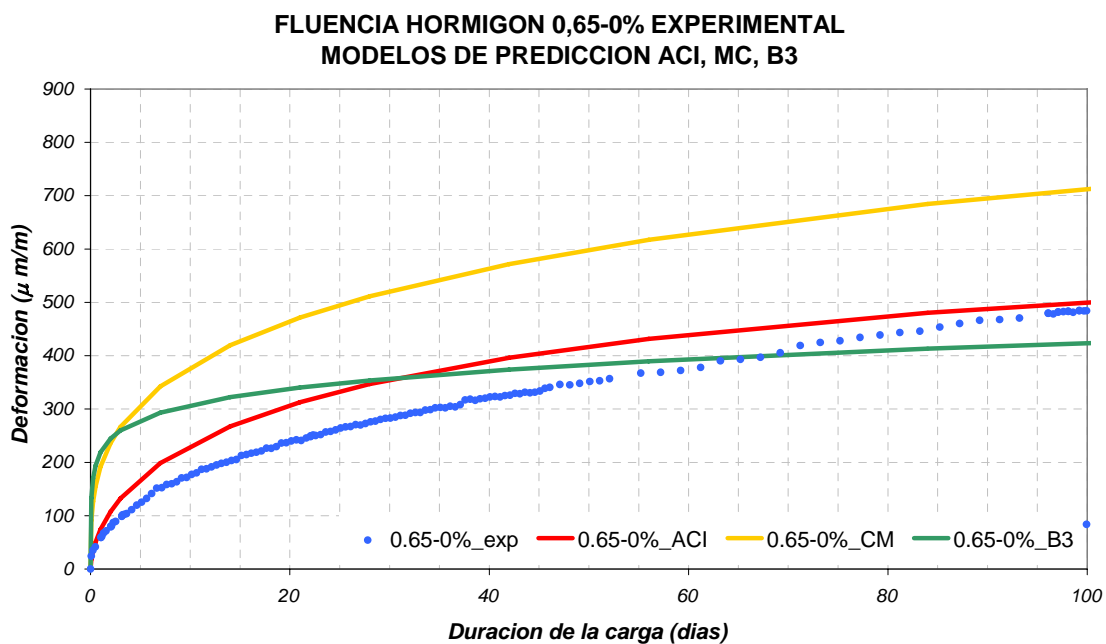


Grafico 95, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.65_0%.

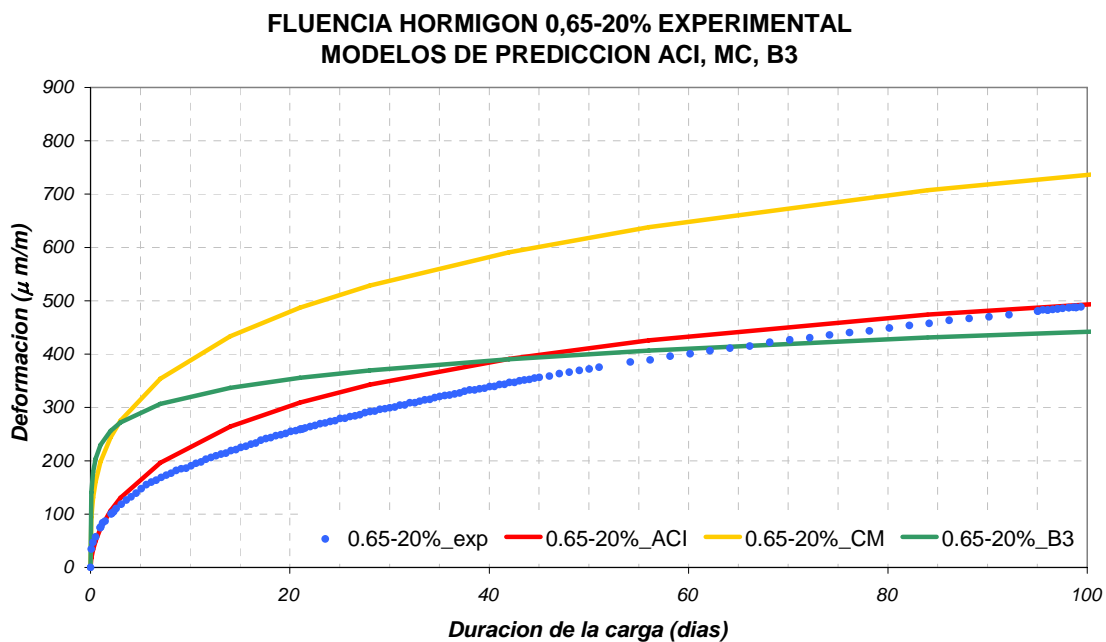


Grafico 96, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.65_20%.

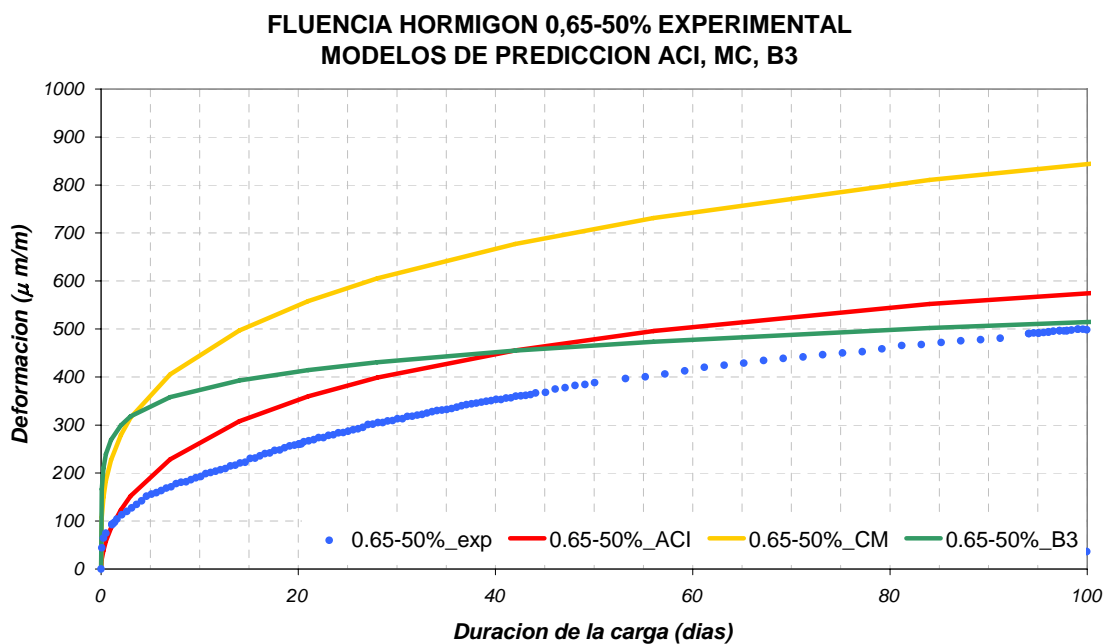


Grafico 97, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.65_50%.

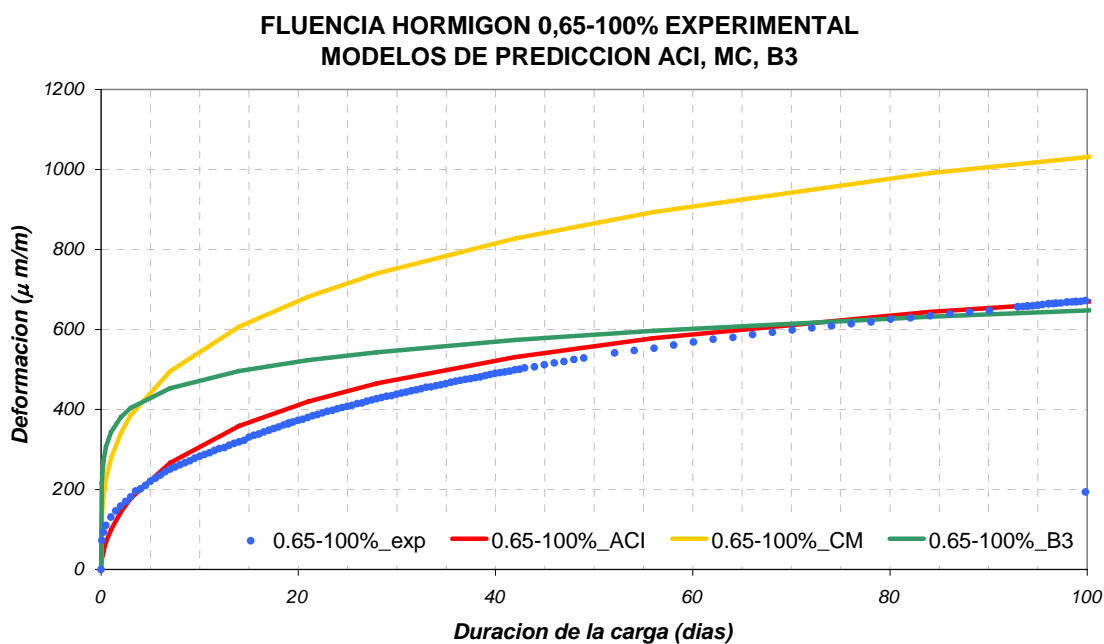


Grafico 98, Fluencia experimental y prevista hormigón reciclado 0.5_100%.

En términos generales y puesto que las deformaciones experimentales de fluencia del hormigón de relación a/c 0,50 fueron menores que las previstas por los modelos consultados, la predicción realizada por el modelo B3 resulta la más acertada, observándose una desviación menor que la existente con los otros modelos.

Para el caso del hormigón con relación a/c 0,65 el modelo ACI, presenta un ajuste bastante bueno, muy similar al desarrollo de deformación experimental y siempre por encima de este resultando conveniente su utilización.

5.7 PREDICCIÓN DE LAS DEFORMACIONES DIFERIDAS A LARGO PLAZO, POR MEDIO LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE ENSAYOS A MEDIANO PLAZO.

5.7.1 Retracción a Largo Plazo.

Para actualizar la retracción por medio de los valores experimentales, se utilizan los valores de masa tomados en el ensayo de retracción lo que significa la tasa de secado de cada hormigón.

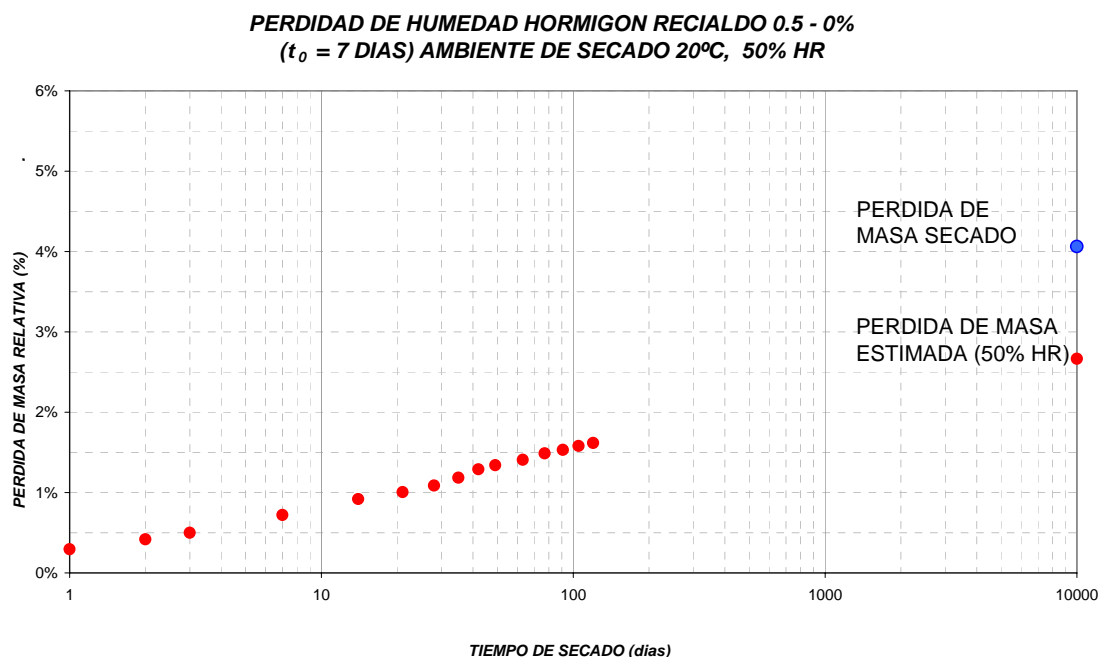


Gráfico 99, Perdida de masa relativa en el proceso de secado del hormigón control relación a/c 0.50

A través de la tendencia de secado y por medio de un ajuste de mínimos cuadrados, se recalcula la retracción a medio tiempo, una vez actualizado ajustamos la curva de retracción.

**RETRACCION EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELO B3 ACTUALIZADO
HORMIGON RELACION a/c 0,5 (t₀ = 7 DIAS) AMBIENTE 20°C, 50% HR**

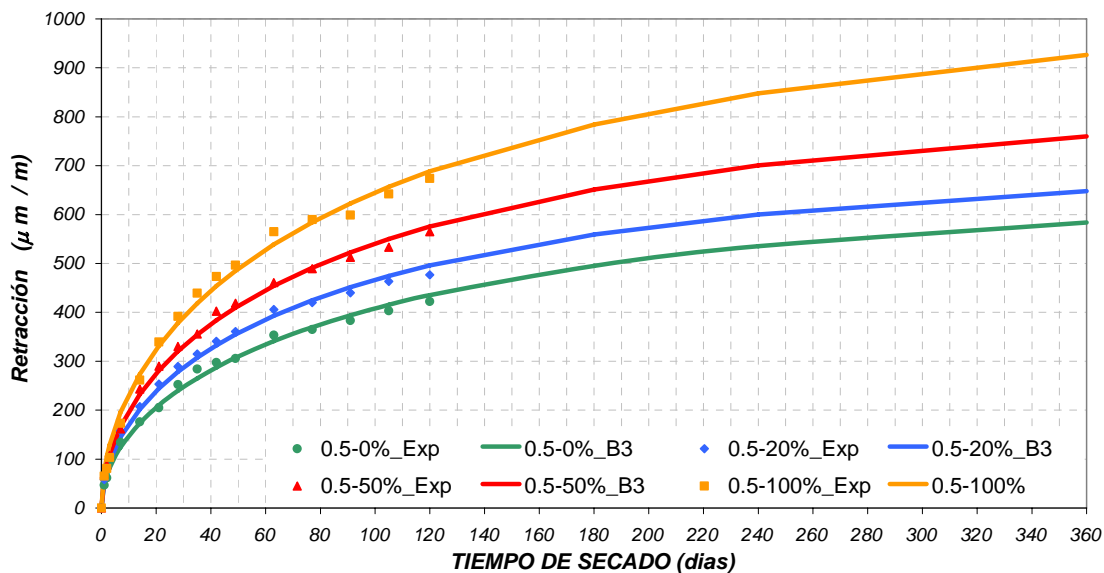


Grafico 100, Retracción a un año, prevista por modelo B3 actualizado con valores experimentales, Hormigón reciclado relación agua/cemento 0.5, curado 7 días.

**RETRACCION EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELO B3 ACTUALIZADO
HORMIGON RELACION a/c 0,65 (t₀ = 7 DIAS) AMBIENTE 20°C, 50% HR**

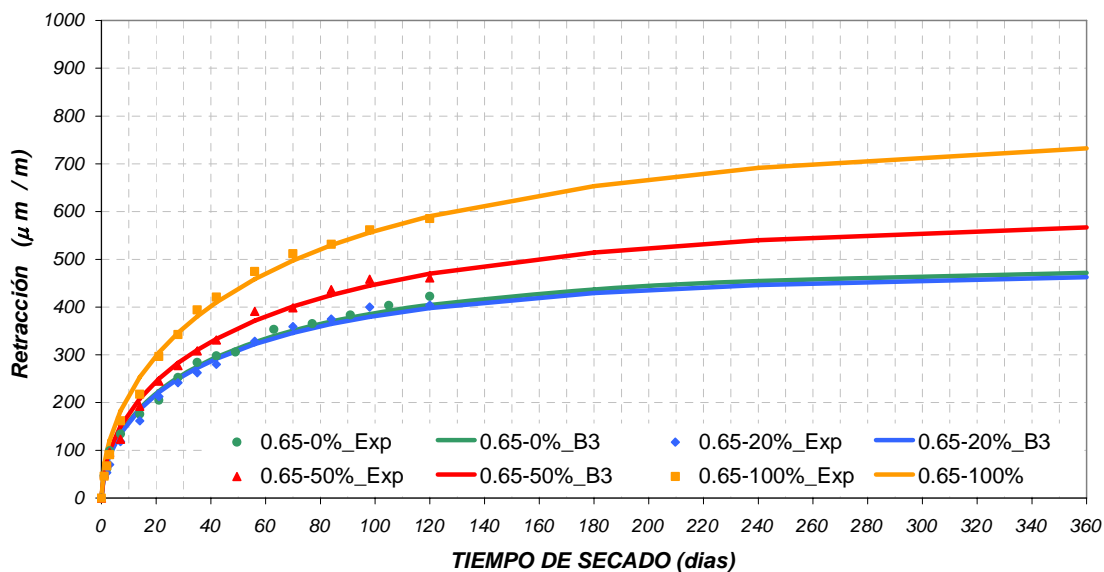


Grafico 101, Retracción a un año, prevista por modelo B3 actualizado con valores experimentales, Hormigón reciclado relación agua/cemento 0.65, curado 7 días.

Contenido de áridos reciclados	Relación a/c 0.50		Relación a/c 0.65	
	Retracción 1 año (μ m/m)	Relativa	Retracción 1 año (μ m/m)	Relativa
0%	582,46	1	471,46	1
20%	646,22	1,11	462,48	0,98
50%	759,04	1,30	566,62	1,20
100%	931,18	1,59	732,52	1,55

Tabla 49, Retracción a 1 año, del hormigón reciclado, curado 7 días

Contenido de áridos reciclados	Relación a/c 0.50		Relación a/c 0.65	
	Retracción ultima (μ m/m)	Relativa	Retracción ultima (μ m/m)	Relativa
0%	769,5	1	561,7	1
20%	830,7	1,08	550,1	0,98
50%	985,3	1,28	686,3	1,22
100%	1234,6	1,60	902,8	1,60

Tabla 50, Retracción a tiempo final, del hormigón reciclado curado 7 días.

DESARROLLO DE LA RETRACCION HORMIGON A/C 0.5 CURADO 7 DIAS
Duración Del Secado (28, 50 Y 120 Dias exp) Previsto 1 y 30 años
20°C 50%HR

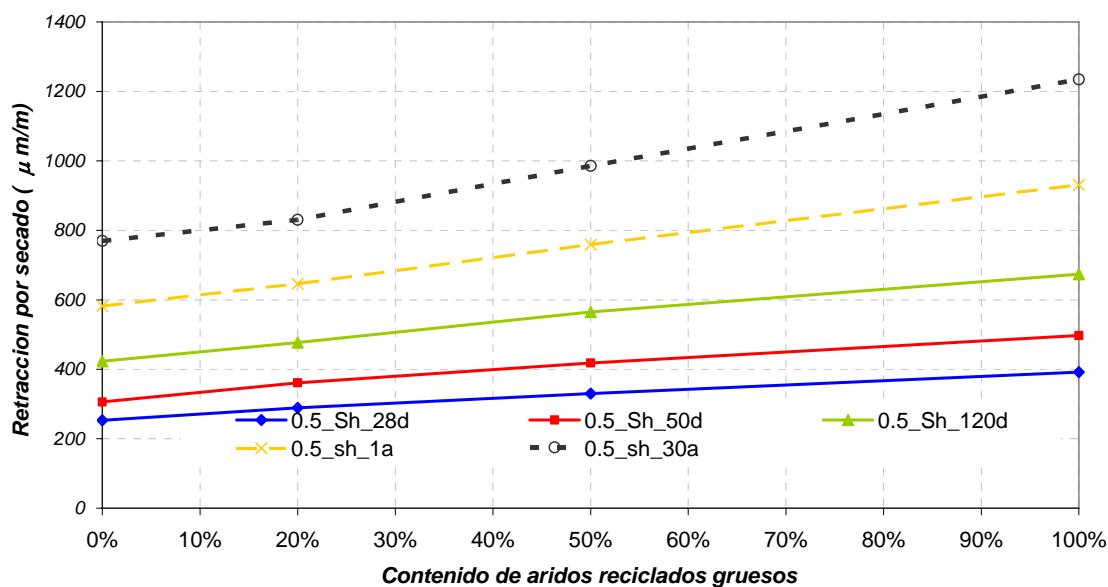


Grafico 102, Influencia del contenido de áridos reciclados en la retracción del hormigón de relación a/c 0.5, curado por 7 días

Una sustitución del 20% de reciclado produce incrementos de 0% a 10% en la retracción, cuando se sustituye 50% de áridos, los incrementos van del 20% al 30% y cuando se sustituye la totalidad del árido reciclado el incremento en la retracción alcanza un 60%.

Comparando los resultados experimentales y los previstos a tiempo final, podemos calcular el grado de deformación alcanzado en los ensayos realizados.

Contenido de RA	Relación a/c 0.5	Relación a/c 0.65
0%	56%	72%
20%	60%	72%
50%	58%	68%
100%	56%	65%

Tabla 51, Nivel de retracción alcanzada a 120 días.

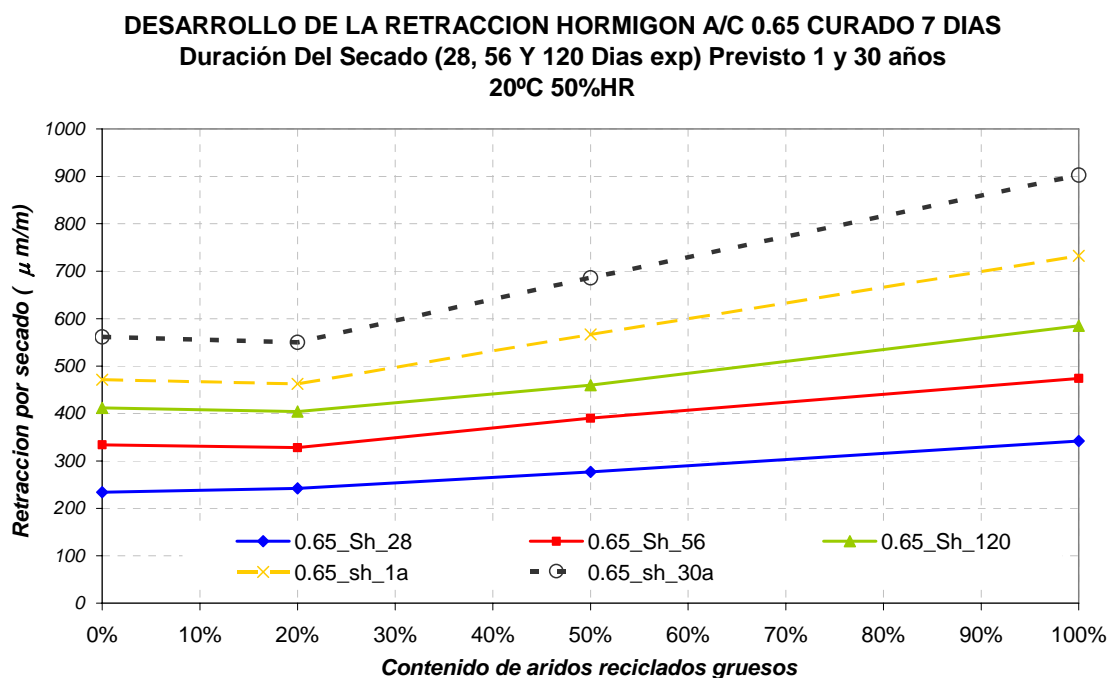


Gráfico 103, Influencia del contenido de áridos reciclados en la retracción del hormigón de relación a/c 0.65, curado por 7 días

Exceptuando el hormigón 0,5-0%, se observa que aunque de que los hormigones reciclados alcanzan mayor retracción, esta se desarrolla a una tasa menor, esto por efecto de retención de humedad de los áridos reciclados. A su vez el hormigón reciclado de menor relación agua cemento “resistencia elevada” tiene una tasa menor de desarrollo de retracción, y es que es un poco mas impermeable que el otro hormigón “resistencia convencional”.

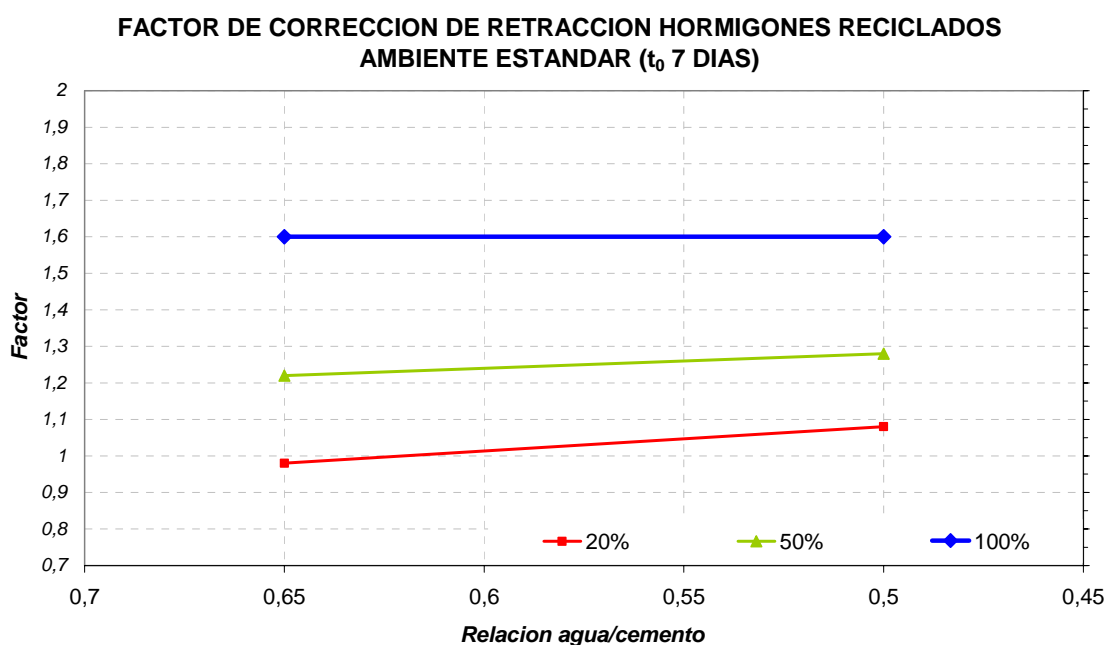


Grafico 104, Factor de Corrección de la deformación por retracción en hormigones reciclados de resistencia convencional y resistencia elevada, curados por 7 días.

Contenido de áridos reciclados	Relación a/c 0.50		Relación a/c 0.65	
	Retracción 1 año (μ m/m)	Relativa	Retracción 1 año (μ m/m)	Relativa
0%	526.64	1	440.77	1
20%	622.15	1.18	441.72	1
50%	716.00	1.36	519.49	1.18
100%	906.83	1.72	709.44	1.61

Tabla 52, Retracción a 1 año, del hormigón reciclado curado 28 días.

**RETRACCION EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELO B3 ACTUALIZADO
HORMIGON RELACION a/c 0,5 (t₀ = 28 DIAS) AMBIENTE 20°C, 50% HR**

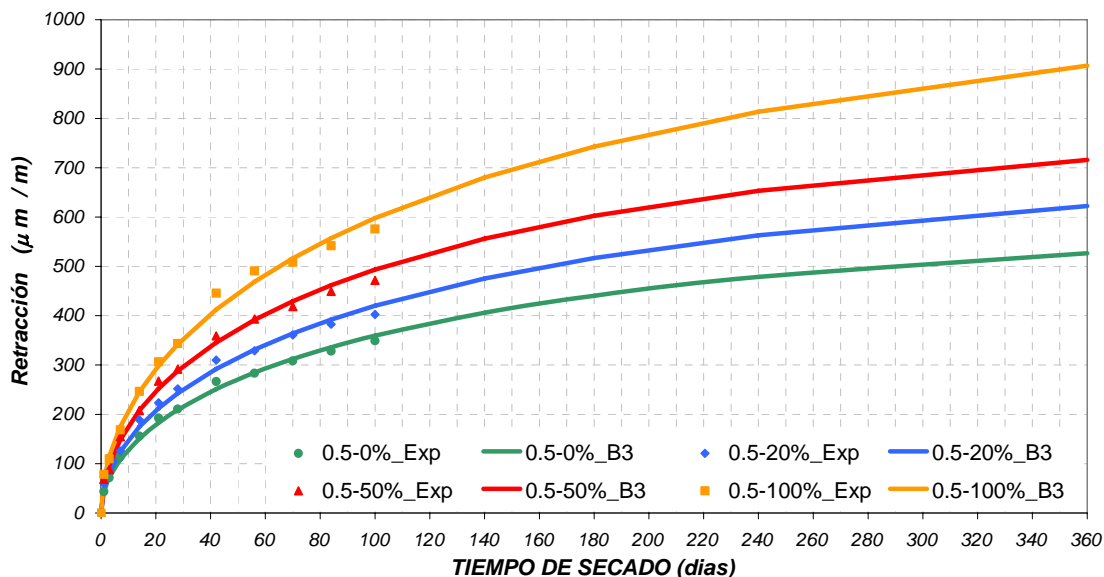


Gráfico 105, Retracción a un año, prevista por modelo B3 actualizado con valores experimentales, Hormigón reciclado relación agua/cemento 0.5, curado 28 días.

**RETRACCION EXPERIMENTAL - PREVISTA POR MODELO B3 ACTUALIZADO
HORMIGON RELACION a/c 0,65 (t₀ = 28 DIAS) AMBIENTE 20°C, 50% HR**

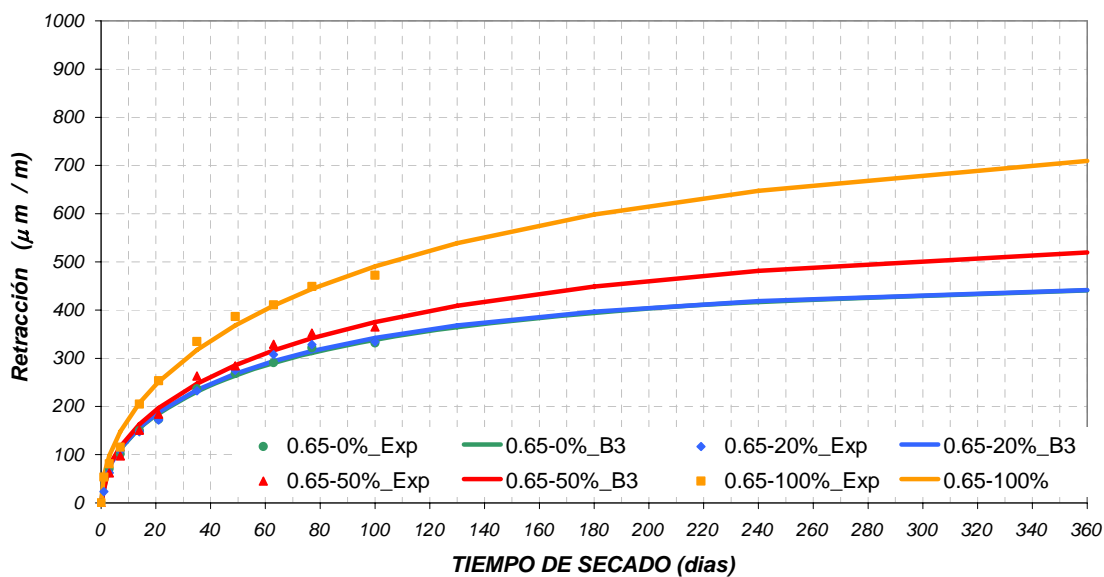


Gráfico 106, Retracción a un año, prevista por modelo B3 actualizado con valores experimentales, Hormigón reciclado relación agua/cemento 0.65, curado 28 días.

Contenido de áridos reciclados	Relación a/c 0.50		Relación a/c 0.65	
	Retracción 1 año (μ m/m)	Relativa	Retracción 1 año (μ m/m)	Relativa
0%	713.76	1	541.81	1
20%	854.31	1.19	540.24	1
50%	959.44	1.34	666.17	1.23
100%	1285.86	1.80	947.34	1.75

Tabla 53, Retracción a tiempo final, del hormigón reciclado curado 28 días.

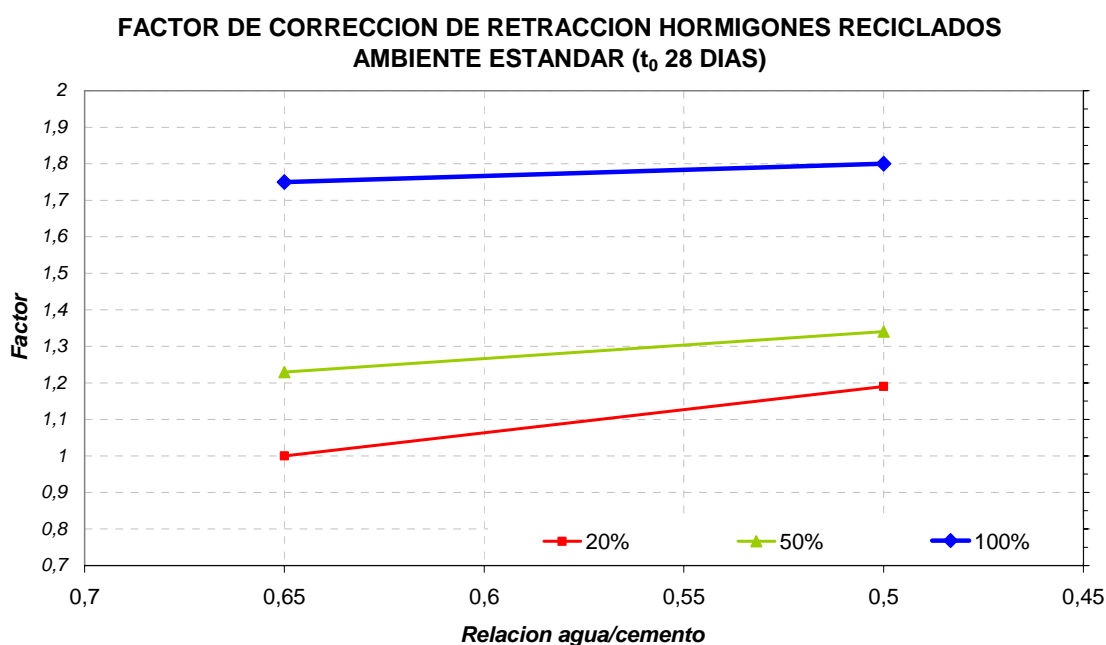


Grafico 107, Factor de Corrección de la deformación por retracción en hormigones reciclados de resistencia convencional y resistencia elevada, curados por 28 días.

Tanto, cuando realizamos un curado de 7 días, como cuando se cura por 28 días, el hormigón reciclado de relación a/c 0.5, Obtiene las mayores deformaciones de fluencia y presenta mayor influencia por efecto del contenido de áridos reciclados cuando las sustituciones son moderadas, no obstante cuando la sustitución de áridos reciclados corresponde a la totalidad de la fracción gruesa, los incrementos de la deformación de retracción son similares para los 2 hormigones.

Otro factor observado al proyectar la deformación a 1 año, es que el efecto que tiene la duración del curado sobre la deformación de retracción se va perdiendo. Aunque se puede notar una menor afectación a medida que aumenta el contenido de áridos saturados y de manera especial en el hormigón de relación a/c 0,50.

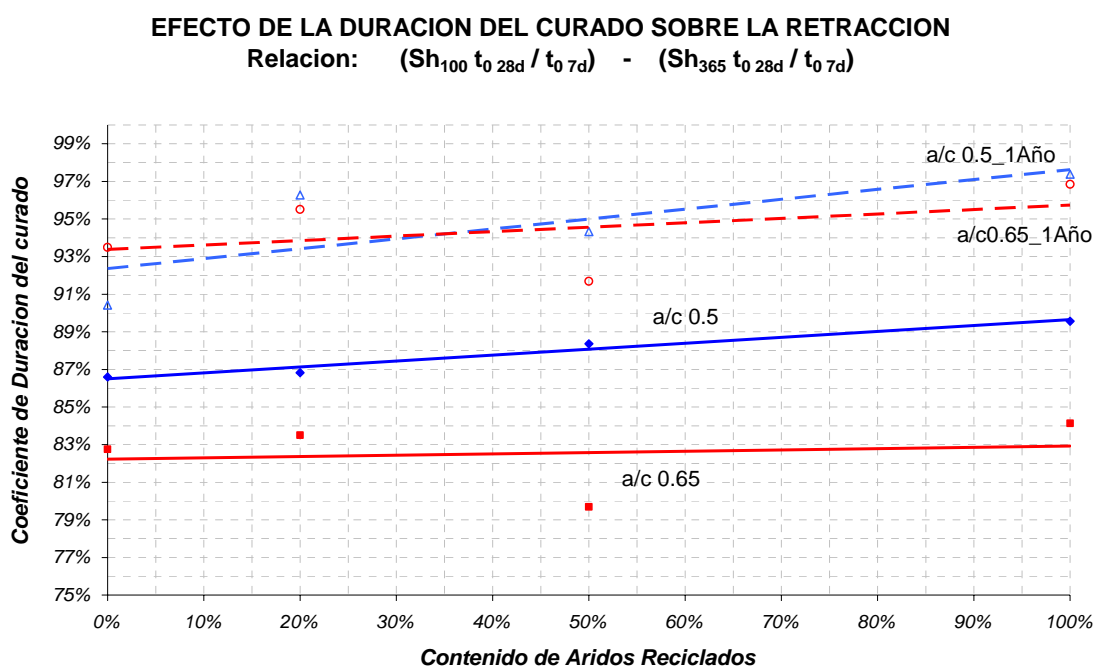


Grafico 108, Efecto de la duración del curado sobre la retracción

5.7.2 Fluencia a Largo Plazo

Con base en las deformaciones experimentales a 100 días, y el modelo propuesto por el ACI, se actualizó el valor del coeficiente último de fluencia, por medio de regresión de mínimos cuadráticos en iteraciones por el método de Newton.

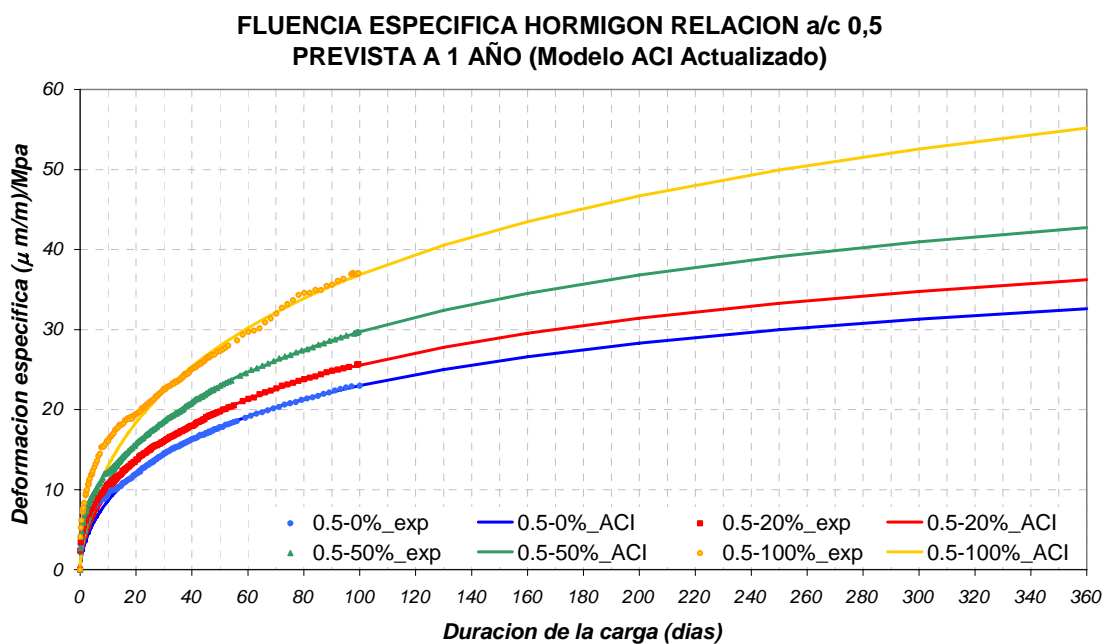


Grafico 109, proyección de fluencia específica a 1 año, hormigón reciclado a/c 0.5

Hormigón	Coefficiente Último de fluencia (ϕ_u)
0.5 - 0%	1.852
0.5 - 20%	1.899
0.5 - 50%	2.150
0.5 - 100%	2.574

Tabla 54, Coeficiente Último de fluencia Hormigón reciclado relación a/c 0.5

Hormigón	Fluencia Especifica (1 año) (μ m/m) /Mpa	Relativo	Fluencia Especifica (ultima) (μ m/m) /Mpa	Relativo
0.5 - 0%	32.71	1	47.23	1
0.5 - 20%	36.33	1,11	52.84	1.12
0.5 - 50%	42.89	1,31	63.85	1.35
0.5 - 100%	55.38	1,69	88.14	1.87

Tabla 55, Fluencia Especifica 1 año y ultima, Hormigón reciclado relación a/c 0.5

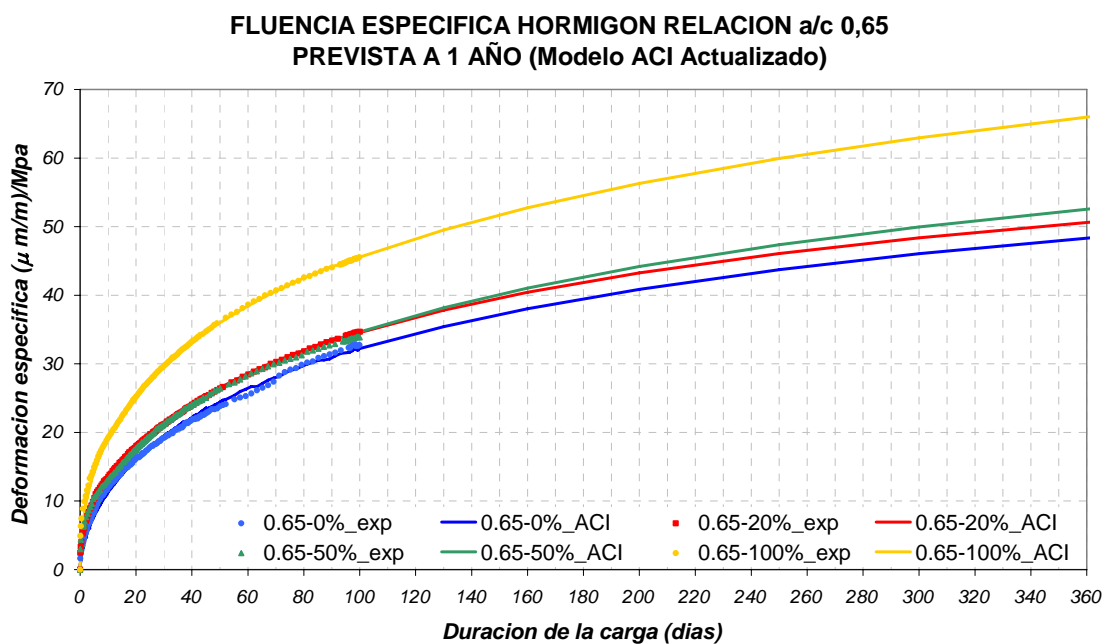


Grafico 110, proyección de fluencia especifica a 1 año, hormigón reciclado a/c 0.65

Hormigón	Coefficiente Ultimo de fluencia (ϕ_u)
0.65 - 0%	3.019
0.65 - 20%	2.839
0.65 - 50%	2.924
0.65 - 100%	3.584

Tabla 56, Coeficiente Ultimo de fluencia Hormigón reciclado relación a/c 0.65

Hormigón	Fluencia Especifica (1 año) (μ m/m) /Mpa	Relativo	Fluencia Especifica (ultima) (μ m/m) /Mpa	Relativo
0.65 - 0%	48.54	1	77.70	1
0.65 - 20%	51.40	1.05	78.86	1.01
0.65 - 50%	52.75	1.09	86.01	1.11
0.65 - 100%	66.22	1.36	113.5	1.46

Tabla 57, Fluencia Especifica 1 año y ultima, Hormigón reciclado relación a/c 0.65

Fluencia y retracción de hormigón de áridos reciclados

HORMIGÓN		EDAD	ϵ_c (μ m/m)		ϕ (coef. De fluencia)		fluencia específica	
			Básica	Total	Básico	Total	Básica	Total
0.5	0%	t-t ₀ = 28 días	228,5	249,0	0,5871	0,5307	13,03	14,19
	20%		204,0	275,8	0,4101	0,5276	11,63	15,72
	50%		241,9	296,2	0,4306	0,5773	14,74	18,05
	100%		257,4	245,5	0,5749	0,5768	22,74	21,69
0.65	0%		217,9	272,8	0,5983	0,5133	14,81	18,54
	20%		158,9	290,2	0,3556	0,6518	11,23	20,51
	50%		225,4	305,0	0,4001	0,5902	15,32	20,73
	100%		272,3	426,7	0,4775	0,7744	18,51	29,00
0.5	0%	t-t ₀ = 56 días	318,9	326,7	0,8194	0,6963	18,18	18,62
	20%		246,8	359,9	0,4961	0,6885	14,07	20,52
	50%		309,0	394,7	0,5500	0,7692	18,83	24,05
	100%		330,1	319,9	0,7373	0,7516	29,17	28,27
0.65	0%		282,3	368,6	0,7751	0,6935	19,19	25,05
	20%		186,2	389,0	0,4167	0,8738	13,16	27,50
	50%		276,5	400,4	0,4908	0,7748	18,79	27,21
	100%		320,1	553,2	0,5613	1,0040	21,76	37,60
0.5	0%	t-t ₀ = 100 días	382,1	403,6	0,9818	0,8602	21,78	23,01
	20%		289,2	448,0	0,5813	0,8571	16,49	25,54
	50%		366,1	485,2	0,6517	0,9456	22,31	29,57
	100%		416,7	422,2	0,9308	0,9920	36,82	37,30
0.65	0%		321,7	484,1	0,8833	0,9108	21,87	32,90
	20%		225,5	489,7	0,5047	1,1000	15,94	34,61
	50%		319,8	499,7	0,5676	0,9669	21,74	33,96
	100%		379,1	672,1	0,6647	1,2198	25,77	45,68

Tabla 58, Resumen de fluencia experimental hormigón reciclado

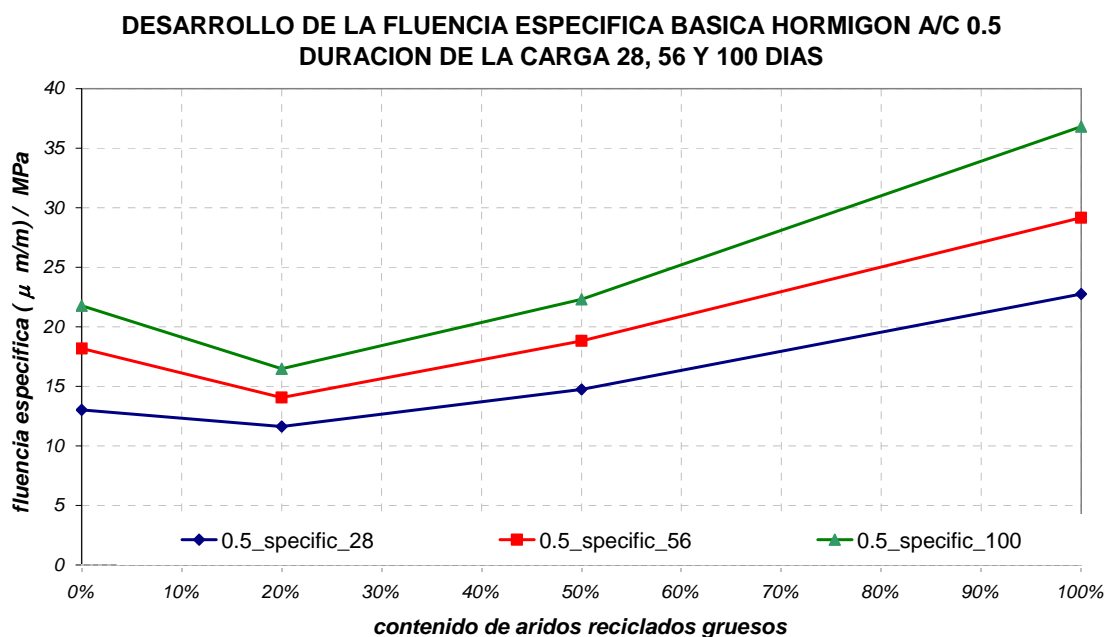


Grafico 111, Fluencia básica de hormigón reciclado relación a/c 0,5 en función del contenido de áridos reciclados gruesos

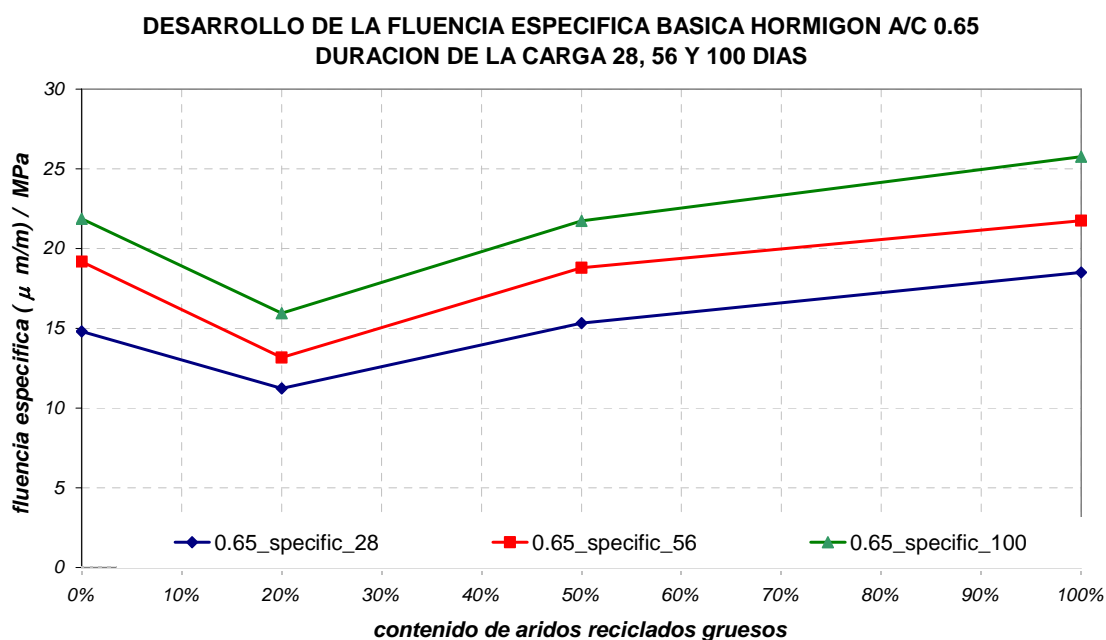


Grafico 112, Fluencia básica de hormigón reciclado relación a/c 0,65 en función del contenido de áridos reciclados gruesos

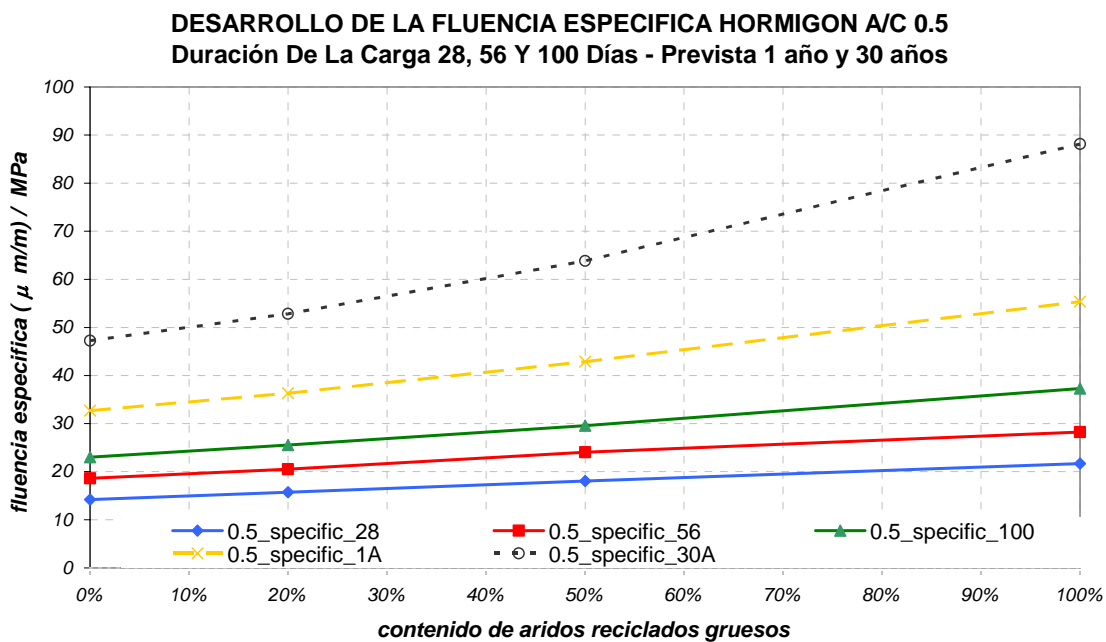


Gráfico 113, Fluencia total de hormigón reciclado relación a/c 0,5 en función del contenido de áridos reciclados gruesos

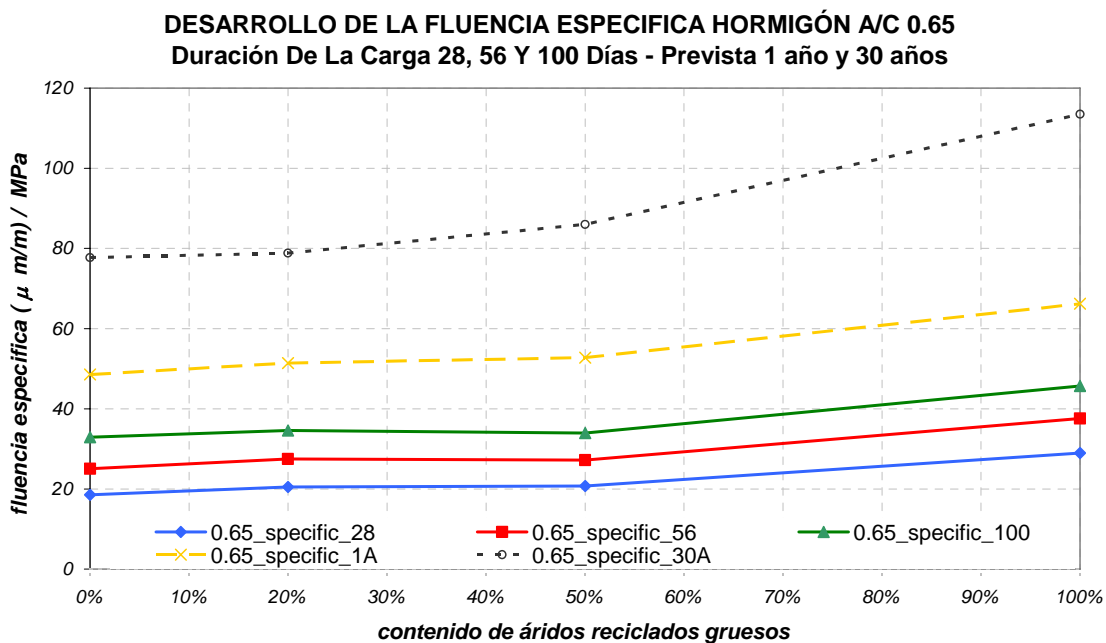


Gráfico 114, Fluencia total de hormigón reciclado relación a/c 0,65 en función del contenido de áridos reciclados gruesos

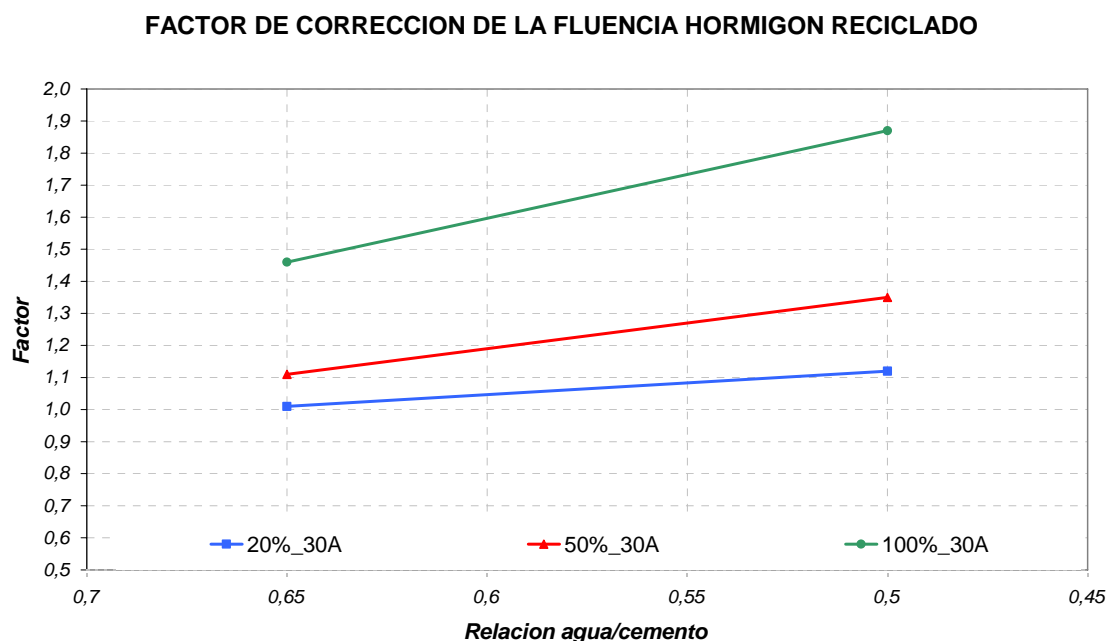


Grafico 115, Factor de Corrección de la deformación por fluencia en hormigones reciclados de resistencia convencional y resistencia elevada.

5.8 RELACIÓN PROPIEDADES DIFERIDAS - INSTANTÁNEAS.

Las recomendaciones de la *Rilem* y *Belgas* para la utilización tanto del árido reciclado procedente de hormigón (Tipo II) como para la mezcla de árido natural y árido reciclado (Tipo III), establecen un coeficiente de corrección de fluencia igual a 1, pues consideran que el incremento en la fluencia del hormigón reciclado, tiene su explicación en la disminución del módulo de elasticidad.

Deformación ultima de fluencia, proporcional a $\frac{1 + \phi_{(\infty, t_0)}}{E_{cm}}$

Al relacionar los incrementos de deformación por fluencia con los decrecimientos de modulo elástico, observamos que no existe una relación lineal entre ellos, o por lo menos proporcional, hecho por el cual no podríamos intuir las deformaciones,

con ensayos de deformación instantánea en sustituciones de áridos reciclados sin realizar ensayos específicos.

RETRACCION POR SECADO - DEFORMACION ELASTICA
(t_0 28days)- 20°C, 50% HR

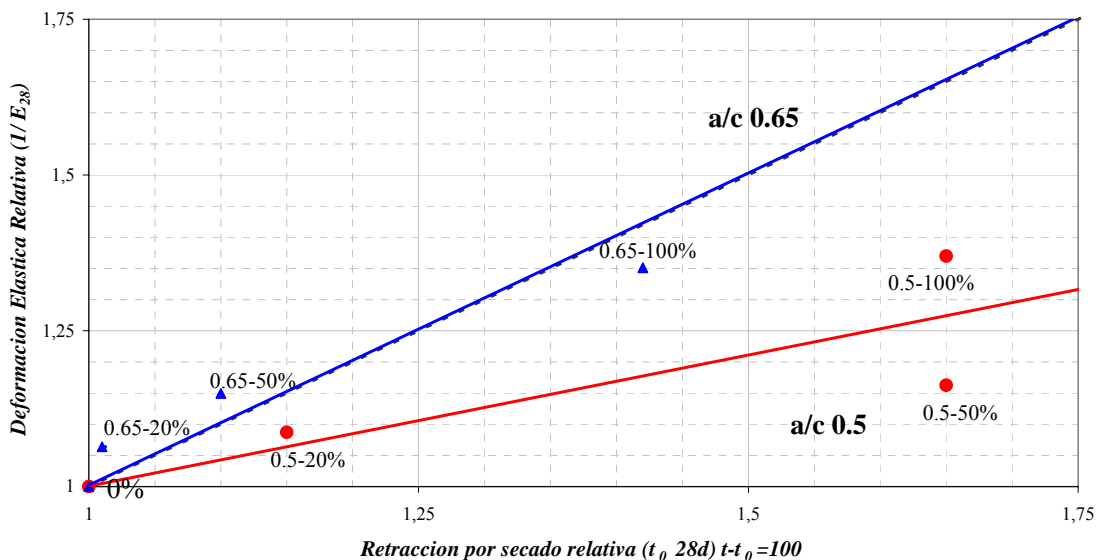


Grafico 116, Relación entre la retracción 100d y la deformación instantánea

DEFORMACION DE FLUENCIA - DEFORMACION ELASTICA
(t_0 28days)- 20°C, 50% HR

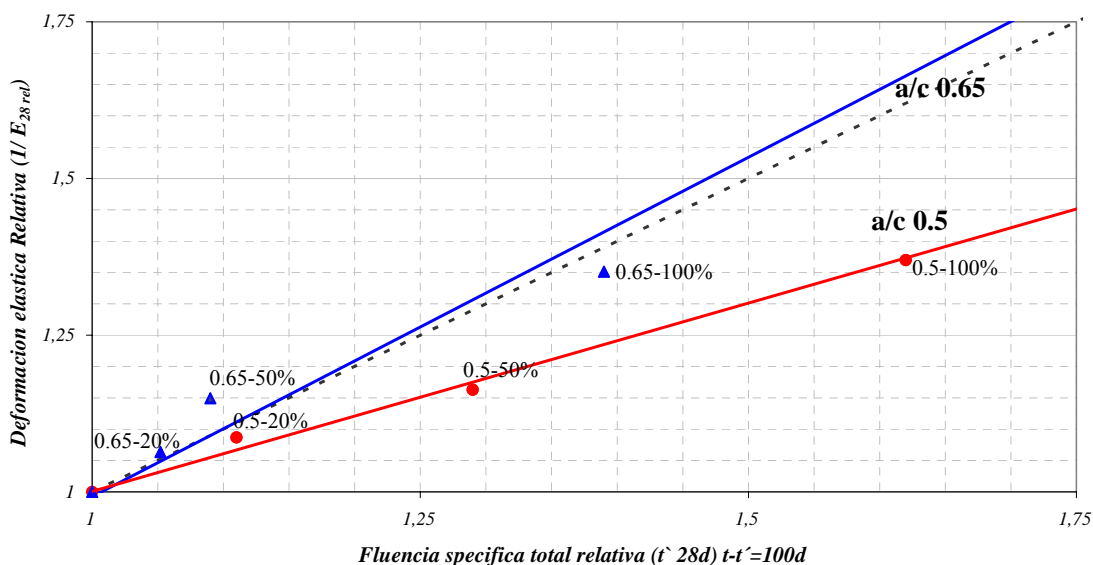


Grafico 117, Relación entre la fluencia específica total 100d y la deformación instantánea

CONCLUSIONES

Por medio de este estudio y sus ensayos, podemos clasificar el árido reciclado como potencialmente utilizable en hormigones de calidad estructural, según los resultados obtenidos, cumpliendo los mismos requerimientos de áridos naturales para hormigón.

La resistencia a compresión se ve influenciada por el contenido de áridos reciclados alcanzando disminución del 13% cuando la sustitución alcanza el máximo de la fracción gruesa, para sustituciones que recomienda la normativa española (20%) la disminución es apenas notable con un 2% a 3%. Aunque a la edad de 7 días la totalidad de hormigones ensayados superaban la resistencia característica. H40 y h30. En este sentido también se observa que no existe influencia sobre el valor de resistencia a edades mayores del hormigón, pues a 120 días las resistencias se equiparan, no obstante si ejerce dominio sobre la evolución de la resistencia a causa de sus propiedades higroscópicas.

En el modulo elástico a 28 días se observan descensos hasta del 26% - 27 % cuando se sustituye el total de árido grueso por áridos reciclados de hormigón, no obstante hasta para sustituciones bajas como la propuesta del 20% el descenso alcanza entre 6% a 8%, lo que indica la alta deformabilidad de los hormigones reciclados. Las diferencias en el modulo elástico se hacen menores a 120 días, en probetas expuestas a secado y con sustitución total, la diferencia disminuye al 14% para el hormigón convencional (a/c 0,65) y disminuye al 22% para el hormigón de resistencia elevada (a/c 0.5). Caso contrario ocurre cuando el modulo a 120 días es evaluado sobre probetas selladas, lo que se asemejaría a un “curado extendido”

pues la diferencia entre el módulo elástico de los hormigones reciclados y el del hormigón de control aumenta. Una “prolongación del curado” hace aumentar el módulo elástico en los hormigones con menor cantidad de áridos reciclados.

La retención de humedad, medida a través del contenido de agua interno, aumenta al aumentar el contenido de áridos reciclados, explicado por la estructura propia de los áridos reciclados. Aumenta también al disminuir la relación agua/cemento, debido a la mayor impermeabilidad. E igualmente aumenta cuando el ambiente presenta humedad relativa mayor.

Los resultados indican que un curado corto no afectan en gran medida a los hormigones reciclados respecto a las deformaciones de retracción, esto probablemente debido al efecto del rápido desarrollo de resistencia temprana del hormigón reciclado y al efecto interno que tiene la humedad.

La actualización de las deformaciones por medio del modelo B3 dan como resultado que las diferencias observadas a 100 días, tienden a aumentar, esto se explica por la cantidad de humedad que retienen los áridos reciclados, convirtiéndola en potencial de deformación.

Respondiendo al objetivo principal del trabajo, se proveen coeficientes que permitan estimar la retracción de hormigón con áridos reciclados:

Para el hormigón convencional (a/c 0.65 - f_c 30Mpa) con contenido de áridos reciclados menor al 20%, tal como lo recomienda la normativa española, la retracción no se ve afectada; En caso de sustitución total la retracción aumenta un 60% - 61%. Para el hormigón de resistencia elevada, (a/c 0.5 – f_c 40Mpa) con

contenido del 20% de reciclados, la retracción aumenta un 8% para curado de 7 días y aumenta un 18% cuando es curado por 28 días. En caso de sustitución total, la retracción aumenta un 60% para curado 7d y 72% para curado de 28d..

La retracción final que probablemente se alcance en el hormigón de control curado por 28 días, será entre 4% a 7% menor que la que se alcance en el mismo hormigón curado por 7 días. Esto puede cambiar totalmente en los hormigones reciclados, pudiéndose alcanzar deformaciones superiores en el hormigón que es curado más tiempo, por el efecto que tienen sobre la tasa de secado. Esto es mas notorio en el hormigón de resistencia elevada por sus características de mayor impermeabilidad.

En el caso de la fluencia del hormigón convencional, un contenido de hasta el 20% no genera aumentos de deformación mientras para sustituciones totales, el incremento es del 46%. el hormigón de resistencia elevada si se ve altamente afectado, con incrementos del 12% y 87% para contenidos del 20% y totales respectivamente.

El hormigón convencional obtiene unos incrementos en retracción y fluencia a 100 días directamente proporcionales a los decrecimientos obtenidos en la deformación instantánea. No obstante para el hormigón de resistencia elevada los incrementos de retracción y fluencia son mayores, perdiendo la proporción esperada de acuerdo a las deformaciones instantáneas, Hecho por el cual las recomendaciones del Rilem, deben revisarse cuando se utilizan áridos reciclados en tipos de hormigón de resistencias mayores.

CONCLUSION FINAL

El contenido de árido reciclado afecta en mayor medida a los hormigones de resistencia elevada, pues el incremento en las deformaciones diferidas es considerable.

No obstante se da por validado su utilización en hormigón estructural convencional, típicamente en edificación, desaconsejando en todo caso el uso en elementos pretensados o elementos sometidos a un alto nivel tensional, por su alta deformabilidad.

RECOMENDACIÓN

Basado en las conclusiones del fenómeno observado se da por recomendación, al realizar el diseño de mezclas, situar la resistencia objetivo por debajo de la resistencia del hormigón de origen de los áridos reciclados. Y para hormigón de resistencia elevada evitar contenidos altos de áridos reciclados.

LINEAS DE INVESTIGACION FUTURAS

Con el empeño puesto en el mayor aprovechamiento del material nos vemos animados a seguir investigando sus propiedades diferidas, proponiendo una serie de estudios complementarios que refuercen el conocimiento en este tema.

- Influencia del contenido de áridos reciclados en la fluencia y retracción del hormigón estructural, utilizando áridos en estado de saturación.
- Influencia del contenido de áridos reciclados finos en las deformaciones diferidas.
- Efecto de la edad de puesta en carga sobre la fluencia del hormigón de áridos reciclados.
- Comportamiento del hormigón de áridos reciclados ante periodos cíclicos de estado carga.
- Respuesta del comportamiento diferido de los hormigones reciclados, ante las adiciones puzolanicas.

DIFUSION DE RESULTADOS DE INVESTIGACION

Para completar el desarrollo con éxito de la investigación se requiere de una ejecución eficaz de la difusión de resultados I+D.

Aprovechando el creciente interés por las políticas de desarrollo sostenible y el hecho de constituir un tema de actualidad, lo que estimulara la difusión directa.

Se pretende seguir con las directrices fijadas en el grupo de producir escritos de alto valor científico que sean de gran interés de la comunidad investigadora, cumpliendo con los estándares de revistas indexadas y congresos internacionales de gran impacto.

Productos Producidos:

- *Creep and Shrinkage of Recycled Aggregate concrete*. Construction and Building Materials, Vol 23, Issue 7, Julio 2009.
- *A Study on shrinkage and creep of recycled concrete aggregate*. International symposia of IASS, Valencia, 2009, “artículo aceptado para ponencia y publicación en memorias”.
- Informe del proyecto Recnhor “proyecto prenormativo español de utilización de áridos reciclados en hormigón estructural”, Cedex.

Siguiendo con esta línea se prevé la defensa de una tesis doctoral, y la producción de artículos de calidad, que sean puestos a disposición de la comunidad científica a través de revistas internacionales de impacto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Buck A.D; "Recycled Concrete as Source of Aggregate". Journal of American Concrete Institute, (1977) Vol 5, pp 212-219.
- [2] Nixon P.J; "Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete". RILEM Committee 37/DRC, Demolition and reuse of concrete. Matériaux et Constructions. (1978) Vol. 11 N° 65, pp. 371-378.
- [3] Poon C.S., Kou S.C., Lam S.; "Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks". Cement and Concrete Research (2002), Vol. 16, pp. 281-289.
- [4] Poon C.S., Shui Z.H., Lam S., Fok H., Kou S.C.; "Influence of Moisture States of Natural and Recycled Aggregates on the Slump and Compressive Strength of Concrete". Cement and Concrete Research, (2004) Vol 34, pp. 31-36.
- [5] Curella A.; "Informe Técnico, Grupo de entidades de reciclaje de derribos", (2003)
- [6] Grupo de Trabajo 2/5 Hormigón Reciclado, Comision 2: Materiales ACHE; "Monografía M-11. Utilización de Árido Reciclado para la Fabricación de Hormigón Estructural". España (2006).
- [7] Collins R J, "Upgrading the use of recycled material - UK demonstration project", Studies in Environmental Science, (1997) Vol 71, 1997, pp 185-191.
- [8] Nagataki S., Gokce A., Saeki T., Hisada M.; "Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates". Cement and Concrete Research, (2004) Vol 34, 6, pp 965-971.
- [9] European Demolition Association (EDA); "Demolition and Construction Debris: Questionnaire about an EC Priority Waste Stream". The Hague, (1992).
- [10] Hansen T.C., "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete (Second state-of-the-art report developments 1945-1985". RILEM Technical Committee- 3/DCR (1986)

- [11] Kasai Y.; "Guidelines and The Present State of The Reuse of Demolished Concrete in Japan". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, (1994), pp 93-104.
- [12] Vincke J., Rousseau E.; "Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and Future Evolution". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, (1994), pp 57-69.
- [13] Buyle-Bodin F.; "Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete". Materials and Structures (2002), Vol 35, pp. 504-509.
- [14] Zaharieva R., Buyle-Bodin F., Skoczylas F., Wirquin E.; "Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete". Cement and Concrete Composites (2003), Vol 25, 2, pp. 223-232.
- [15] Marmash B.E., Elliot K.S.; "The Properties of Recycled Precast Concrete Hollow Core Slabs for Use as Replacement Aggregate in Concrete". Waste Materials in Construction, Proceedings of the International Conference on the Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection, Harrogate, England (2000), p.p. 769-781.
- [16] Gonzalez-Fonteboa B., Martinez-Abella F.; "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties", Building and Environment (2008) Vol: 43 pp. 429-437.
- [17] Ravindrarajah R.S, Tam C.T.; "Methods of Improving the Quality of Recycled Aggregate Concrete". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry Vol. 2, Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium (1988) Ed. Y. Kasai; pp. 575-584+A49.
- [18] Vázquez E., Barra M.; "Hormigón de Áridos Reciclados: Retracción". V Seminario Desenvolvimento Sustentavel e a Reciclagem na Construcao Civil. Comité Técnico 206 Medio Ambiente, Brasil (2002), pp. 7-14.
- [19] Nagataki S., Gokce A., Saeki T.; "Effects of recycled aggregate characteristics on performance parameters of recycled aggregate concrete". Proceedings of Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Spain (2000), pp. 51-71.
- [20] Hansen T.C., Narud H.; "Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate". Concrete International (1983), Vol 5, 1, p.p. 79-83.
- [21] Barra M.; "Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado en su Aplicación como Hormigón Estructural". Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña (1996).
- [22] Poon C.S., Shui Z.H., Lam L.; "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates". Construction and Building Materials (2004), Vol. 18, 6, pp. 461-468.

- [23] Sánchez-De-Juan M.; "Estudio sobre utilización de áridos reciclados en hormigón estructural". Tesis Doctoral, ETSI Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid (2005).
- [24] Kreijger P.C.; "Hergebruik van Bouw-en Sloopafval als Toeslagmateriaal in Beton". TH-Eindhoven, Afdeling Bouwkunde, Rapport M83-1 (1983).
- [25] Ravindrarajah R.S., Loo Y.H., Tam C.T.; "Recycled Concrete as Fine and Coarse Aggregate in Concrete". Magazine of Concrete Research (1987), Vol. 39, 141, pp. 214-220.
- [26] Ruhl M.; "Water Absorption Capacity of Recycled Demolition Rubbish". Darmstadt Concrete (1997) Vol. 12.
- [27] Grubl P., "German Committee for reinforced concrete (DafStb) - Code: Concrete with Recycled Aggregates". Proceedings of International Symposium: Sustainable Construction - Use of Recycled Concrete aggregate, University of Dundee, Concrete Technology Unit, London (UK) (1998).
- [28] Barra M., Vazquez E.; "Properties of concrete with recycled aggregates: influence of the properties of the aggregate and their interpolation". (1998)
- [29] Dhir R.K., Limbachiya M.C., Leelawat T.; "Suitability of Recycled Concrete Aggregate for Use in BS 5328 Designated Mixes". Structures and Buildings (1999).
- [30] Gonzalez-Fonteboa B.; "Hormigones con Áridos Reciclados Procedentes de Demoliciones: Dosificaciones, Propiedades Mecánicas y Comportamiento Estructural a Cortante". Tesis doctoral. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica A Coruña (2002).
- [31] Tavakoli M., Soroushian P.; "Strengths of recycled aggregate concrete made using field -demolished concrete as aggregate". ACI Materials Journal (1996) Vol. 93, 2, pp. 182-190.
- [32] Ravindrajah R.S., Loo Y.H., Tam C.T.; "Strength Evaluation of Recycled-Aggregate Concrete by in-Situ Tests". Materials and Structures (1988), N° 21, pp. 289-295.
- [33] Sagoe-Crentsil K., Brown T.; "Guide for Specification of Recycled Concrete Aggregates (RCA) for Concrete Production". CSIRO, Building, Construction And Engineering. Ecocycle, Victoria (1998).
- [34] Yanagi K., Nakagawa M., Hisaka M., Kasai Y.; "Effect of Impurities in Recycled Coarse Aggregate Upon a Few Properties of the Concrete Produced With It". Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Japan (1988), pp. 613-623.
- [35] RILEM.; "Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete". Recycling of Demolished Concrete and Masonry. RILEM Report 6, Edited by Hasen, T.C., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London (1992).

- [36] Di Niro G., Dolara E., Ridgway P.; "Recycled Aggregate Concrete (RAC): Properties of Aggregate and RC Beams Made from RAC". Concrete for Environment Enhancement and Protection. Concrete in the Service of Mankind. Vol 1. Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK (1996).
- [37] Fernandez Canovas M.; "Hormigón". Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I De Caminos, Canales y Puertos (1991).
- [38] Kaga H., Kasay Y., Takeda K., Kemi T.; "Properties of Recycled from Concrete". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Japan (1988) Ed. Kasai Y, pp. 690-698.
- [39] Kobayashi S., Kawano H.; "Properties and Usage of Recycled Aggregate Concrete". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol 2, Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Japan (1988) Ed. Kasai Y, pp. 547-556.
- [40] Dosho Y., Kikuchi M., Narikawa A., Oshima A.K.; "Application of Recycled Concrete for Structural Concrete-Experimental Study on the Quality of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete". Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona (2000).
- [41] Yanagibashi K., Yonezawa T., Arakawa K., Yamada M.; "A Concrete Recycling Technique for coarse Aggregate Regeneration Process" Proceedings of the International Conference: Sustainable Concrete Construction, Dundee, Scotland (2002), pp 511-522.
- [42] Kawano H.; "The state of using by-products in concrete in Japan and outline of JIS/TR on recycled concrete using recycled aggregate". Proceedings of the 1st FIB Congress on recycling (2003), pp. 245-253.
- [43] Kasai Y.; "Development and subjects of Recycled Aggregate Concrete in Japan". Key Engineering Materials (2006), Vol 302-303, pag 288-300.
- [44] Dosho Y.; "Development of a Sustainable Concrete Waste Recycling System – Application of Recycled aggregate Concrete Produced by Aggregate Replacing Method". Journal of Advanced Concrete Technology (2007), Vol 5, N° 1, pp 27-42.
- [45] Rilem; "Specifications for Concrete Whit Recycled Concrete Aggregates". Materials and Structures (1994).
- [46] Works Bureau of Hong Kong; "Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates. WBTC No. 12" (2002).
- [47] Fong W.F, Yeung J.S., Poon C.S.; "Hong kong experience of using recycled aggregates from construction and demolition materials in ready mix concrete", (2002)

- [48] Danish Concrete Association, "Recommendation for the use of Recycled Aggregates for Concrete in Passive Environmental Class". Publication n. 34, Oct. (1989)
- [49] Crawford H.S, Cullum-Kenyon S.; "Market development study for recycled aggregate products". Report to Waste Reduction Advisory Committee, May (2001)
- [50] Knight J; "Relative Performance of High Quality concretes Containing Recycled Aggregates and Their Use in Construction". Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction (1998), Edit by Dhir, Henderson and Limbachiya, pp. 275-286.
- [51] RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). "Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete". Recycling of Demolished Concrete and Masonry. RILEM Report 6, London (1992), Edited by Hasen T.C.
- [52] Topcu I.B; "Physical and Mechanical Properties of concretes Produced With Waste Concrete". Cement and Concrete Research (1997), vol 27, N 12, p 1817-1823.
- [53] Karlsen J., Petrovic G., Lahus O.; "A Norwegian Certification Scheme for Recycled Aggregate (RCA)". Sustainable Buildings (2002)
- [54] Akash R., Kumar N.J., Sudhir M.; "Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete", Resources, Conservation and Recycling (2007), Vol 50, Issue 1, pp. 71-81.
- [55] Nealen A., Rühl M.; "Consistency aspects in the production of concrete using aggregates from recycled demolition material". In Darmstadt Concrete, Annual Journal 12, TU Darmstadt, (1997).
- [56] Etxeberria M., Marí A., Vazquez E.; "Recycled aggregate concrete as structural material". Materials and Structures (2007), Vol 40, 5 pp 529-541.
- [57] Rashwam S., Abourizk S.; "Research on an alternative method for reclaiming leftover concrete", Concrete International (1997), N° 7.
- [58] Gonzalez-Fonteboa B., Martinez-Abella F.; "Recycled aggregates concrete: aggregate and mix properties". Materiales de Construcción (2005), Vol. 55 pp. 53-66.
- [59] Hansen T.C; "Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete". ACI Journal 82 (1985) (5), pp. 82-52.
- [60] Kuo S.; "Reusing Recycled Aggregates in Structural Concrete". Thesis Submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the Hong Kong Polytechnic University, (2006)
- [61] Kikuchi M., Yasunaga A., Ehara K.; "The Total Evaluation of Recycled Aggregate and Recycled Concrete". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium (1993), Ed. Erik K. Lauritzen, pp. 367-378.

- [62] Frondistou-Yannas S.; "Waste Concrete as Aggregate for New concrete". *Journal of American Institute Proceedings* (1977), pp 373-376.
- [63] Ravindrarajah R.S., Tam C.T.; "Properties of Concrete Made With Crushed Concrete as Coarse Aggregate". *Magazine of Concrete Research* (1985), Vol. 37, n° 130, pp. 29-38.
- [64] Nishbayashi S., Yamura K.; "Mechanical Properties and Durability of Concrete from Recycled Coarse Aggregate Prepared by Crushing Concrete". *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Japan (1988)*, pp. 652-659, .
- [65] Kasai Y., Hisaka M., Yanagi K.; "Durability of Concrete Using Recycled Coarse Aggregate"; *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Japan (1988)*, Ed. Y. Kasai, pp. 623-632.
- [66] Hansen T.C; "Recycling of Demolition Concrete and Masonry". *RILEM Report 6*. (1992).
- [67] Barra M., Vazquez E., "The Influence of Retained Moisture in Aggregates from recycling on the Properties of New Hardened concrete". *Waste Management* (1996), Vol 16, N° 3 , pag 113-117.
- [68] Tam V., Vivian W., Tam C.; "Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two- stage mixing approach". *Cement and Concrete Research* (2005) Vol 35, N 6, pp1195-1203.
- [69] Yanagi K., Hisaka M., Kasai Y.; "Physical Properties of Recycles Concrete Using Recycled Coarse Aggregate Made of Concrete With Finishing Materials. *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., London (1994)*, pp. 379-390
- [70] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A.; "Comparative tests of beams and columns made of recycled aggregate concrete and natural aggregate concrete". *Journal of Advanced Concrete Technology* (2007), Vol. 5 pp 259-273.
- [71] Gomez J.M.V.; "Porosity of Recycled Concrete with Substitution of Recycled Concrete Aggregate: an Experimental Study". *Cement and Concrete Research* (2002), Vol 32, pp. 1301-1311.
- [72] Otsuki N., Miyazaki S., Yodsudjai W.; "Influence of Recycled aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering* (2003), Vol 15 N° 5 pp 443-451.
- [73] Kou S., Poon C.S., Chan D.; "Properties of Steam Cured Recycled Aggregate Fly Ash Concrete". *Conference on the use of Recycled Materials in Buildings and Structures. Barcelona (2004)*,

<http://congress.cimne.upc.es/rilem04/frontal/Papers.htm>.

- [74] Xiao J., Li J., Zhang CH.; "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading". *Cement and Concrete Research* (2004), Vol. 35, pp 1187-1194.
- [75] Tsung-Yueh T., Yuen-Yuen CH., Chao-Lung H.; "Properties of HPC with recycled aggregates". *Cement and Concrete Research* (2006), Vol. 36, pp 943-950.
- [76] Etxeberria M., Vazquez E., MARÍ A., Barra M.; "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete". *Cement and Concrete Research* (2007), Vol 37, pp 735-742.
- [77] Boegh E., Hansen T.; "Elasticity and Drying Shrinkage of Recycled Aggregate Concrete". *Journal of American Concrete Institute Proceedings* (1985), Vol 82, 5, pp 648-652.
- [78] Xiao Zh., Li J.B., Zhang Ch.; "On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview". *Materials and Structures* (2006), Vol 39, 6
- [79] Poon C.S, Chan D.; "The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong". *Resources Conservation and recycling* (2006). Vol. 50. pp 293-305.
- [80] Evangelista L., Brito J.; "Mechanical behaviour concrete made with fine recycled concrete aggregates". *Cement and concrete composites* (2007), Vol 29, pp 397-401.
- [81] Ravindrarajah S., Steward M., Greco D.; "Variability of recycled concrete aggregate and its effects on concrete properties, A case study in Australia". *International workshop on recycled concrete* (2000).
- [82] Ravindrarajah R.S., Tam C.T.; "Methods of Improving the Quality of Recycled Aggregate Concrete". *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium* (1988), Ed. by Y. Kasai; pp. 575-584.
- [83] Casuccio M., Torrijos M.C., Giaccio G., et Al; "Failure mechanism of recycled aggregate concrete". *Construction and Building Materials* (2008) Vol. 22 pp: 1500-1506.
- [84] Won M.C, "Use of crushed concretes aggregate for pavement concrete", Research Section, Construction Division, Texas Department of Transportation, Austin Texas (1999)
- [85] Grübl P., Rühl M., Bühner M.; "Evaluation of modulus of elasticity of concrete with recycled aggregates", *Darmstadt Concrete - Annual Journal* 14, (1999).
- [86] Dillmann R.; "Concrete with recycled concrete aggregate". *Proceedings of International Symposium on Sustainable Construction: Use of Recycled*

Concrete Aggregate, University of Dundee, Scotland (1998), pp. 239–253.

- [87] Mellmann G.; "Processed concrete rubble for the reuse as aggregate". Proceeding of the International Seminar on Exploiting Waste in Concrete, University of Dundee, Scotland (1999), pp 171–178 (1999).
- [88] Kakizaki M., Harada M., Soshiroda T., Kubota S., Ikeda T., Kasai Y.; "Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Japan (1988), Ed. Y. Kasai, pp. 565-574.
- [89] Rühl M., Atkinson G.; "The Influence of recycled aggregate on the stress-strain relation of concrete", Darmstadt Concrete - Annual Journal 14 (1999).
- [90] Topcu I., Sengel S.; "Properties of Concretes Produced Whith Waste Concrete Aggregate". Cement and Concrete Research (2004) Vol 34 pp 1307-1312.
- [91] Ravindrarajah S., Tam C.T.; "Recycling Concrete as Fine Aggregate in concrete". International Journal of Cement composites and lightweight Concrete (1987), V 37 (4) Pag 235–241.
- [92] Di Niro, Dolara E., Cairns R.; "Properties of Hardened RAC for Structural Purposes". Proceedings of International Symposium "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate, London (1998), pp 178-187.
- [93] Kheder G.F., Al-Windawi S.A.; "Variation in mechanical properties of natural and recycled aggregate concrete as related to the strength of their binding mortar", Materials and Structures (2005), Volume 38, Number 7.
- [94] Carlson R.W.; "Drying Shrinkage of Large Concrete Members". ACI Journal (1937), Vol 33 n° 3, pp 327-336.
- [95] Pickett G.; "Effect of aggregate on Shrinkage of Concrete and Hypothesis Concerning Shrinkage". ACI Journal (1956), Vol 27 (5) pp 581-590.
- [96] L'Hermite R.; "Volume Changes of Concrete". Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement. Washington DC, National Bureau of Standars, (1960) pp 659-702.
- [97] Powers T.C.; "Aspects fondamentaux du retrait du beton". Revue des Materiaux de Construction, N° 545 (1961) pp 86-89.
- [98] Shah S.P., Ahmad S.H.; "High performance concrete: properties and applications". Butterworth Heinemann, Oxford Great Britain (1994), pp 403.
- [99] Furnas; "Concretos (massa, structural, projectado e compactado com rolo)" – Ensaio e propriedades. Ed Pini, Sao Paulo, (1997).
- [100] Mindess S., Young J.F., Darwin D.; "Concrete". 2nd ed: Prentice Hall,

(2003).

- [101] Moon J.H., et al; "Autogenous Shrinkage, Residual Stresses, and Cracking in Cementitious Composites: The Influence of Internal and External Restraint in Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology". Gaithersburg, Maryland, USA: Lund University Lund Institute of Technology, (2005) pp. 1-20.
- [102] Smadi M.M., Slate F.O., Nilson A.H.; "Shrinkage and creep of high, medium and low strength concretes.including overloads". ACI Materials Journal (1987), Vol 84, Issue 3, pp 224-234.
- [103] Tazawa E., Miyazawa S.; "Experimental Study on Mechanism of Autogenous Shrinkage of Concrete". Cement and Concrete Research (1995), Vol 25, 8, pp. 1633-1638.
- [104] Powers T.C, Copeland L.E, Mann H.M.; "Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Pastes". Bulletin 110, Portland Cement Association, Skokie. (1959), p. 1-12.
- [105] De Larrard F., Acker P., le Roy R.; "Shrinkage, Creep and Thermal Properties. High Performance Concrete: Properties and Applications", Shah S. P. and Ahmad S. H., McGraw-Hill, New York (1994), pp. 65-114.
- [106] Belaribi N., Pons G., Perrin B.; "Delayed behaviour of concrete: Influence of additions and aggregate characteristics in relation to moisture variations". Cement and Concrete Research (1997), Vol 27 n°9, pp. 1429-1438.
- [107] Brooks J.J.; "Influence of mix proportions, plasticizers and superplasticizers on creep and drying shrinkage of concrete". Magazine of Concrete Research (1989), Vol 41, n 148, pp. 145-153.
- [108] Collins T.M.; "Proportioning high strength concrete to control creep and shrinkage". ACI Materials Journal (1989), Vol 86, 6, pp 576-580.
- [109] Jensen O.M., Hansen P.F.; "Autogenous deformation and RH-change in perspective". Cement and Concrete research (2001), Vol 31, n 12, pp. 1859-1865..
- [110] Bentz D.P., Snyder K.A.; "Protected paste volume in concrete - Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate". Cement and Concrete Research (1999), Vol 29, 11, pp. 1863-1867.
- [111] Boukendakdji M., Brooks J.J., Wainwright P.J.; "Transitional Thermal Creep of OPC and Slag-Cement Concrete". Proceedings of 4th International congress on Advances in Civil Engineering, Famagusta, Northern Cyprus, Nov (2000)
- [112] Mark S.L., Foster G., Chirgwin G., Ho D.W.S.; "Properties of high-performance heat-cured slag cement concrete for bridge structures". ACI Special Publication (1999), Vol 172, pp 821-836.
- [113] Mokhtarzadeh A., French C.; "Time-dependent properties of high-strength concrete with consideration for precast applications". ACI Materials Journal (2000), Vol 97, 3, pp 263-271.

- [114] Bazant Z.P, "Mathematical modelling of creep and shrinkage of concrete". New York, John Wiley & Sons, (1988)
- [115] American Concrete Institute (ACI), ACI Committee 209, Subcommittee II. "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures". Report ACI 209, Detroit, pp. 1- 12, March (1992).
- [116] Feldman R.F., Sereda P.J., "A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption- length change and mechanical properties". *Materials and Structures* (1968), Vol 1, 6, pp 509-520.
- [117] Wittmann F.H.; "Creep and Shrinkage Mechanisms". *Creep and Shrinkage in Concrete Structures*. Lausanne, Switzerland (1982), John Wiley & Sons, pp 129-161.
- [118] Powers T.C., "Mechanism of shrinkage and reversible creep of hardened cement paste". *Proceeding of International Conference on Structures of Concrete*, London (1965) pp 319-334.
- [119] Neville A.M, Dilger W.H.; "Creep of Concrete: Plain, Reinforced, and Prestressed". North-Holland Pub. Co., American Elsevier, Amsterdam, New York (1970), 622 pp.
- [120] Pickett G.; "The effect of change in moisture-content of the creep of concrete under sustained load". *ACI Journal* (1942), 38, pp 333-355.
- [121] Bazant Z.P.; "Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future". *Nuclear Engineering and Design* (2001), Vol 203 (1), pp. 27-38.
- [122] Jensen R.S., Richart F.E.; "Short-Time Creep Test of Concrete in Compression". *ASTM Proceedings* (1938), Vol 38, pp 410-417.
- [123] Ali I., Kesler C.E.; "Mechanisms of creep in concrete". American Concrete Institute, Symposium on Creep of Concrete, Detroit, United States (1964). pp. 35-63.
- [124] Thomas F.G.; "Creep of Concrete under Load". London: International Association of Testing Materials, (1937).p. 292-294.
- [125] Neville A.M., Dilger W.H., Brooks J.J.; "Creep of Plain and Structural concrete". Construction Press, Longman Group Limited, New York, (1983) 361 pp.
- [126] Neville A.M.; "Theories of Creep in Concrete". *ACI Journal* (1955), Vol 52, pp. 47-60.
- [127] Lyman C.G.; "Growth and Movement in Portland Cement Concrete". London, Oxford University Press, (1934), 139 pp
- [128] ACI Committee 209; Effect of Concrete Constituent, Environment, and Stress on the Creep and Shrinkage of Concrete. *Designing for Effects of Creep, Shrinkage, and Temperature in Concrete Structures SP 27*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, (1971). pp. 1-42.
- [129] Davis R.E., Davis H.E., Hamilton J.S.; "Plastic flow of concrete under sustained stress". *American Society for Testing Materials, Proceedings*, 34 (Part 11) (1934). pp. 354-386.

- [130] Han N.; "Time dependent behaviour of high strength concrete". (1996).
- [131] Hsu T.T.C.; "Inelastic Behavior T-Loading". Cornell University, Ithaca. (1956), pp. 6.
- [132] Wiegink K., Marikunte S., Shah S.; "Shrinkage cracking of high strength concrete". ACI Materials Journal (1996), Vol 93 pp 409-405.
- [133] Alexander M. G.; "Aggregates and the deformation properties of concrete". ACI Materials Journal (1996), Vol 93, 6, pp. 569-577.
- [134] Neville A. M.; "Creep of concrete as function of its cement paste content". Magazine of Concrete Research (1964), Vol 16, 46, pp 21-30.
- [135] Brooks J.J., Wainwright P.J., "Influences of Steam Curing on Strength, Shrinkage and Creep of OPC and Slag Concretes". Proceeding of the International Conference, University of Dundee, Scotland UK (1996), pp 367-374.
- [136] Keeton J.R.; Study of Creep in Concrete". Technical reports R333-I, R333_II, R333-III, U.S. Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme (1965).
- [137] Alaejos M.P., et al; "Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural". Monografías ACHE. (2006).
- [138] Kou S.C., Poon C.S., Chan D.; "Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete". Materials and Structures (2008), Vol 41, pp 1191-1201.
- [139] Limbachiya M.C., Leelawat T., Dhir R.K., "RCA Concrete: A Study of Properties in the fresh State, Strength Development and Durability". Proceedings of the International Conference on the Use of Recycled Concrete Agregates (1998), pp 227-238.
- [140] Teranishi K., Dosho Y., Narikawa M., Kikushi M.; "Application of Recycled Aggregate concrete for Strcuture Concrete. Part 3 – Production of Recycled Aggregate by Real-Scale Plant and Quality of Recycled Concrete Aggregate". Procedings of the International Symposium: "Sustainable Construction : Use of Recycled Concrete Aggregate", Thomas Telford, London (1998) pp 69-82.
- [141] Costabile S.D.; "Use of recycled aggregate in high-volume fly ash concrete – Another step toward a sustainable construction industry". Papers of the 3rd CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development of Cement and Concrete, San Francisco, USA (2001), pp. 77–86.
- [142] Katz A.; "Propierties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrates old concrete". Cement and Concrete Research (2003), Vol. 33, No. 5, pp. 703-711.
- [143] Gomez-Soberon J.M.; "Relationship Between Gas Adsorption and the Shrinkage and Creep of Recycled Aggregate Concrete", Cement, Concrete, and Aggregates (2003), Vol. 25, 2.

- [144] Batayneh M., Marie I., Asi I.; "Use of selected waste materials in concrete mixes".. Waste Management (2006), Vol. 27 pp 1870–1876.
- [145] De Paw P., Vyncke J., "Sgrinkage and Creep of Concrete Whith Recycled Materials as Coarse Aggregate". Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate, University of Dundee, Scotlland (1998), pp 143-156.
- [146] Roos F., Zilch K.; "Verification of the Dimensioning Values for Concrete with Recycled Concrete Aggregates". International Symposium "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate" University of Dundee, Concrete Technology Unit, London (UK) (1998).
- [147] Limbachiya M.C., Leelawat T., Dhir R.K.; "Use of Recycled Concrete Aggregate in High-Strength Concrete". Materials and Structures (2000), Vol 33, pp. 574-580.
- [148] Fraaij A.L., Pietersen H.S., Vries J.; "Performance of Concrete Whith Recycled Aggregates". Proceedings of the International Congress Challenges of Concrete Construction, Dundee,Scotland (2002), Vol: Sustainable Concrete Construction pp187-198.
- [149] Gomez J.M.V.; "Deferred Behavioral Verification of Concrete with Aggregate from Recycled Concrete, Part II) Experimental Study of Creep". Proceedings of the Fifth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials, San Sebastian. Edit by G. Ortiz de Urbina y J.J.J.M. Goumans, Spain, (2003) pp 115-125.
- [150] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz; "Influence of recycled aggregates in mechanical properties of HS/HPC". Cement and Concrete Composites (2002), Vol 24, 2, pp. 269-279
- [151] Branson D.C., "Deformation of concrete structures". Mc Graw Hill, New York (1977)
- [152] Ross A.D.; "Concrete creep data", The Structural Engineer, (1937)
- [153] RILEM Committee TC 107,"Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures – Model B3" (1995)